



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, GEOQUÍMICA E
POTENCIAL ECONÔMICO DE OCORRÊNCIAS DE TERRAS
RARAS DO MACIÇO GRANÍTICO MOCAMBO, GOIÁS.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 382

Ciro Costa Vieira

Brasília - DF

Novembro de 2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, GEOQUÍMICA E
POTENCIAL ECONÔMICO DE OCORRÊNCIAS DE TERRAS
RARAS DO MACIÇO GRANÍTICO MOCAMBO, GOIÁS.**

Área de concentração: Prospecção e Geologia Econômica

Ciro Costa Vieira

Banca Examinadora

Profº. Dr. Nilson Francisquini Botelho (Orientador)

Profº. Dr. Claudinei Gouvea de Oliveira (IG/UnB))

Profº. Dr. Artur Cezar Bastos Neto (UFGRS)

Local e data da defesa: Brasília, 11 de novembro de 2016



Caracterização Mineralógica, Geoquímica e Potencial Econômico de
Ocorrências de Terras Raras do Maciço Granítico Mocambo, Goiás

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

Antoine Lavoisier



Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Nilson Francisquini Botelho pela orientação, compreensão, dedicação e paciência durante todas as etapas deste trabalho. Sem sua participação esta dissertação não teria sido feita.

Ao Professor Jérémie Garnier pelo auxílio e orientação em diversas partes da dissertação. Sua colaboração foi fundamental para a realização da mesma.

Ào CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Às professoras Tati de Almeida e Adalene Moreira Silva, que me auxiliaram em etapas pré-campo, e Edi Mendes Guimarães, pelo auxílio na interpretação dos difratogramas de raios X.

Aos colegas Federico Alberto Cuadros Jiménez, Isabela Moreno e Jacqueline pelo acompanhamento, colaboração e auxílio na realização e interpretação das análises de microsonda eletrônica.

Aos colegas Jean Marcel Costa, Federico Alberto Cuadros Jiménez e Hudson Queiroz pelo auxílio durante os trabalhos de campo.

Às alunas Tassiane Junqueira e Gisele Gondim pela ajuda na preparação de amostras.

Aos funcionários do Instituto de Geociências pela colaboração na realização dos trabalhos de campo e nos problemas burocráticos.

Aos meus amigos da graduação e pós-graduação pelo companherismo, incentivo, discussões e colaboração, desde a graduação até o fim do mestrado.

Aos meus familiares pelo suporte, força e carinho que sempre me permitiram acreditar e seguir em frente.



Resumo

O Maciço Granítico Mocambo (MGM) é um granito do tipo A localizado na região nordeste do Estado de Goiás, próximo à cidade de Monte Alegre de Goiás. Este maciço faz parte da Suíte Pedra Branca e está incluído na Província Estanífera de Goiás: uma série de granitos conhecidos por apresentarem, em comum, mineralizações de Sn e enriquecimento em elementos terras raras (ETR). Este trabalho aborda as formas de ocorrência dos ETR no MGM, tanto na rocha parental como em greisen, saprolito e solo, com ênfase para os ETR adsorvidos em argilominerais e todo o processo do transporte e fracionamento destes elementos da rocha são até a adsorção. O objetivo do trabalho foi correlacionar o conteúdo de ETR na rocha parental, saprolito e solo, com as formas em que estes se encontram em cada tipo de amostra. Para isto coletaram-se amostra de rocha, saprolito e solo, lâminas delgadas foram feitas e analisadas em microsonda eletrônica, análises de difração de raios X foram efetuadas nas amostras de solo, e análises geoquímicas foram efetuadas nas amostras. Amostras de argila foram separadas a partir de amostras de solo e extrairam-se os íons trocáveis destas amostras de solo e de argila a partir de uma solução de $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$. Os resultados mostraram um enriquecimento dos solos em ETR, com exceção do Ce, especificamente de íons trocáveis em argilominerais, principalmente caulinita e illita, descritos nos difratogramas de raios X. A oxidação do Ce^{+3} para Ce^{+4} na superfície faz com que este elemento provavelmente forme óxidos e assim apresente menor quantidade de íons trocáveis. A presença de grãos de cerianita em uma amostra de solo superficial demonstra o comportamento do Ce dentro do perfil, tendo em vista que neste mineral o Ce encontra-se na forma 4+. Observou-se que dentro de um perfil de solo o horizonte A apresenta enriquecimento em ETR em relação aos pesados, com anomalia positiva de Ce, e os horizontes B e C possuem enriquecimento em ETRP e anomalia negativa de Ce. As observações em lâmina delgada e as análises de microsonda eletrônica revelaram a presença de minerais portadores de ETR: allanita e fergusonita, além de zircão e apatita ricos em ETR, como minerais primários, e xenotima, bastnaesita, torita, monazita e hingganita como minerais secundários. Fergusonita e hingganita foram descritas neste maciço pela primeira vez. Conclui-se que o MGM apresenta enriquecimento geral em ETR, com destaque para os horizontes B e C do perfil de solo que concentram relativamente mais ETR pesados sendo, portanto, uma ocorrência importante destes elementos, com potencial para hospedar depósito de ETR do tipo adsorção iônica.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos Terras Raras, Granito tipo A, Maciço Granítico Mocambo, Adsorção Iônica, Goiás.



Abstract

The Mocambo Granitic Massif (MGM) is an A-type granite located in the northeastern part of Goiás State, near the city of Monte Alegre de Goiás. It belongs to the Pedra Branca Suite, which is itself part of the Goiás Tin Province, a group of stanniferous granites that exhibit similar geochemical features, including greater or lesser degrees of REEs enrichment. The parent rock in the MGM is a coarse porphyritic pink biotite granite. Thin section observations coupled with electron microprobe analyses revealed the presence of several REE-bearing minerals: allanite, fergusonite, zircon and apatite as accessory minerals, and xenotime, bastinäsite, thorite, monazite and hingganite as secondary minerals. Fergusonite and hingganite were identified in this massif for the first time. This work investigated the forms of occurrence of REEs in the MGM, in the parent rock, as well as in greisen, saprolite and soil, with emphasis placed on the REEs adsorbed on clay minerals, and the entire process of transport and fractionation of these elements from the fresh rock until adsorption. The objective of this work was to correlate the REEs contents of the parent rock, saprolite and soil with the forms of these elements found in each kind of sample. Therefore, rock, saprolite and soil samples were collected, and thin sections were made and analyzed using an electron microprobe, X-ray diffraction, and whole-rock analyses. Clay fractions were separated from the saprolite and soil samples, and exchangeable ions were extracted by ammonium sulfate $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$. The results showed an enrichment of REEs (with the exception of Ce) in soils, especially in the clay fraction. Moreover results suggest that these elements are mostly adsorbed on clay minerals, mostly kaolinite and illite, which were identified in the X-ray patterns. The oxidation of Ce^{3+} to Ce^{4+} on surfaces and the probable formation of Ce oxides cause this element to present a smaller quantity of exchangeable ions. The presence of cerianite grains in one superficial soil sample shows that Ce is found in the +4 state in this mineral in the soil profile. Within soil profiles, the A horizons are enriched in light rare earth elements (LREEs) compared to the heavy rare earth elements (HREEs), and displays a positive Ce anomaly, whereas, the B and C horizons display HREEs enrichment and mostly negative Ce anomalies. The MGM displays substantial enrichment in REEs, and the HREEs concentrations in the B and C soil horizons in particular, represent a potential target for an ion-adsorption type REEs deposit.

Keywords: Rare Earth Elements, A-type Granite, Mocambo Granitic Massif, Ion-adsorption, Goiás.



Sumário

Agradecimentos.....	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice de Tabelas	ix
1. Introdução.....	1
2. Localização e Aspectos Fisiográficos	2
2.1 Geomorfologia.....	3
2.2. Clima e Vegetação	4
2.3. Solos	4
3. Geologia Regional	4
3.1. Província Estanífera de Goiás	5
3.2. Suíte Pedra Branca	5
3.3. Granito Mocambo.....	6
3. Materiais e Métodos.....	8
3.1. Aerogeofísica	8
3.2. SEM-EDS/EPMA.....	9
3.3. Difração de Raios X	9
3.4. Extração Química de etapa única.....	10
3.5. Tratamento de dados - Fator de Enriquecimento e IAQ.....	10
To be submitted to Ore Geology Reviews.....	12
1. Introduction.....	13
2. Geologic Background.....	14
3. Sampling and Analytical Methods	15
3.1. Whole rock chemical analyses	18
3.2. SEM-EDS and EPMA	18
3.3. X-ray diffraction	19
3.5. Single-step extraction	19
3.6. Enrichment Factor	20
4. Results.....	20
4.1. Identification of REE-bearing minerals and description of the rocks.....	20
4.1.1. Allanite-(Ce) and Bastinäsite Group	21
4.1.2. Apatite	23
4.1.3. Zircon.....	24



4.1.4. Fergusonite.....	25
4.1.5. Thorite	27
4.1.6. Monazite	27
4.1.7. Xenotime.....	28
4.1.8. Bastinäsite	28
4.1.9. Hingganite-(Y).....	28
4.2. Chemical compositions of granite, soil and clay fractions	29
4.3. Single-Step Extraction Analysis	36
4.4. X-ray diffraction and Chemical Index of Alteration	36
4.7 Enrichment Factor	37
5. Discussions.....	40
5.1. REE fractionation during magmatic differentiation and hydrothermal alteration	40
5.2. REE enrichment during granite weathering	44
5.3. REE behavior during weathering	40
5.4. Ce anomaly	42
6. Conclusion.....	47
6. Discussões e Conclusões	48
8. Referências Bibliográficas.....	49
Anexos	55

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo com ênfase na principal via de acesso a partir de Brasília, além das principais cidades perto.....	3
Figura 2. Mapa das principais unidades morfológicas da região do estudo. Fonte: Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas do Estado de Goiás – Superintendência de Geologia e Mineração.	3
Figura 3. Mapa geológico da região nordeste do Estado de Goiás com os granitos do tipo A e seus principais recursos, com ênfase no Granito Mocambo.	7
Figure 1. Geological sketch map of the northern part of the Goiás Tin Province (GTP) with the A-type tin granites and their associated mineral resources distributed in the Tocantins Subprovince in the west and the Paranã Subprovince in the east, where the Mocambo Massif is situated.	15
Figure 2. Mocambo Massif satellite image with the sampling locations . Points MO-06 and MO-08 are from sampling works of Botelho (1992).	16



Figure 3. Soil 2 profile showing where each sample was collected. Soil 2A = CVMO-08A; Soil 2B ₁ = CVMO-08B; Soil 2B ₂ = CVMO-08C and Soil 2C = CVMO-08D.	17
Figure 4. Optical and backscattered electron images of allanite and minerals from the bastinäsite group present in the studied rocks. Aln = allanite; Bst Gr = bastinäsite group.	21
Figure 5. Chemical variation of analyzed REE fluorcarbonates compared to the ideal composition of minerals of the bastinäsite group.	21
Figure 6. Backscattered electron images of apatite with monazite grains on its edges, present in the studied rocks. Ap t= apatite; Mnz = monazite.	23
Figure 7. Chemical variation of analyzed REE-bearing phosphates and silicates compared to the ideal composition of apatite, monazite-(Ce), britholite-(Ce) and britholite-(Y).	23
Figure 8. REEO ₃ and Y ₂ O ₃ contents in the apatite from the Mocambo Massif.	24
Figure 9. Optical and backscattered electron images of zircon present in the studied rocks. Zrc = zircon.	24
Figure 10. Backscattered image showing the contact relationship between zircon and thorite grains.	25
Figure 11. HREE ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ and P ₂ O ₅ contents in the analyzed zircons from the Mocambo Massif.	25
Figure 12. Optical and backscattered electron images of fergusonite present in the studied rocks. Fgt= fergusonite.	27
Figure 13. Chemical variation of analyzed REE niobate compared to the ideal composition of fergusonite-(Ce), fergusonite-(Y) and fergusonite-(Nd). A) Nb ₂ O ₅ - Y ₂ O ₃ - Ce ₂ O ₃ ; B) Y ₂ O ₃ - Nd ₂ O ₃ - Ce ₂ O ₃	27
Figure 14. Optical and backscattered electron images of xenotime, bastinäsite and thorite present in the studied rocks. Xnt = xenotime; Bst = bastinäsite; Thr = thorite.	28
Figure 15. Optical and backscattered electron images of hingganite and fluorite, present in the studied rocks. Flt = fluorite; Hgn = hingganite.	29
Figure 16. Rb vs (Y + Nb) discrimination diagram after Pearce (1996). VAG, volcanic-arc granite; ORG, ocean ridge granite; WPG, within-plate granite; syn-COLG, syn-collisional granite.	30
Figure 17. A/CNK vs A/NK plot for the Mocambo biotite granite.	30
Figure 18. Chondrite-normalized REE pattern for the regular Mocambo biotite granite (CVMO-25C) and related greisen (MO-06).	31
Figure 19. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 3A2.	31
Figure 20. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 4A1.	32
Figure 21. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 4A2.	32



Figure 22. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 3A1.....	33
Figure 23. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 1B.....	33
Figure 24. X ray difratogram of soil 2B1. Total = bulk sample; n = clay fraction; g = glicolated and aq = heated.	38
Figure 25. Schematic section in the Mocambo Massif showing its topography, approximate soil thickness and location of soil samples.	41
Figure 26. Chondrite-normalized REE diagrams where: BS = Bulk Sample; CF = Clay Fraction, SSE = REE _{exch} from soil and AAD = REE _{exch} from clay.	46

Índice de Tabelas

Table 1. Relation between the sampling points in the figure 2 and the groups of soils with their estimated horizons.	18
Table 2. EPMA analyses of REE-bearing minerals - Aln= allanite; Pst= parisite; Syn= synchysite; Bst= bastinäsite; Rtg= rontgenite; Apt= apatite; Mnz= monazite.	22
Table 3. EPMA analyses of REE-bearing minerals - Zrc= zircon; fgt= fergusonite; tht= thorite; Xnt= xenotime; Hgn= hingganite.	26
Table 4. Whole rock and soil analyses. BS = Bulk Soil; CF = Clay Fraction.	34
Table 5. Single Step Extraction analyses. SSE = extraction from Bulk Soil; AAD = extraction from Clay Fraction.	36
Table 6. Semi-quantitative analyses of X ray difratograms, where BS = bulke sample; CF = clay fraction.	39
Table 7. Enrichment Factor of soil samples normalized by CVMO-25C (rock sample). Ti was used as element normalizer.	39
Table 8. Enrichment Factor of soil samples normalized by CVMO-10R (rock sample). Ti was used as element normalizer.	43



1. Introdução

Os elementos terras raras constituem a série dos lantanídeos na tabela periódica. São divididos em elementos terras raras leves (ETRL) – La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu e Gd – e elementos terras raras pesados (ETRP) – Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu. Os elementos escândio (Sc) e ítrio (Y) apresentam características semelhantes aos ETRP, por isso diversas vezes são encaixados neste grupo.

A atenção mundial para os ETR está cada vez maior nos dias atuais. A principal razão é a baixa disponibilidade destes elementos, principalmente após o anúncio da China, maior produtora com cerca de 95% da oferta mundial, de algumas restrições ao comércio de ETR, principalmente por causa da queda de preços devido a uma momentânea oferta excessiva (USGS, 2016). A China é a principal produtora de ETRP e estes são os mais escassos. Hoje em dia existem inúmeras aplicações destes elementos, como catalisadores, ímãs permanentes, polidores, ligas metálicas, além de cerâmicas, fosforecentes e corantes, todos estes pertencentes à indústria de alta tecnologia. Dada sua importância econômica e raridade, alguns países dependentes e não produtores iniciaram a prospecção destes elementos, caso dos EUA, Canadá, Austrália e até do Brasil.

Os recursos mundiais de ETR encontram-se principalmente nos minerais bastnaesita e monazita, além de depósitos do tipo adsorção iônica em argilas (USGS, 2013). A maior porcentagem dos recursos advém de depósitos de bastnaesita em rochas alcalinas e carbonatitos na China e Estados Unidos, enquanto depósitos de monazita na Austrália, Brasil, China, Índia, Malásia, África do Sul, Sri Lanka, Tailândia e Estados Unidos representam a segunda maior porcentagem (Foley *et al.*, 2013). Os depósitos do tipo adsorção iônica em argilas localizados no sul da China são responsáveis pela maior parte do restante dos recursos globais de ETR (Bao e Zhao, 2007). Atualmente estes depósitos são os principais recursos para ETRP. Dentre os principais depósitos mundiais de ETR estão Bayan Obo Fe-ETR-Nb na China, Mountain Pass nos Estados Unidos, Mianning na China, Mount Weld na Austrália, além do depósito no Complexo Carbonatítico Khanneshin no sudeste do Afeganistão. Todos estes depósitos esperam suprir a demanda por ETRL no século 21 (USGS, 2013). Todavia, a demanda por ETRP não deve ser suprida pelos depósitos existentes, somando-se estes depósitos com os depósitos de adsorção iônica do sul da China. Assim justifica-se a necessidade e procura por novos depósitos de ETR.

Com a procura por novos depósito de ETRP, a necessidade de maior clareza quanto à natureza dos depósitos de adsorção iônica em argilas é enorme. Estes depósitos tem sido objeto de muitos estudos recentes. Trabalhos como Bao e Zhao (2008), Sanematsu *et al.*, (2009 e 2013) e Sanematsu e Kon (2013) buscam compreender melhor como estes depósitos



são formados. O comportamento geoquímico dos ETR, com o fracionamento entre os ETRL e ETRP ainda não é totalmente compreendido. Quais as condições de pH favorecem o transporte e lixiviação destes elementos em um perfil de solo? Quais as condições de clima mais favoráveis para este transporte e lixiviação? ETRP são melhor adsorvidos nos argilominerais ou o enriquecimento ocorre apenas porque estes elementos não são lixiviados do solo e acabam se acumulando? O presente trabalho procura estudar um granito com enriquecimento primário em ETR e seus perfis de solo *in situ*, visando melhor compreender o comportamento destes elementos durante o intemperismo. Também pretende-se avaliar o potencial deste maciço para conter um depósito do tipo adsorção iônica.

O presente estudo foi realizado no Maciço Granítico Mocambo, um granito do tipo-A localizado na região noroeste do Estado de Goiás, próximo à cidade de Monte Alegre de Goiás. Trata-se de um maciço conhecido por apresentar elevados teores de ETR, em razão dos minerais acessórios allanita, monazita e fergusonita-(Y). Além destes, também são encontradas xenotima e bastnaesita, formadas por greisenização no interior do maciço. O Maciço Mocambo faz parte da Província Estanífera de Goiás, definida por Marini e Botelho (1986), e foi alvo de estudos sobre terras raras realizados por Marini *et al.* (1992) e Teixeira e Botelho (1999, 2002 e 2006).

Este trabalho teve como objetivo estudar as principais ocorrências de ETR no maciço: no biotita granito normal e greisenizado, nas zonas saprolitizadas, nos minerais resistatos encontrados em drenagens ou solo, e nos perfis de solo, onde há a possibilidade de adsorção em argilominerais. Diversos procedimentos e análises foram feitos nestas ocorrências. O agrupamento de todos os dados permitiu uma avaliação prévia do Maciço Mocombo para um possível prospecto de ETRY.

2. Localização e Aspectos Fisiográficos

A região do estudo localiza-se no norte do Estado de Goiás, a cerca de 20 quilômetros da cidade de Monte Alegre de Goiás. A melhor maneira de chegar ao local, saindo de Brasília, é pela GO-118, passando pelas cidades de São João da Aliança, Alto Paraíso e Teresina de Goiás (Figura 1).

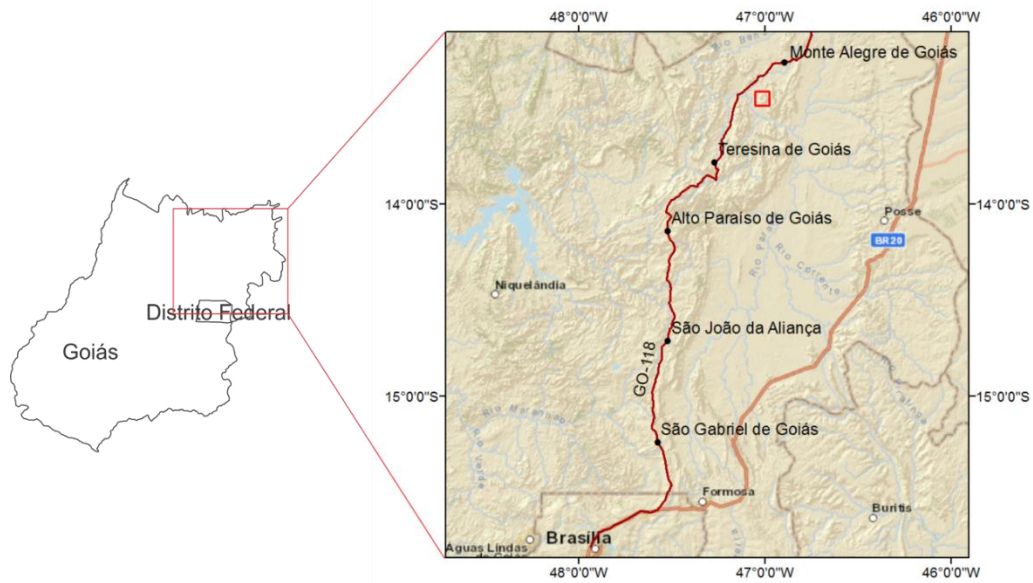


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo com ênfase na principal via de acesso a partir de Brasília, além das principais cidades da região.

2.1 Geomorfologia

O local é caracterizado regionalmente por superfícies de aplainamento com dissecação fraca (400-500 m) e, em meio a estas, formas de relevo de morro e colinas (900 m) (Figura 2). Estas formas resultam de erosão diferencial, pois suas rochas (maciços graníticos) possuem alta resistência durante processos de erosão/denudação e sobressaem-se ao relevo adjacente, o que ocorre na área estudada.

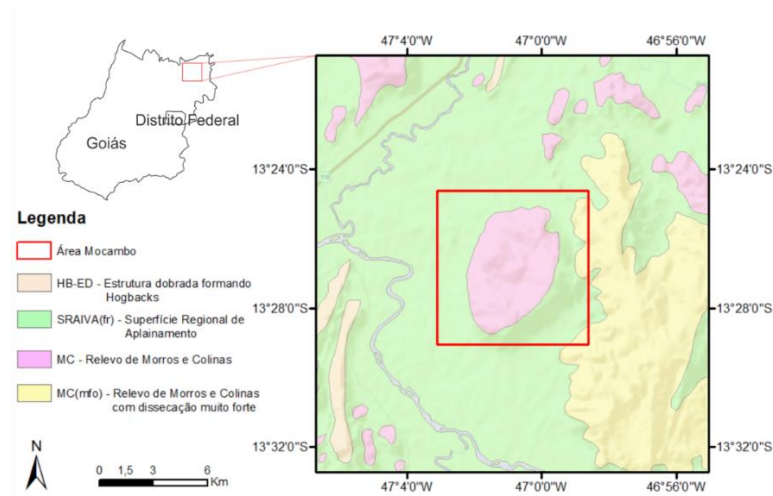


Figura 2. Mapa das principais unidades morfológicas da região do estudo. Fonte: Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas do Estado de Goiás – Superintendência de Geologia e Mineração.



2.2. Clima e Vegetação

O clima da região é classificado como tropical quente (Aw), a partir da classificação de Köppen. Este apresenta duas estações bem definidas: verão quente e chuvoso entre os meses de outubro e abril e invernos secos de maio a setembro.

A vegetação típica da região é cerrado *stricto sensu* com árvores de pequeno a médio porte com troncos retorcidos e casca grossa. Próximo a drenagens observa-se mata ciliar, além de vegetação arbustiva em meio ao cerrado.

2.3. Solos

A formação de solos depende de cinco principais fatores: clima, atividade biológica, relevo (geomorfologia), rocha matriz e tempo. Portanto, predominam no maciço neossolos litólicos e, localmente, cambissolos háplicos. O neossolo litólico ocorre principalmente nas encostas dos morros e nas áreas mais inclinadas. É caracterizado por ser um solo raso e pouco desenvolvido, com presença de material mineral/regolítico abaixo do horizonte A e ausência de horizonte B. O cambissolo é um solo raso com horizonte B incipiente, um pouco mais desenvolvido do que o neossolo. Pode ser encontrado em regiões de platô nas partes mais elevadas do maciço.

3. Geologia Regional

A região centro-norte do Estado de Goiás está inserida na Província Tocantins, um orógeno na parte central do Brasil com origem no Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico) durante a formação do supercontinente Gondwana. A Faixa Brasília encontra-se na parte norte desta província e é uma das faixas de dobramentos formada durante a origem desta província. Toda a região centro-norte do estado é alvo de diversos trabalhos em razão da sua alta complexidade, além do potencial econômico para Au, ETR, Sn, Zn, Ni, Cu, amianto, rochas ornamentais e gemas.

O granito Mocambo pertence à Suíte Pedra Branca e é intrusivo na Formação Ticunzal e Suíte Aurumina (Figura 3). Esta suíte faz parte da “Província Estanífera de Goiás” descrita a



seguir. De acordo com Alvarenga *et al.* (2007), a Formação Ticunzal é formada por xistos e paragneisses grafitosos, além de quartzitos micáceos e eventualmente conglomerados. A idade desta formação ainda não está muito bem definida, mas sabe-se que é mais velha do que 2,15 Ga, idade das intrusões mais antigas da Suíte Aurumina. Esta última foi definida por Botelho *et al.* (1999) e é constituída por granitos peraluminosos, sin até pós-tectônicos e derivados de fusão crustal. A suíte é subdividida em seis fácies: muscovita granito (PP2γ2au1), biotita-muscovita granito (PP2γ2au2), tonalito (PP2γ2au3), biotita granito (PP2γ2au4), migmatitos e turmalina-muscovita granito.

3.1. Província Estanífera de Goiás

A Província Estanífera de Goiás (PEG) é constituída, em grande parte, por granitos tipo A mineralizados em Sn (Marini e Botelho, 1986). São cerca de 20 corpos graníticos e veios pegmatíticos, com idade paleoproterozoica a neoproterozoica, divididos em subprovíncias a partir de sua localização. Na região norte do Estado encontram-se as subprovíncias Rio Tocantins (RTS) e Rio Paranã (RPS). A Suíte Pedra Branca pertence à RPS. Os granitos de ambas subprovíncias apresentam alterações tardi/pós-magmáticas como micronilização, albitização e greisenização, além de altos teores de álcalis, Sn, Y, Nb, Th, Rb, Nb e ETR, que os definem como granitos tipo A.

3.2. Suíte Pedra Branca

A Suíte Pedra Branca (SPB) é composta pelos granitos tipo A da Subprovíncia Rio Paranã (SRP), representantes plutônicos do vulcanismo associado ao Grupo Araí, uma unidade vulcanossedimentar relacionada ao desenvolvimento de um *rift* continental. Esta suíte é composta por intrusões graníticas que formam altos topográficos com formato circular ou elíptico, apresenta idade paleoproterozoica e seus granitos são classificados como pertencentes à Série da Ilmenita. Os granitos da SPB são subdivididos em duas séries distintas: Pb1 (1,77 Ga em U/Pb em zircão; Pimentel *et al.*, 1991) e Pb2 (1,74 Ga em monazita; Teixeira 2002). De acordo com Teixeira e Botelho (1999), os granitos Pb1 apresentam tendência alcalina a subalcalina, altos teores de Zr, Y e ETR, além de incompatibilidade de Nb e Th durante a evolução magmática. Em uma ordem crescente de evolução observa-se as fácies Pb1a – monzogranito com quartzo, feldspato potássico, albita e biotita como minerais principais e ilmenita, apatita, zircão e allanita como acessórios; Pb1b – granito rosa porfirítico composto por quartzo, microclínio, plagioclásio e biotita como principais e zircão, allanita e apatita como



acessórios; e Pb1c – granito rosado constituído por quartzo, microclínio, albita e biotita, além de ilmenita, monazita e torita como acessórios (Teixeira e Botelho, 2006). Já os granitos Pb2 têm caráter metaluminoso a peraluminoso, maior conteúdo de SiO_2 , Al_2O_3 , Li, Ta e Sr em relação a Pb1, além de menor razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ e K/Na. Sua evolução apresenta as fácies Pb2b, Pb2c e Pb2d.

3.3. Granito Mocambo

O granito Mocambo, pertencente à Suíte Pedra Branca, é formado pela série Pb1 quase que em sua totalidade, mais especificamente pelo granito Pb1b. Este é rosado, megaporfírico com fenocristais de feldspato potássico e apresenta biotita, apatita e allanita como principais minerais acessórios. Localmente observam-se veios mais evoluídos, da série Pb1c ou até Pb2, com granulação mais fina e presença de fluorita. No maciço também observa-se localmente a presença de greisenização, que gerou uma rocha composta por quartzo, mica, fluorita, biotita, xenotima e zircão, além de outros acessórios como torita, bastnaesita e monazita.

Os ETR ocorrem nas rochas do maciço em diversas formas. A mais comum destas é no biotita granito predominante, no qual observa-se a presença dos minerais acessórios allanita, concentrador de ETRL, além de apatita e zircão, concentradores de ETRP. Também são observados os minerais hidrotermais, cristalizados a partir da formação de um greisen no maciço, xenotima, bastnaesita e um silicato de Y, todos descritos por Teixeira 2002. Estes minerais corroboram com a concentração anômala de ETR assinalada por Marini et al. (1992). Outra forma de ocorrência de ETR está na rocha saprolitizada. Minerais como a xenotima e o zircão comportam-se como resistatos quando a rocha sofre intemperismo e formam-se argilominerais como caolinita e illita. O aumento da alteração desta rocha, sob influência de agente intempéricos físicos e químicos, leva à formação de solo e o transporte de uma parcela destes minerais resistatos para drenagens. Por último, com a pedogênese, os minerais portadores de ETR são alterados, liberando os ETR na forma de cátions e estes são adsorvidos nas superfícies de argilominerais presentes no solo.

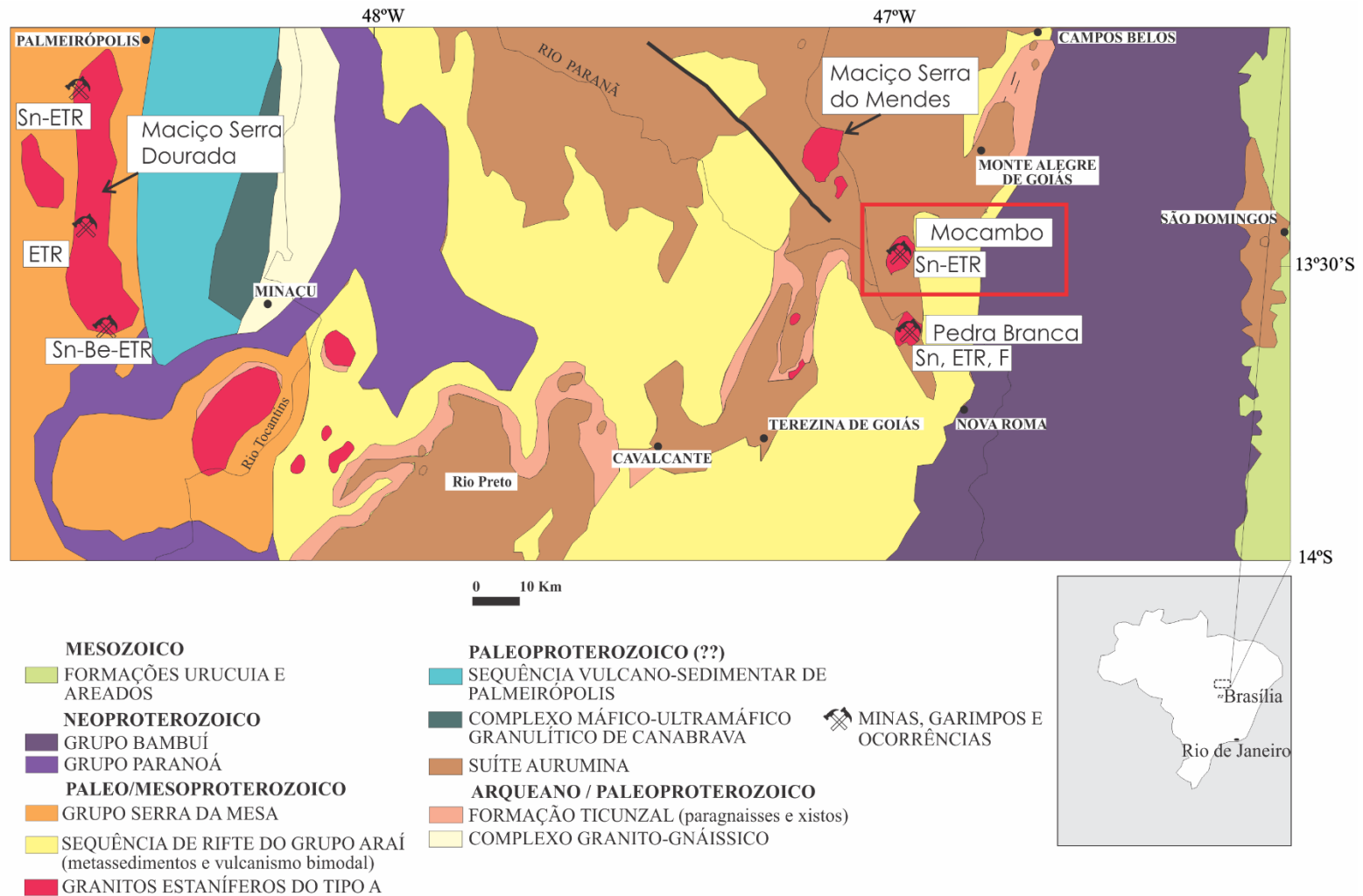


Figura 3. Mapa geológico da região nordeste do Estado de Goiás com os granitos do tipo A e seus principais recursos, com ênfase no Granito Mocambo.



3. Materiais e Métodos

Material do maciço utilizado previamente para a realização da Tese de Doutorado de Teixeira (2002) foi aproveitado para este trabalho: 19 lâminas delgadas de rocha, análises químicas de rocha total e análises químicas de microsonda eletrônica. Além disso, três saídas de campo foram feitas, dezembro de 2014, maio de 2015 e setembro de 2015, com o intuito de caracterização geológica, amostragem de rochas, solos e concentrados de aluviões, estes últimos coletados em drenagens. As amostras foram secadas em estufa a 50° C ou ao ar livre.

Novas lâminas delgadas foram confeccionadas a partir das amostras de rochas coletadas, 15 no total. 5 amostras de solo foram peneiradas para obtenção da fração <60µm, visando concentrar as argilas presentes nelas. Uma fração de cada amostra de rocha, juntamente com as amostras de solo e argila, foram pulverizadas em panela de ágata e enviadas para análise de rocha total no laboratório ACME Laboratórios LTDA. As análises foram feitas com 5 gramas de cada amostra por fusão de borato de lítio e 0,5 gramas lixiviados em Água Régia quente e modificada, ambos em ICP-MS.

Já os concentrados de aluvião foram peneirados e, em seguida, bateados para a concentração de minerais pesados. Após isto utilizou-se a lupa para separar minerais de interesse e, por fim, montou-se estes minerais em seções com resina epóxi. Estas seções foram polidas em disco rotativo com pasta diamantada e cobertas com película de carbono para análise em microsonda eletrônica.

3.1. Aerogeofísica

A amostragem, principalmente de solos, ocorreu em regiões com altos teores de Th e alta razão Th/K observados em mapas produzidos no Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília. Para isto, utilizou-se dados do projeto “Paleo-Neoproterozoico do Nordeste de Goiás” contratado pelo Governo do Estado de Goiás/SIC – MME/CPRM Serviço Geológico do Brasil e adquiridos pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S.A. no ano de 2006 (identificação 3013). Na aquisição dos dados, a altura de vôo foi de 100 metros, intervalo de amostragem de 1 segundo, direção das linhas de vôo N-S, espaçamento entre as linhas de vôo 0,5 km e direção das linhas de controle E-W com espaçamento de 5 km entre estas.



3.2. SEM-EDS/EPMA

As análises em microsonda eletrônica foram realizadas na Universidade de Brasília, no Laboratório de Microsonda Eletrônica, utilizando-se uma JEOL JXA-8230 equipada com cinco espectrômetros WDS para análises quantitativas e um EDS para análises qualitativas. Primeiramente realizaram-se as análises SEM-EDS para identificar os minerais ricos em Y e ETR e, em seguida, foram feitas as análises quantitativas. Nestas análises dividiu-se os elementos em dois programas: um contendo os elementos F, Al, Si, P, Nb, Mn, Ti, Y, Ta, Ca, Fe e Zr e o outro Na, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, K, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Th, Sr, La, Ce, Pr, Nd, U e Ba. As condições de análise foram: 15 kV de aceleração de voltagem, 10 nA de corrente e 1 μm de diâmetro dos feixes de elétrons para o primeiro programa e 20 kV de aceleração de voltagem, 50 nA de corrente e 1 μm de diâmetro dos feixes de elétrons para o segundo programa. Os tempos de contagem para todos os elementos foi de 10 segundos no pico e 5 segundos no *background*. Para os elementos F, Al, Si, P, Mn, Ti, Fe, Na e K utilizou-se a linha $K\alpha$, para Y, Er, Tm, Yb, Lu, Eu, Gd, Tb, Sr, La, Ce, Nd e Ba a linha $L\alpha$, para Ca a linha $K\beta$ e para Nb, Zr, Ho, Sm, Dy e Pr a linha $L\beta$. Vidros silicáticos de Ca-Al sintéticos contendo cada ETR foram usados como padrões de ETR, com excessão do Ce, que foi analisado com um padrão de CeO_2 sintético. Os outros padrões utilizados para calibração foram: topázio (F), microclínio (Al, K e Si), apatita (P e Ca), LiNbO_3 (Nb), MnTiO_3 (Mn e Ti), $\text{YFe}_2\text{O}_{12}$ (Y), LiTaO_3 (Ta), andradita (FeO), baddeleita (Zr), albita (Na), venadinita (Pb), ThO_2 (Th), SrSO_4 (Sr), UO_2 (U) e BaSO_4 (Ba).

3.3. Difração de Raios X

O estudo da mineralogia das amostras coletadas por Difractometria de Raios X foi realizado no Laboratório do Instituto de Geociências (IG-UnB), por meio de análises utilizando difratômetro Rigaku, modelo Ultima IV. Foram feitas análises da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), “total”, que indica a composição mineral dos constituintes maiores que a fração argila; e da fração argila, individualizada por meio de suspensão aquosa, seguida da dispersão mecânica e centrifugação, conforme a o protocolo do Laboratório. A recuperação da fração argila ocorreu a partir do sobrenadante resultante da centrifugação em 750 rpm por 7 minutos da amostra pulverizada, após a dispersão da mesma em água destilada. Em seguida esta fração recuperada foi centrifugada a 3000 rpm por 30 minutos para decantar a fração menor do que 2 μm . Esta foi utilizada para preparar as lâminas orientadas pela técnica de esfregação e, por fim, secas ao ar. O aparelho opera com tubo de cobre com filtro de níquel em 35 kV e 15 mA, velocidade de varredura de 5°/minuto, passos de 0,05° no intervalo de $2\theta = 2^\circ$ a 80° e 2° a 40° , para as lâminas de rocha total e fração argila, respectivamente. Para a preparação utilizou-se amostra pulverizada e compactada a seco sobre lâmina de vidro A identificação dos minerais



realizou-se com o programa JADE 9.0, base WINDOWS, com banco de dados PC-PDF produzido pelo International Center for Diffraction Data-ICDD.

3.4. Extração Química de etapa única

Para quantificar os ETR trocáveis em amostras de solo realizou-se as extrações químicas seletivas e parciais por sulfato de amônia $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ sobre uma seleção de 6 amostras seguindo o protocolo de Sanematsu e Kon (2013) no Laboratório de Geoquímica da UnB. Considerando a fração fina nos processos de troca iônica, foram realizadas extrações químicas sobre o solo (TFSA) (renomeada como solo total – ST) e a fração fina do solo (<60 micrometros) (renomeada como fração argila – FA). A amostra CVMO-8B não foi peneirada na fração menor do que 60 micrometros em razão da sua pequena quantidade. Para a separação de argila da fração menor do que 60 μm misturou-se 15 gramas da mesma com 300 ml de água ultra pura, a solução foi então levada ao ultrassom por 2 minutos, em seguida utilizou-se o mesmo procedimento da difração de Raios X descrito anteriormente e por fim as amostras foram secadas em uma chapa a 70 graus celsius. Um grama de amostra (TFSA ou fina) foi pesada e 40 ml de uma solução de 0,5 M (6,6 wt%) sulfato de amônia $[(\text{NH}_4)\text{SO}_4]$ com pH = ~5,7 foi adicionado em um tubo de centrifuga de 50 ml limpo por ácido. Estes tubos foram agitados mecanicamente por 24 horas a 20° C, após isso separou-se o sólido da solução centrifugando por 15 minutos a 4500 rpm. A solução sobrenadante foi filtrada com um filtro de membrana do tipo celulose acetato ($\varphi=0,22 \mu\text{m}$, Miliporo pré lavado com água ultrapura) e acidificada usando HNO_3 ultrapuro (Ácido destilado Merck Selectipur). As concentrações de ETR destas soluções foram analisadas por ICP-MS no laboratório ACME LTDA. As amostras foram diluídas cerca de 70 vezes a amostra total para atender ao requisito do laboratório de menos de 0,1% de sólidos dissolvidos em cada solução. As amostras CVMO-12, CVMO-13 e CVMO-15 foram analisadas juntas como os brancos dos diferentes procedimentos laboratoriais. Estas amostras consistem, respectivamente, na solução de sulfato de amônia utilizada para extrações químicas, soluções sobrenadantes utilizadas durante separação da fração argila, respectivamente, das amostras CVMO-10 e CVMO-09 com utilização do ultrassom. Todos os ETR dessas soluções apresentaram valores <0,04 ppm. Isso demonstra que: i) a solução de extração utilizada para análise do conteúdo adsorvido e a água Milli-Q não apresentam riscos de contaminação em ETR; ii) não ocorreu extrações de uma parte dos ETR das amostras de solo durante as separações da fração argila.

3.5. Tratamento de dados - Fator de Enriquecimento e IAQ



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências
Dissertação de Mestrado – Ciro Costa Vieira

Calculou-se o fator de enriquecimento para dois perfis de solo (amostras CVMO-25 e CVMO-08), no intuito de analisar o enriquecimento ou empobrecimento dos elementos. Para tal utilizou-se a rocha CVMO-25C como *background*, tendo em vista a proximidade destes dois perfis (cerca de 400 metros) e a fórmula $[(X_1/Y_1)/(X_{Ti}/Y_{Ti})]$, onde X é a amostra de solo, Y é a rocha CVMO-25C e 1 representa o elemento analisado. O titânio foi utilizado como elemento normalizador sendo considerado como imóvel durante processos de pedogênese.

O Índice de Alteração Químico (IAQ ou CIA) proposto por Nesbitt e Young (1982) pode ser um bom marcador para pedogênese e assim o enriquecimento dos ETR e argilominerais associado. O IAQ é a relação de $= [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)] \times 100$, em que o CaO é em silicatos. Este índice foi calculado para as amostras de solo e de argila.



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências
Dissertação de Mestrado – Ciro Costa Vieira

To be submitted to Ore Geology Reviews

Geochemical and mineralogical characteristics of REEs occurrences in the Mocambo tin-bearing A-type granite, central Brazil, and its potential for ion-adsorption type REEs mineralization.

Ciro Costa Vieira¹, Nilson Francisquini Botelho ¹ & Jérémie Garnier¹

¹ Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 70910-900, Brazil



1. Introduction

Currently, the world is experiencing a shortage of rare earth elements (REEs) due to their increasing demand, making them “critical” and turning the world’s attention to these elements. The international interest in finding new targets for extraction can be explained by these elements high prices and their increasing usage in high-technology devices and cutting-edge industries, some of which are associated with the concept of green energy. Some examples of the application of REEs are catalysts, wind turbines, electric cars, superconductors, tablets, smartphones and high-performance magnets. REEs comprise the lanthanide elements from La to Lu, which are divided, according to electronic structure, into light REEs (LREEs; La-Gd), which have no paired 4f electrons, and heavy REEs (HREEs; Tb-Lu), which have paired 4f electrons (Hatch, 2012 and reehandbook.com). However, in this article Gd was considered as HREEs according to Bao and Zhao (2008) and Sanematsu *et al.* (2009 and 2013). The similar ionic radius and chemical properties of yttrium, despite not having paired 4f electrons, make it generally included in HREEs. These elements were initially considered to be immobile, but, since the late 1960s, some studies have shown that the REEs are mobilized and fractionated by chemical weathering (Balashov *et al.*, 1964; Martin *et al.*, 1976; Goldstein and Jacobson, 1988; Sholkovitz, 1992 and 1995). According to Fritz (1988) and Price *et al.* (1991), the geochemical behavior of REEs during weathering is not easily generalized because of the variability among (i) REE-bearing minerals (especially accessory minerals) and their accessibility to fluids in parent rocks or weathered materials, and (ii) the specific physicochemical and biological factors of each location that influence rock weathering. REEs mobility has been studied in weathering profiles under warm and humid to cold and semiarid conditions (Floss and Crozaz, 1991; Boulangé and Colin, 1994; Braun *et al.*, 1998; Patino *et al.*, 1998; Sharma and Rajamani, 2000) and their relative accumulation in weathering profiles at much greater concentrations than in the parent rocks has been described by several authors (Nesbitt, 1979; Duddy, 1980; Topp *et al.*, 1984; Middelburg *et al.*, 1988; Nesbitt and Markovics, 1977).

Ion adsorption is considered the major cause of REEs enrichment during the weathering process. It forms REE-enriched laterite-ores, which are the main type of REEs deposit. This deposit type is formed by the chemical weathering of rocks and subsequent adsorption of REEs on the surfaces of clay minerals (Yang *et al.*, 1981; Ishihara and Sato, 1982; Huang *et al.*, 1989; Wu *et al.*, 1990; Murakami and Ishihara, 2008; Sanematsu *et al.*, 2009). This process usually occurs after the hydrolysis of REE-bearing minerals under warm and humid conditions. Granites, especially A-type granites, are the most common rocks that form ion-adsorption type REEs deposits. According to Bao and Zhao (2008), the main ion-adsorption ores are located in China, and contain significant HREEY resources. They occur in south-lying areas where the climate is sub-tropical, with annual precipitation over than 1500 mm associated with warm



conditions. The topography of the region is mostly composed of low hills, making denudation rates low and leading to preservation of weathering profiles, which range on average from 15 to 35 m. These profiles are zoned and the subsurface horizons are similar in all deposits, where horizons of commercial size containing more than 500 ppm of ion-exchangeable REEY are considered to be ore.

Previous studies, including Marini *et al.* (1992), Botelho (1992), Teixeira and Botelho (1999, 2002 and 2006) have drawn attention to the REEY enrichment in the Mocambo granite massif because of the high concentrations (500 to 2100 ppm of REEY) in the parent granite and the occurrence of the accessory minerals apatite and zircon with anomalous REEY contents. Furthermore, the Mocambo Massif is part of a group of REEY-bearing granites in central Brazil, where recent discoveries have led to the characterization of an ion-adsorption REE deposit in the Serra Dourada Massif (Figure 1; Rocha *et al.*, 2013 and Santana *et al.*, 2015) This group of granites were also compared to the Pitinga granites in the Amazon region which are known for their enrichment in REEY (Lenharo *et al.*, 2000). The present work intends to characterize both magmatic and hydrothermal REEs occurrences and the total ion-exchangeable REEs content in weathered granite and soils, with the aim of evaluating the potential of the Mocambo massif to hold an ion-adsorption type REEs deposit.

2. Geologic Background

The study area is located in the northwestern part of Goiás State, in the basement of the Brasiliano/Pan-African Brasília Fold Belt (Pimentel *et al.*, 1999). This region is the object of many studies because of its high complexity and economic potential for Au, REEs, Sn, In, gems and ornamental stones (Botelho and Moura, 1998; Santana *et al.*, 2014).

The Mocambo Massif is located in the northwestern part of Goiás State near the city of Monte Alegre de Goiás and is one of about twenty granitic bodies that constitute the “Goiás Tin Province (GTP)” as defined by Marini and Botelho (1986). This province is subdivided into four groups according to their localities. The Rio Tocantins (RTS) and Rio Paranã (RPS) subprovinces are the most studied and are located in northern Goiás State. According to Marini and Botelho (1986), granites of these subprovinces exhibit petrographic, geochemical and tectonic signatures that allow them to be classified as A-type granite and are related to a bimodal magmatism coeval to the development of the Araí rift basin. The Mocambo Massif belongs to the RPS and is part of the Pedra Branca Suite, which is subdivided into two series: Pb1, which includes the Mocambo granites (1.77 Ga with U/Pb in zircon; Pimentel *et al.*, 1991) and Pb2 (1.74 Ga in monazite; Teixeira 2002). Teixeira and Botelho (1999) showed that the



Pb1 series presents alkaline to sub-alkaline tendencies, as well as high contents of F, Zr, Nb, Th, Y and REEs. Listed in order of increasing evolution, the series are Pb1a, Pb1b and Pb1c. According to several authors (Botelho, 1992; Teixeira and Botelho, 2002; Lenharo *et al.*, 2004), the LREEs were compatible and the HREEs were incompatible at the beginning of this evolution. The Mocambo granite is composed primarily of facies Pb1b, a pink porphyritic granite with quartz, microcline, plagioclase and biotite as major minerals and zircon, allanite, monazite and apatite as accessory phases. Greisenization is observed locally, which generated a rock made up of quartz, mica, fluorite, biotite, cassiterite, xenotime, zircon, torite, bastinäsite and monazite.

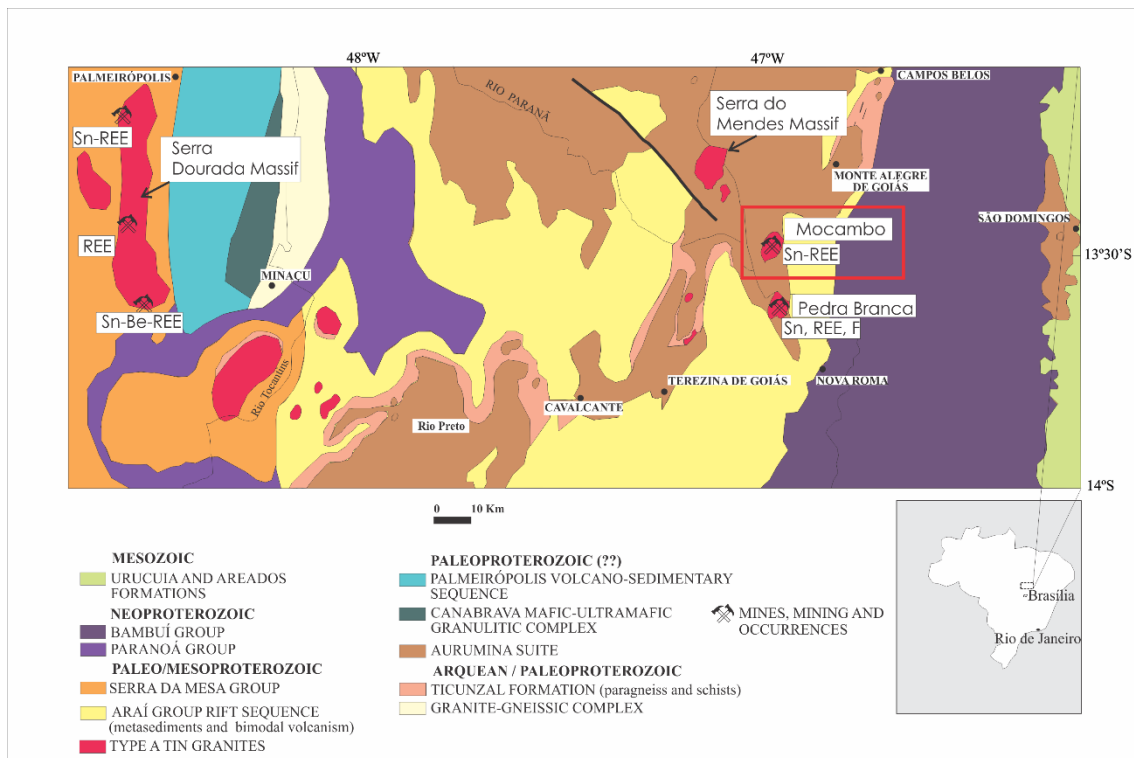


Figure 1. Geological sketch map of the northern part of the Goiás Tin Province (GTP) with the A-type tin granites and their associated mineral resources distributed in the Tocantins Subprovince in the west and the Parana Subprovince in the east, where the Mocambo Massif is situated.

3. Sampling and Analytical Methods

The sampling strategy was developed based on the analysis of existing geological maps of the Brazilian Geological Survey (Alvarenga *et al.*, 2007) and topographic conditions (Figure 2). Geological reconnaissance and sampling were performed in two stages, during dry and rainy seasons, to sample rocks, saprolites, soil profiles and alluvial concentrates. 36 polished thin sections of the parent granite and saprolites were used for petrographic



descriptions. The alluvial concentrates were sifted and then panned to concentrate the heavy minerals. Subsequently, a Frantz magnetic separator and a stereomicroscope were used for mineral separation, and these minerals were finally mounted in sections with epoxy resin for polishing. Soil samples were dried in an oven at 50 °C or in the open air. Five soil samples were sifted to obtain the <60µm fraction, with a view towards concentrating the clay minerals. Bulk soil samples were designated BS and clay fractions CF.

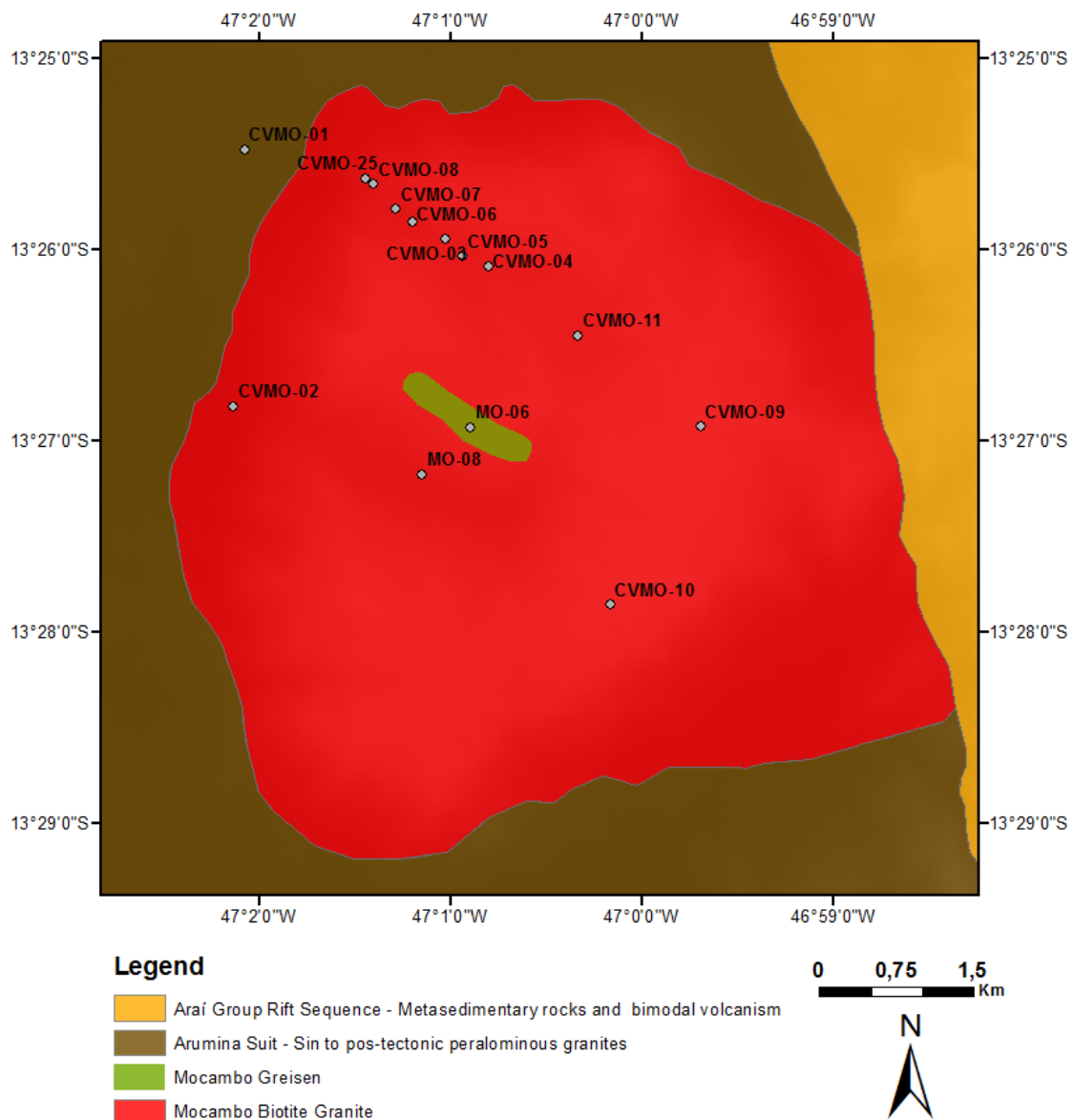


Figure 2. Mocambo Massif satellite image with the sampling locations . Points MO-06 and MO-08 are from sampling works of Botelho (1992).



Soil samples were divided into 4 (four) groups (Table 1): soil 1, consisting of samples CVMO-25D and E, has sandy texture with clay. It is approximately 3 meters thick, with shallow A horizon and incipient B horizon; soil 2, consisting of samples CVMO-08A, B, C and D, presents sandy texture with more clay than soil 1. It has approximately 8 meters of thickness, with shallow A horizon, incipient B horizon and thick A horizon (Figure 3); soil 3, consisting of samples CVMO-03, CVMO-04, CVMO-05 and CVMO-11, has sandy to clay texture. It has approximately 2 meters of thickness and does not have destemming horizons; and soil 4, consisting of samples CVMO-09 and CVMO-10S, with sandy texture with gravel. It is approximately 2 meters thick. Soils 1 and 2 represent two soil profiles, approximately 300 meters distant from each other, located in a road section (Figure 3). Soil 3 consists of soils collected near to stream ravines, and soil 4 consists of shallow soils located on the top of the massif.

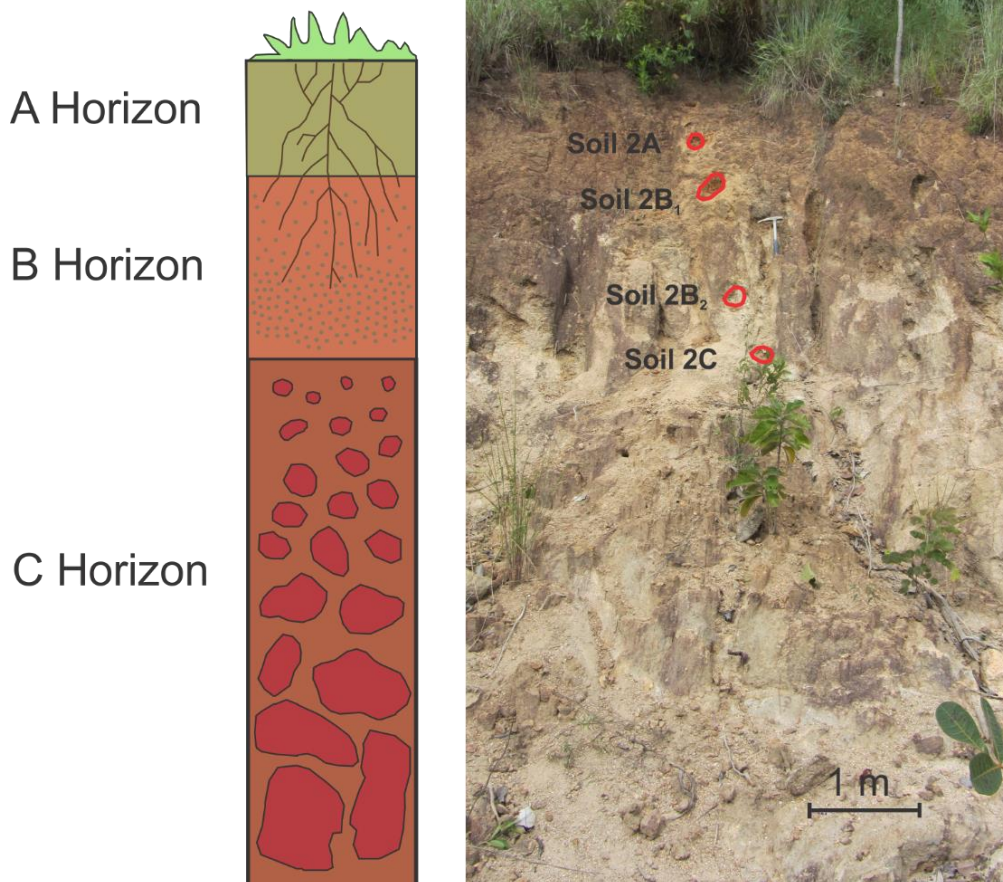


Figure 3. Soil 2 profile showing where each sample was collected. Soil 2A = CVMO-08A; Soil 2B₁ = CVMO-08B; Soil 2B₂ = CVMO-08C and Soil 2C = CVMO-08D.



Table 1. Relation between the sampling points in the figure 2 and the groups of soils with their estimated horizons.

Soil 1	CVMO – 25E	Soil 1B	Depth: 10-20 cm
	CVMO – 25D	Soil 1C	Depth: 70-80 cm
Soil 2	CVMO – 08A	Soil 2A	Depth: 50-60 cm
	CVMO – 08B	Soil 2B1	Depth: 100-110 cm
	CVMO – 08C	Soil 2B2	Depth: 150-160 cm
	CVMO – 08D	Soil 2C	Depth: 200-210 cm
Soil 3	CVMO – 11	Soil 3A1	Stream Ravine
	CVMO – 05	Soil 3A2	Stream Ravine
Soil 4	CVMO – 09	Soil 4A1	Depth: 30-40 cm
	CVMO – 10S	Soil 4A2	Depth: 10-20 cm

3.1. Whole rock chemical analyses

The parental granite and saprolite were crushed by a jaw crusher and were ground by a vibration mill with agate grinding set. Whole-rock analyses for major and minor elements were carried out at ACME laboratories in Canada following LF-202 routine, involving ICP-AES and ICP-MS analysis of major and minor elements after lithium metaborate/tetraborate fusion and dilute HNO₃ digestion for precious and base metals.

3.2. SEM-EDS and EPMA

Electron probe microanalysis (EPMA) were carried out at the EPMA Laboratory of the University of Brasilia (UnB) with a JEOL JXA-8230 equipped with five WDS spectrometers for quantitative analysis and one EDS for qualitative analysis. Initially SEM-EDS analyses were performed to identify minerals enriched in REEYs. The following WDS analyses were carried out using two different analysis programs: one containing F, Al, Si, P, Nb, Mn, Ti, Y, Ta, Ca, Fe and Zr, and other containing Na, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, K, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Th, Sr, La, Ce, Pr, Nd, U and Ba. The analysis conditions were: accelerating voltage of 15 kV, beam current of 10 nA and beam diameter of 1 µm for the first program and accelerating voltage of 20 kV, beam current of 50 nA and also beam diameter of 1 µm for the second program. The counting times for all the elements were 10 seconds at the peak and 5 seconds at the background. For the elements F, Al, Si, P, Mn, Ti, Fe, Na and K the K α line were used, for Y, Er, Tm, Yb, Lu, Eu, Gd, Tb, Sr, La, Ce, Nd and Ba the L α line, for Ca the K β and for Nb, Zr, Ho, Sm, Dy and Pr the L β line. Synthetic Ca-Al silicate glasses containing each REEs were used for REEs standards,



except for Ce, which was analysed with a synthetic CeO_2 standard. The other standards used for calibration were: topaz (F), microcline (Al, K, Si), apatite (P, Ca), LiNbO_3 (Nb), MnTiO_3 (Mn, Ti), $\text{YFe}_2\text{O}_{12}$ (Y), LiTaO_3 (Ta), andradite (FeO), baddeleyite (Zr), albite (Na), vanadinite (Pb), ThO_2 (Th), SrSO_4 (Sr), UO_2 (U) e BaSO_4 (Ba).

3.3. X-ray diffraction

The X-ray diffraction was made at the X-ray Diffraction Laboratory of the University of Brasília using the equipment RIGAKU ULTIMA IV. It operates with copper tubes with nickel filters at 35 kV of voltage, 15 mA of current, scan speed of $5^\circ/\text{minute}$, steps of $0,05^\circ$ on the interval of $2\theta = 2^\circ$ to 80° and 2° to 40° , for the sections of whole rock and clay fraction, respectively. The preparation was made with the sample sprayed and compressed on glass section. The clay fraction was recovered from the supernatant resulted of the centrifugation at 750 rpm for 7 minutes of the sprayed sample after the dispersion of it in distilled water. After that, this recovered fraction was centrifuged again to decant the fraction under $2\ \mu\text{m}$, this time at 3000 rpm for 30 minutes. This last fraction was used to prepare oriented sections using the smear technique and, lastly, dried at air. The minerals were identified using the program JADE 9.0, WINDOWS basis, with the data bank PC-PFC done by the International Center for Diffraction Data –ICDD.

3.5. Single-step extraction

The single-step extraction was used to quantify exchangeable ions in soil samples, using to the same methodology as that described in Sanematsu and Kon (2013). Six samples were sieved to obtain fractions under 2 mm (named hereafter as bulk soil – BS), and five of them were also sieved to obtain fractions under 60 micrometers (named hereafter as the clay fraction – CF). The fraction under $60\ \mu\text{m}$ was used to separate the clay fraction by mixing 15 grams of sample with 300 ml of ultra-pure water, subjecting suspension to ultrasound for 2 minutes, and then using the same procedure of X-ray diffraction described previously. The ultra-pure water using for separation was analyzed at the end of the separation in order to controls that no ETR was loss during the clay separation. After that, the samples were dried on a hot plate at $70\ ^\circ\text{C}$. For the single-step extraction itself, one gram of each of the eleven samples were put into a 40 ml solution of 0,5 M (6,6 wt%) ammonium sulfate $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ with $\text{pH} = \sim 5,7$ in an acid-cleaned 50 ml centrifuge tube. A tube with only extraction's solution was also performed as blank. These tubes were mechanically agitated for 24 hours to allow complete



reaction of the solid with the solution, and after that the solid was separated from the solution by centrifugation for 15 minutes at 4,500 rpm. The supernatant solution was filtered by using a Millipore cellulose acetate-type membrane filter prewashed with ultrapure water ($\varphi = 0.22 \mu\text{m}$) and immediately acidified using Suprapur HNO_3 (Merck Selectipur distilled acid). Measurement of a blank indicated that the level of contamination induced by the solution of extraction and filtration of water samples was negligible ($\sum\text{REEY} = 4 \mu\text{g.L}^{-1}$).

After this preparation process, the samples were sent to ACME LABORATORIES for analyses using ICP-MS. Both clay separation solution and blank's test solution indicated that the level of loss or contamination induced by the extraction and filtration processes was negligible (REEs contents $< 0,03 \text{ ppm}$). Extractions from bulk soil (BS) were named SSD, and extractions from clay fraction (CF) were named AAD.

3.6. Enrichment Factor

The Enrichment Factor (EF) was calculated for soils 1 and 2 using rock sampled next to Soil 1 (CVMO-25C) as background for both of them. Soil 2 is located approximately 400 meters from Soil 1. The EF was calculated by the formula $[(X_1/Y_1)/(X_{Ti}/Y_{Ti})]$, where X is the soil sample, Y is sample CVMO-25C and 1 represents the analyzed element. Ti was used as a normalizer for the EF owing to its immobile behavior.

4. Results

4.1. Identification of REE-bearing minerals and description of the rocks

The description of the Mocambo biotite granite and related greisen, and the identification of REE-bearing minerals, were performed using a polarizing-microscope combined with SEM-EDS/EPMA analyses.

The regular Mocambo granite is a pink porphyritic biotite granite essentially composed of K-feldspar phenocrysts immersed in a coarse groundmass of quartz, plagioclase, K-feldspar and biotite. The accessory REE-bearing minerals are allanite-(Ce), apatite and zircon, followed by bastinäsite-(Ce), parisite-(Ce), synchysite-(Ce), thorite, monazite and fergusonite as secondary minerals.



The greisen derived from the biotite granite (sample MO 06) shows alternating bands of quartz and biotite. Quartz represents approximately 40% of the rock and biotite, partially altered to muscovite, makes up approximately 50%. The remaining 10% of the rock are represented by cassiterite, fluorite, and the REE-bearing minerals xenotime, thorite, bastinäsite, monazite, zircon and hingganite-(Y).

4.1.1. Allanite-(Ce) and Bastinäsite Group

Allanite-(Ce) is found in the parent granite, especially in zones with large amounts of biotite. It has a prismatic to irregular habit and a yellowish brown color with some variation according to the degree of alteration of the mineral (Figure 4). This alteration possibly led to the formation of parasite-(Ce), synchysite-(Ce), rontgenite-(Ce) or bastinäsite-(Ce) (Figure 4), according to the EPMA analyses (Table 2). Moreover, the analyses suggest that these minerals form a solid solution, as they belong to the bastinäsite group (Figure 5), for which the general formula is $nXYCO_3.mCaCO_3$, where X= LREEs, Y= (F, OH) and $m= 0$ (bastinäsite) or $m= 1$ [synchysite, parasite or rontgenite] (Wyllie *et al.*, 1996).

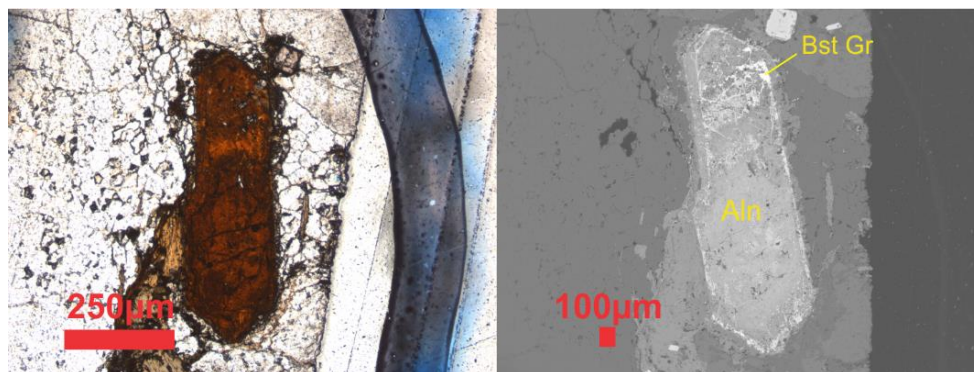


Figure 4. Optical and backscattered electron images of allanite and minerals from de bastinäsite group present in the studied rocks. Aln = allanite; Bst Gr = bastinäsite group.

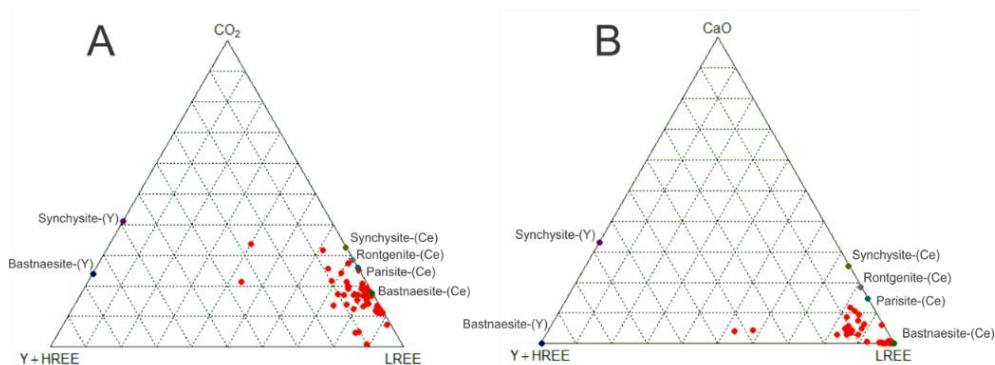


Figure 5. Chemical variation of analyzed REEs fluorcarbonates compared to the ideal composition of minerals of the bastinäsite group.



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências
Dissertação de Mestrado – Ciro Costa Vieira

Table 2. EPMA analyses of REE-bearing minerals - Aln= allanite; Pst= parisite; Syn= synchysite; Bst= bastinásite; Rtg= rontgenite; Apt= apatite; Mnz= monazite.

	Aln-(Ce)	Pst-(Ce)	Syn-(Ce)	Bst-(Ce)	Rtg-(Ce)	Apt	Mnz-(Ce)
SiO ₂	25.746	2.435	4.65	1.721	0.892	3.092	0.071
P ₂ O ₅	0.031	0.017	0.359	0.077	0.151	35.72	24.806
Nb ₂ O ₅	0.204	0	0.23	0.128	0.007	0	0.075
Ta ₂ O ₅	0.171	0.092	0	0.124	0.324	0.074	0
TiO ₂	3.322	0.236	0.454	0.038	1.999	0.019	0.024
ThO ₂	2.552	0.078	4.234	0.566	1.767	0.116	0.79
UO ₂	0	0	0	0	0	0.203	0.248
ZrO ₂	0.198	0	0.053	0	0	0	0
Al ₂ O ₃	16.627	0.251	1.991	0.005	0.514	0.015	0.008
FeO	15.584	1.111	2.957	0.189	0.392	0.349	0.093
MnO	0.096	0.03	0.211	0.075	0.003	0.117	0
CaO	2.188	4.261	6.306	0	2.583	49.77	1.381
BaO	0.067	0	0.007	0.03	0.073	0	0.01
PbO	0.072	0.026	0.106	0	0	0.007	0.007
Y ₂ O ₃	1.143	0.044	1.725	2.688	4.277	3.086	0.594
La ₂ O ₃	7.689	30.657	11.905	12.409	13.05	0.216	11.988
Ce ₂ O ₃	14.884	29.064	30.681	38.696	34.308	1.38	42.152
Pr ₂ O ₃	1.709	0.96	2.679	3.287	2.69	0.214	3.735
Nd ₂ O ₃	6.212	3.249	10.309	13.216	10.768	1.002	14.42
Sm ₂ O ₃	1,115	0.069	1.321	2.137	1.858	0.475	1.605
Eu ₂ O ₃	0.337	0.166	0.38	0.535	0.367	0.043	0.416
Gd ₂ O ₃	0.229	0	0.436	0.937	0.821	0.485	0.319
Tb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
Dy ₂ O ₃	0.118	0	0.362	0.013	0.7	0.377	0.003
Ho ₂ O ₃	0.004	0	0.055	0.251	0.328	0.063	0.212
Er ₂ O ₃	0.294	0.005	0.182	0.093	0.462	0.26	0.109
Tm ₂ O ₃	0	0	0.126	0.034	0.003	0.058	0.06
Yb ₂ O ₃	0.054	0.012	0.146	0.077	0.399	0.212	0.022
Lu ₂ O ₃	0	0.065	0.001	0	0.15	0.107	0.035
F (%)	1.808	5.557	8.727	6.876	9.893	4.567	1.737
F=O	-0.761	-2.340	-3.675	-2,895	-4.166	-1.923	-0.731
Total	101.69	76.26	86.92	81.31	84.61	100.10	104.19



4.1.2. Apatite

Apatite is found in the parent granite, normally next to clusters of biotite, as prismatic to irregular grains (0.5 mm to 1 mm) (Figure 6). REE-bearing secondary minerals, such as monazite and/or britholite, are commonly observed at the boundaries of the apatite grains (Figures 6 and 7), and possibly formed from the destabilization of apatite. The Mocambo apatites are enriched in REEY, mainly those grains associated with monazite-(Ce) and britholite-(Ce), where the concentrations of REEY_2O_3 can reach 8% (Figure 8, Table 2). These data indicate that apatite is an important carrier of REEY in the Mocambo granite.

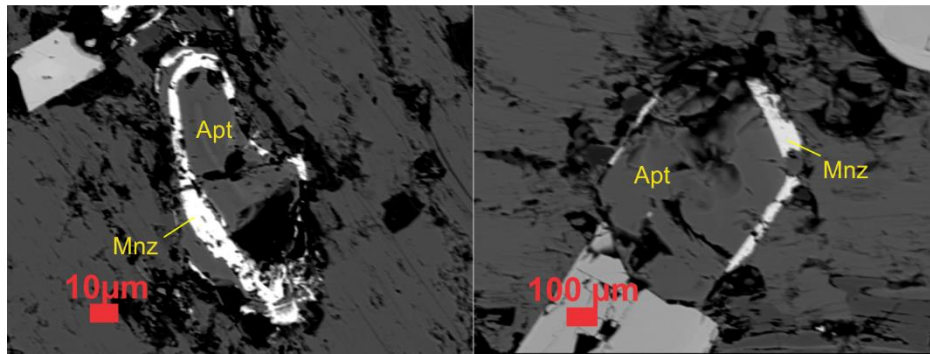


Figure 6. Backscattered electron images of apatite with monazite grains on its edges, present in the studied rocks. Apt = apatite; Mnz = monazite.

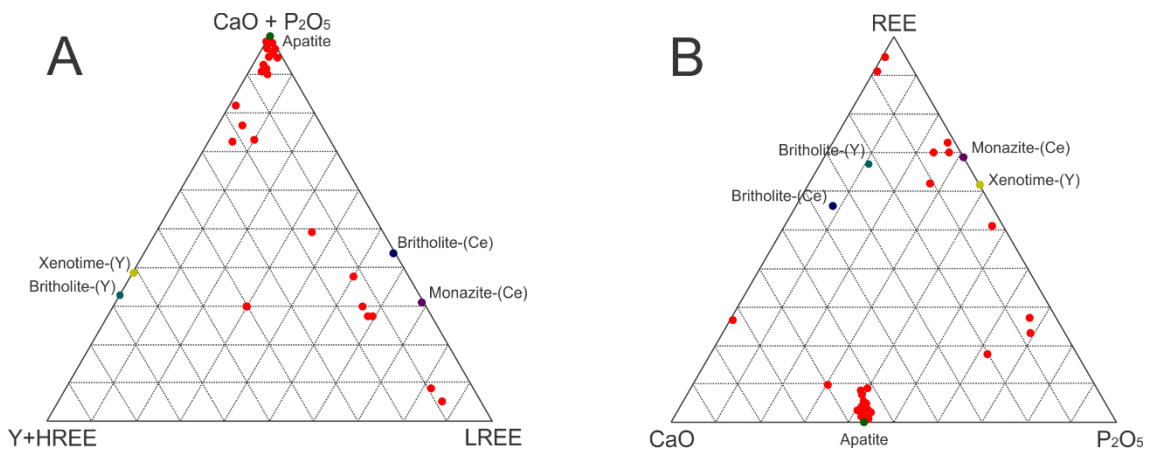


Figure 7. Chemical variation of analyzed REE-bearing phosphates and silicates compared to the ideal composition of apatite, monazite-(Ce), britholite-(Ce) and britholite-(Y).

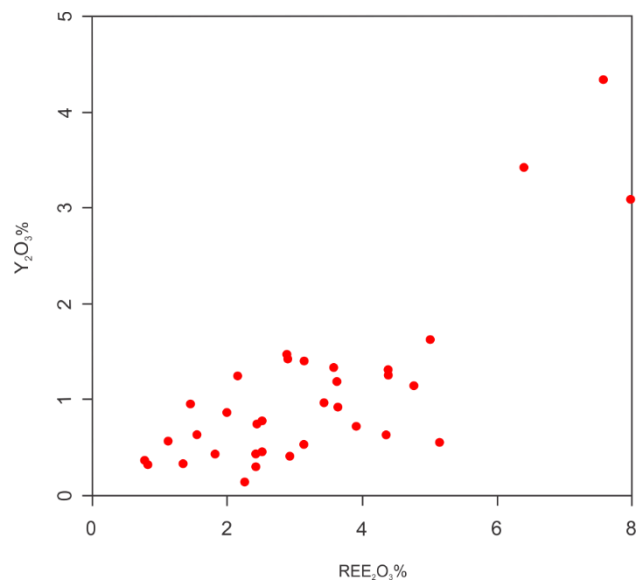


Figure 8. REE₂O₃ and Y₂O₃ contents in the apatite from the Mocambo Massif.

4.1.3. Zircon

Zircon is present in the parent granite and in the greisen. Its habit is prismatic, with crystal sizes ranging from 0.1 mm to less than 1 mm (Figure 9). This mineral is often found as inclusions in biotite in the Mocambo granite and inside muscovite in the greisen, creating a pleochroic halo on both minerals. In some cases, the zircon appears to be intergrown with thorite and/or xenotime (Figure 10). This mineral contains high concentrations of HREEY and is an important reservoir of these elements in the Mocambo granite (Figure 11 and Table 3).

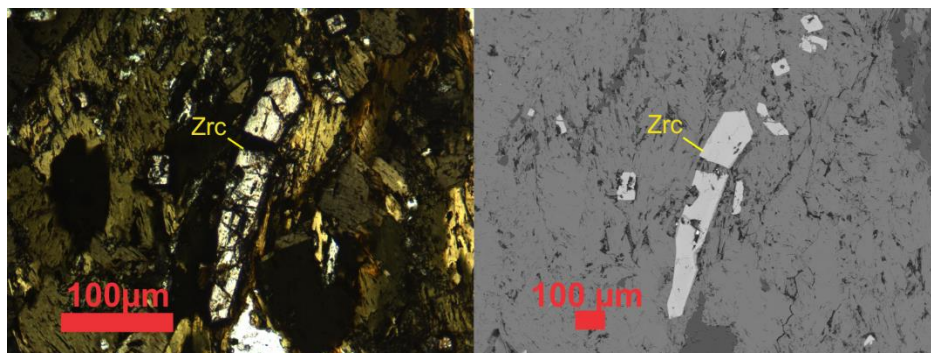


Figure 9. Optical and backscattered electron images of zircon present in the studied rocks. Zrc = zircon.

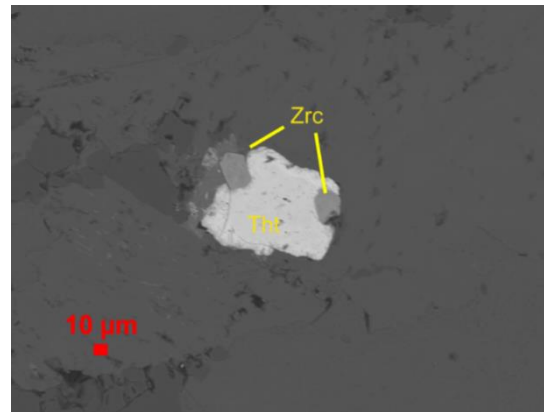


Figure 10. Backscattered image showing the contact relationship between zircon and thorite grains.

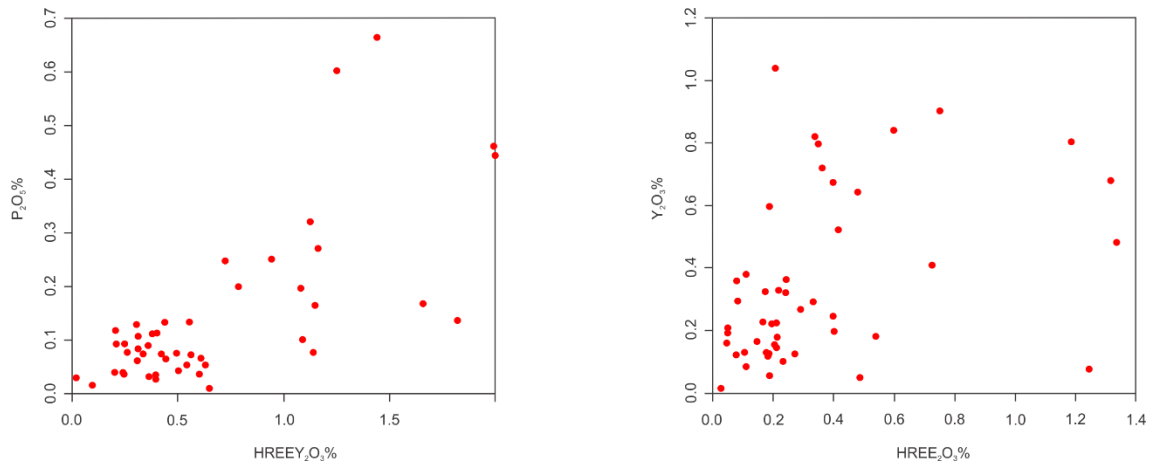


Figure 11. HREE₂O₃, Y₂O₃ and P₂O₅ contents in the analyzed zircons from the Mocambo Massif.

4.1.4. Fergusonite

Fergusonite was observed in a few samples as isotropic grains with a regular habit and a brown color (Figure 12). SEM-BSE images indicate zoning (Figure 12), which is confirmed by EPMA analyses (Table 3) where the composition varies, in order of abundance, from fergusonite-(Y), to fergusonite-(Ce) (Figure 13).



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências
Dissertação de Mestrado – Ciro Costa Vieira

Table 3. EPMA analyses of REE-bearing minerals - Zrc= zircon; fgt= fergusonite; tht= thorite; Xnt= xenotime; Hgn= hingganite.

	Zrc	Fgt-(Ce)	Fgt-(Y)	Tht	Xnt-(Y)	Hgn-(Y)
SiO ₂	31.39	5.465	2.821	14.996	0.363	23.197
P ₂ O ₅	0.063	0	0	0.856	34.125	0
Nb ₂ O ₅	0.379	42.392	43.242	0.031	0.105	0.054
Ta ₂ O ₅	0	2.775	0.78	0	0	0.146
TiO ₂	0.078	1.282	0.328	0.011	0.049	0
ThO ₂	0.027	2.693	0.183	58.204	0.139	0.037
UO ₂	0.099	5.524	1.222	1.66	0	0
ZrO ₂	68.315	0	0.203	0	0	0
Al ₂ O ₃	0.032	0.774	0.315	0.148	0.028	0.012
FeO	0.132	10.013	1.89	5.194	0.032	1.89
MnO	0	0.362	0.255	0.003	0	0.069
CaO	0	2.911	0.875	0.44	0.182	1.717
BaO	0.001	0.336	0.049	0	0.032	0.019
PbO	0	4.569	0.653	0.093	0	0
Y ₂ O ₃	0.357	0.469	16.553	4.246	44.84	25.895
La ₂ O ₃	0.004	2.34	0.282	0.09	0.063	0.811
Ce ₂ O ₃	0.024	11.563	1.972	0.364	0.728	5.551
Pr ₂ O ₃	0.044	0.489	0.183	0.074	0.074	0.686
Nd ₂ O ₃	0	0.959	0.645	0.261	1.041	3.825
Sm ₂ O ₃	0	0.169	0.749	0.118	0.996	1.943
Eu ₂ O ₃	0	0.039	0.027	0.024	0.035	0.156
Gd ₂ O ₃	0	0.144	1.512	0.533	2.253	3.105
Tb ₂ O ₃	0.042	0	0.501	0.083	0.455	0.348
Dy ₂ O ₃	0	0.159	3.974	0.422	3.804	2.565
Ho ₂ O ₃	0	0	0.781	0.168	0.895	0.578
Er ₂ O ₃	0.038	0.227	2.739	0.303	2.739	1.464
Tm ₂ O ₃	0	0.023	0.396	0	0.419	0.171
Yb ₂ O ₃	0	0.225	2.589	0.145	2.385	1.395
Lu ₂ O ₃	0	0.068	0.549	0	0.588	0.439
F (%)	0	0.273	0.618	2.829	0.075	0.788
F=O	-0.013	-0.115	-0.260	-1.191	-0.032	-0.332
Total	101.12	96.13	86.63	90.10	96.41	76.53

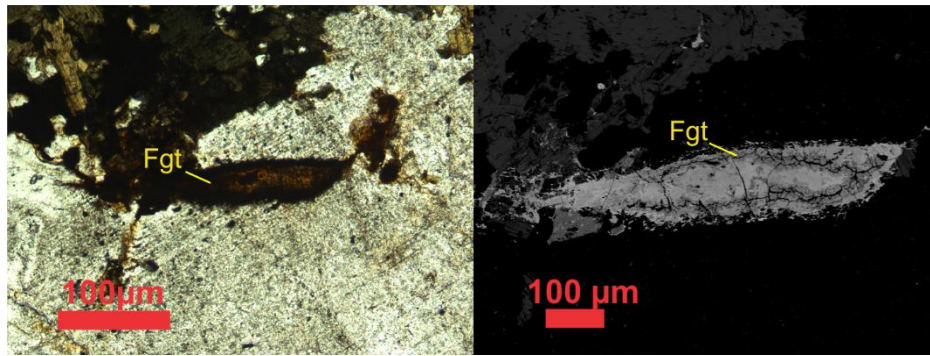


Figure 12. Optical and backscattered electron images of fergusonite present in the studied rocks. Fgt= fergusonite.

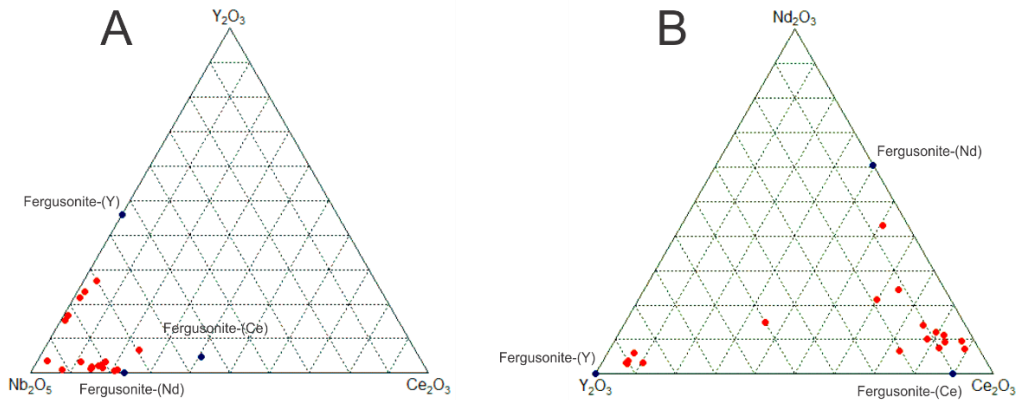


Figure 13. Chemical variation of analyzed REEs niobate compared to the ideal composition of fergusonite-(Ce), fergusonite-(Y) and fergusonite-(Nd). A) $Nb_2O_5 - Y_2O_3 - Ce_2O_3$; B) $Y_2O_3 - Nd_2O_3 - Ce_2O_3$.

4.1.5. Thorite

Thorite is found in the biotite granite and greisen as very small grains, normally approximately 50 μm and next to xenotime, allanite, zircon or bastinäsite crystals. It has high relief, an irregular habit and is colorless. In some cases, there are brown stains on the mineral because of thorium (Figure 14). The EPMA analyses suggest that most grains are altered and enriched in HREEY (Table 3).

4.1.6. Monazite

Monazite is common as an accessory mineral of the biotite granite or as a secondary mineral in the altered granite and greisen. In the less altered granites, monazite was observed



as rims or filling fractures in partially altered apatite and allanite crystals (Figure 14). EPMA analyses show high contents of LREEs (Table 2).

4.1.7. Xenotime

Xenotime was observed only in the greisen, where the mineral occurs as ≤ 0.5 mm irregular grains often associated with thorite and bastinäsite (Figure 14). Under polarized light xenotime is identified by its irregular shape, high relief, very high interference colors and pleochroic halos when included in biotite (Figure 14). EPMA analyses show high values of HREEs, especially Gd, Dy, Er and Yb (Table 3).

4.1.8. Bastinäsite

Bastinäsite is also found in the greisen, normally next to grains of xenotime or thorite. Its grains vary in size from 50 to 300 μm , present high relief, high interference colors (3rd order) and are colorless (Figure 14). The EPMA analyses of that rock show that the bastinäsite -(Ce) prevails, but the amounts of Nd and La are relevant (Table 2).

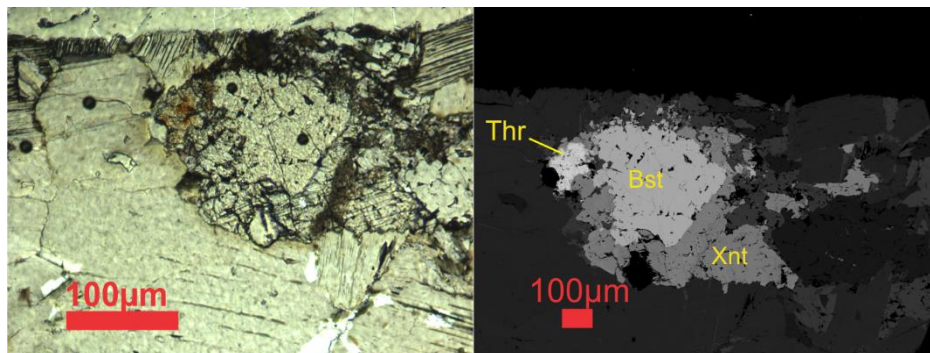


Figure 14. Optical and backscattered electron images of xenotime, bastinäsite and thorite present in the studied rocks. Xnt = xenotime; Bst = bastinäsite; Thr = thorite.

4.1.9. Hingganite-(Y)

In the present study, we assumed that a Y-Ca silicate found in the Mocambo greisen is hingganite-(Y) ((Y,Yb,Er)BeSiO₄(OH)), even though Be was not analyzed. The amounts of SiO₂



and Y_2O_3 (23.2 and 26.9 wt%, respectively; Table 2) are close to the ideal composition of hingganite-(Y), that is, 26.68 and 31.50, respectively (webmineral.com). There is a shortfall of approximately 20% in the total of the analytical results. Assuming that this missing amount corresponds to H_2O and Be, the calculated formula is close to the ideal formula of the mineral (Table 3). The same procedure was used by Sanematsu *et al.* (2016) who described hingganite in a greisen from granites in Myanmar.

Hingganite-(Y) is an HREEY mineral of the gadolinite group and was observed in the greisen of the Mocambo granite as irregular masses of tiny grains at the borders of fluorite crystals (Figure 15).

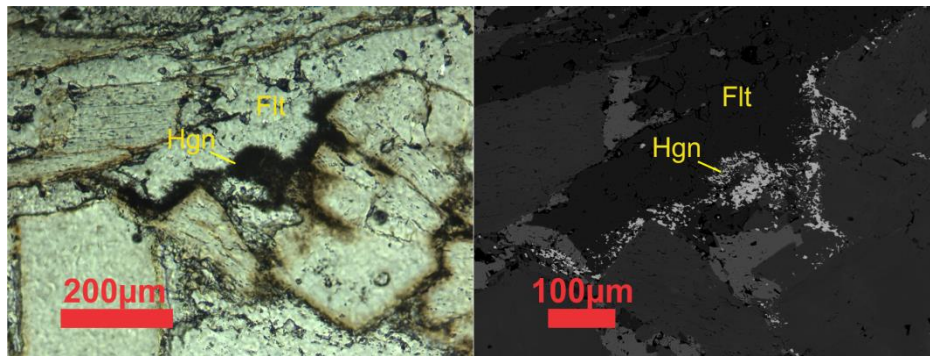


Figure 15. Optical and backscattered electron images of hingganite and fluorite, present in the studied rocks. Flt = fluorite; Hgn = hingganite.

4.2. Chemical compositions of granite, soil and clay fractions

Whole-rock analyses are listed in Table 4. Their SiO_2 and K_2O contents range from 71.17 to 76.37 wt% and 4.07 to 6.14 wt%, respectively. The high contents of SiO_2 , Fe/Mg, $Na_2O + K_2O$, F, Zr, Nb, Ga, Sn and REEY, and the low contents of CaO, Ba and Sr are characteristic of A-type granites (Whalen *et al.*, 1987). In the discrimination diagram (Y + Nb vs Rb, Figure 16) of Pearce (1996), the analyzed biotite plots in the within-plate field. All these data agree with the discussions in the literature that relate this granite to an anorogenic environment associated with the evolution of a within-plate rift system (Marini and Botelho, 1986; Marini *et al.* 1992). In the ACNK diagram, the analyses plot in the metaluminous and peraluminous fields (Figure 17). The biotite granite has a weakly fractionated REEs pattern (Figure 18).

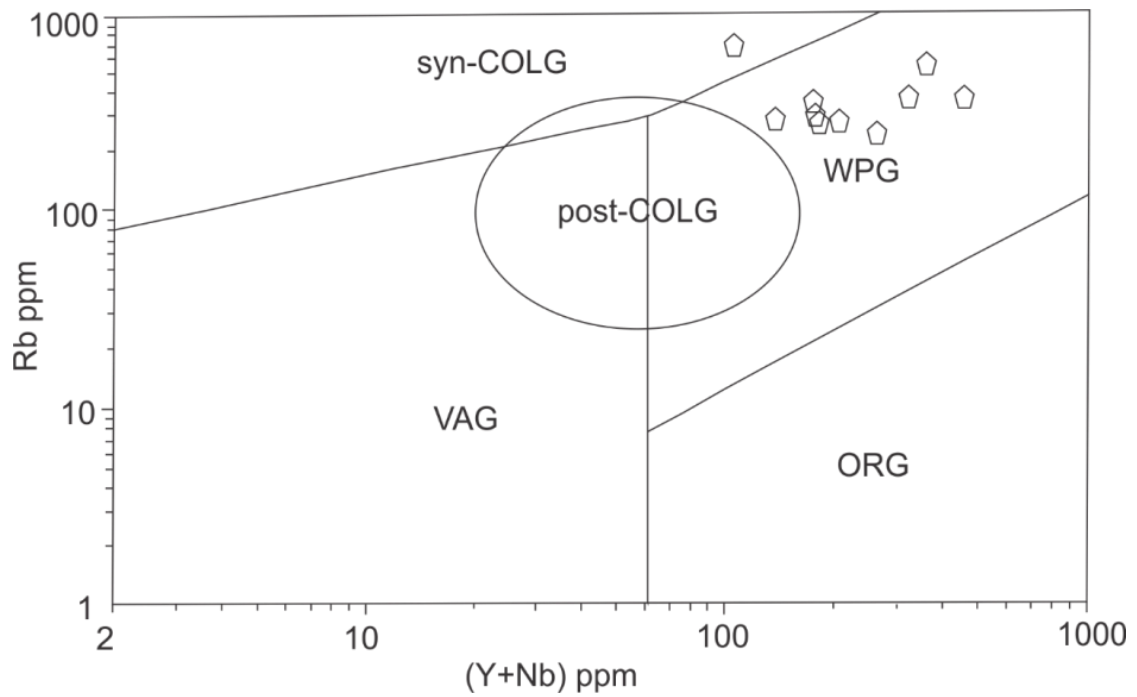


Figure 16. Rb vs (Y + Nb) discrimination diagram after Pearce (1996). VAG, volcanic-arc granite; ORG, ocean ridge granite; WPG, within-plate granite; syn-COLG, syn-collisional granite.

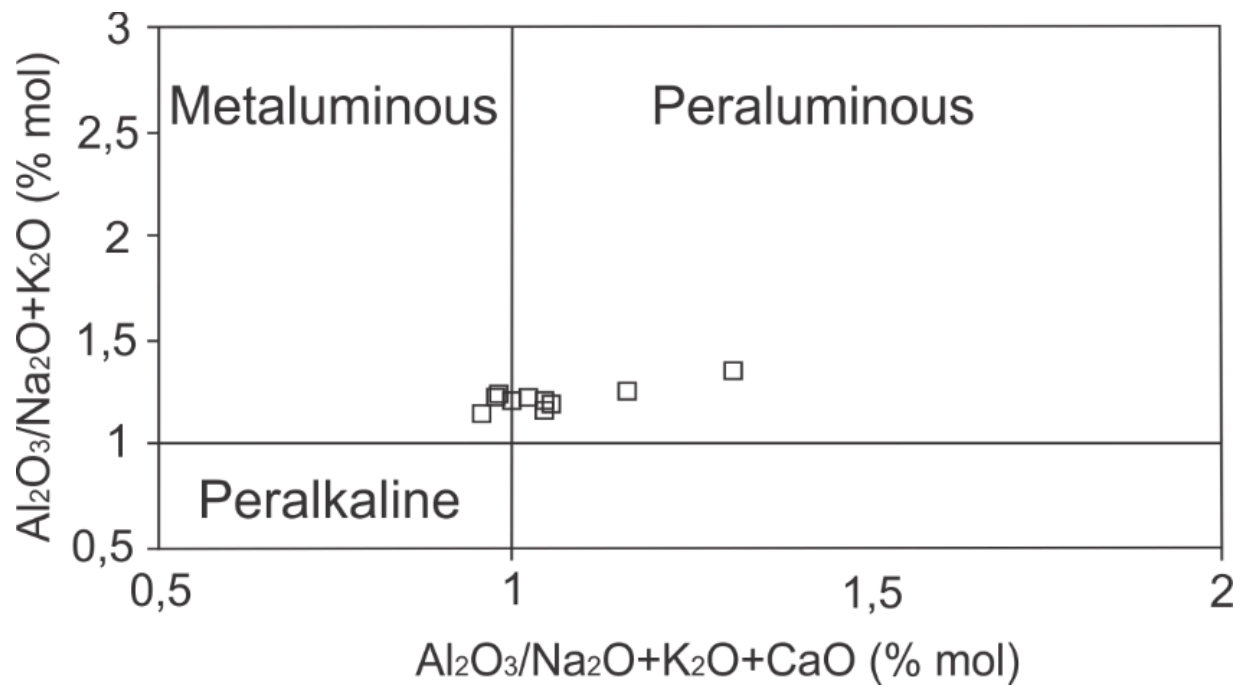


Figure 17. A/CNK vs A/NK plot for the Mocambo biotite granite

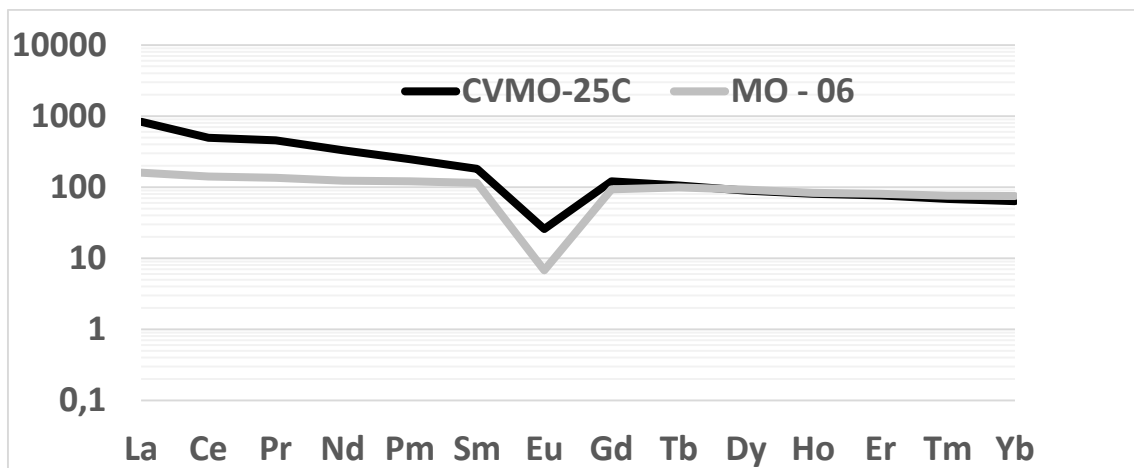


Figure 18. Chondrite-normalized REEs pattern for the regular Mocambo biotite granite (CVMO-25C) and related greisen (MO-06).

Bulk soil and clay fractions analyses are also shown in Table 4. The bulk soil samples contain, in average, less SiO₂, ranging from 63 to 80 wt%, and more Al₂O₃, ranging from 9 to 18 wt%, than the rock samples. The K₂O the content decreases from rock to soil, 4 to 6 wt% and 0.6 to 6 wt%, respectively, and the loss-on-ignition (LOI) increases, 0.5 to 1.3 wt% and 2 to 9 wt%, respectively. The clay fractions show a decrease from soil sample in SiO₂ and K₂O, 32 to 41 wt% and 0,4 to 1.3 wt%, respectively, and Al₂O₃ and LOI an increase, 33 to 40 wt% and 15 to 21 wt%, respectively. The trace elements REEs, Y, Rb, Th, Nb, Sn and Ga normally increase from BS to CF, while Sr, Zr and Ba tend to decrease (Figures 19 to 23).

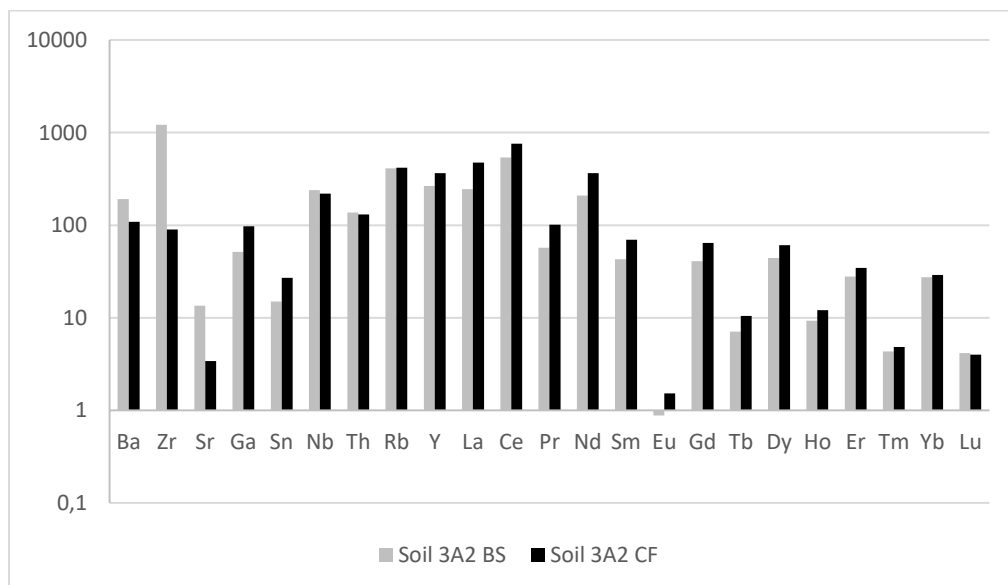


Figure 19. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 3A2.

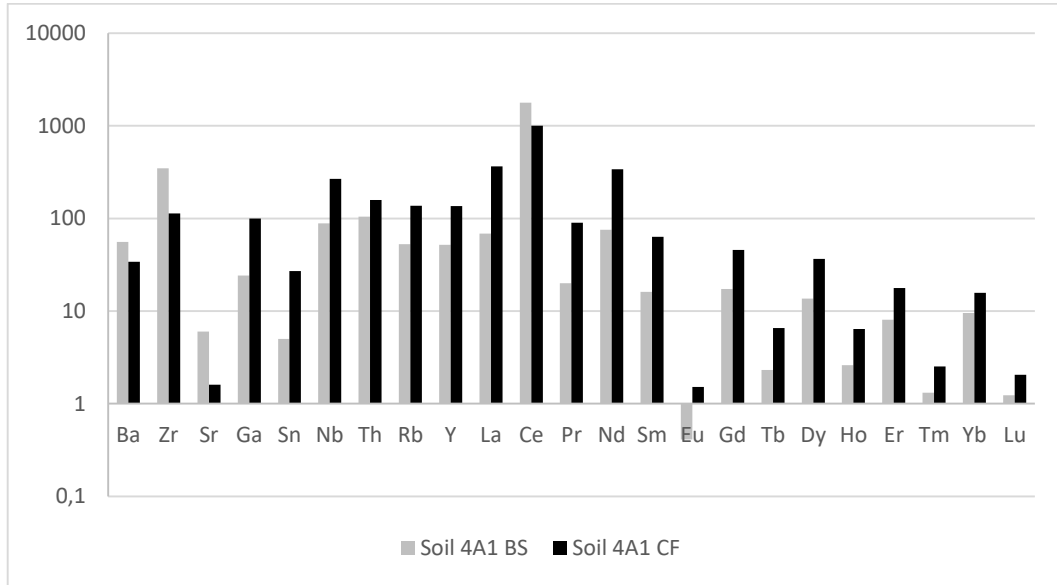


Figure 20. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 4A1.

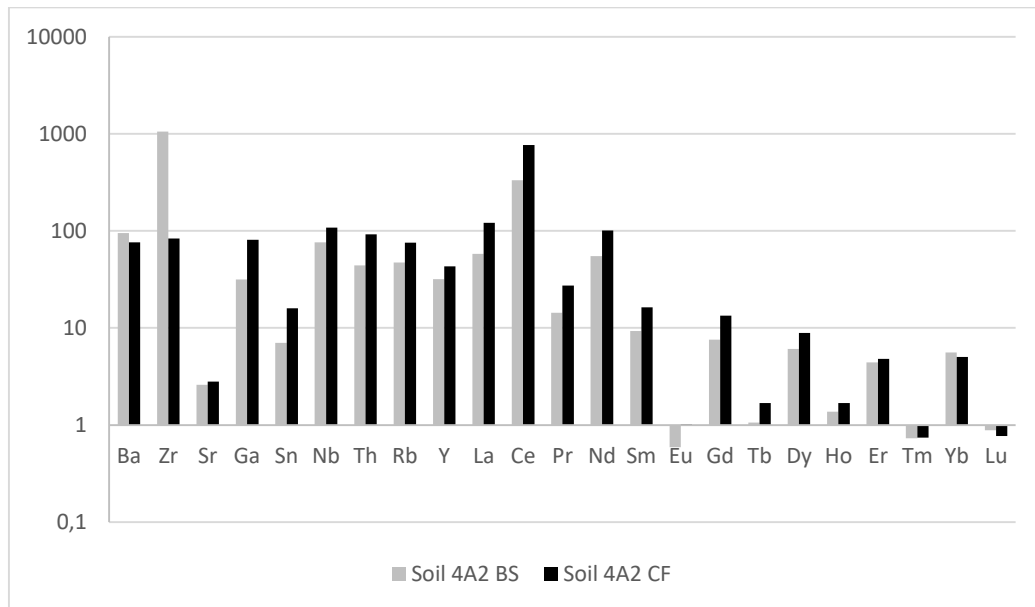


Figure 21. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 4A2.

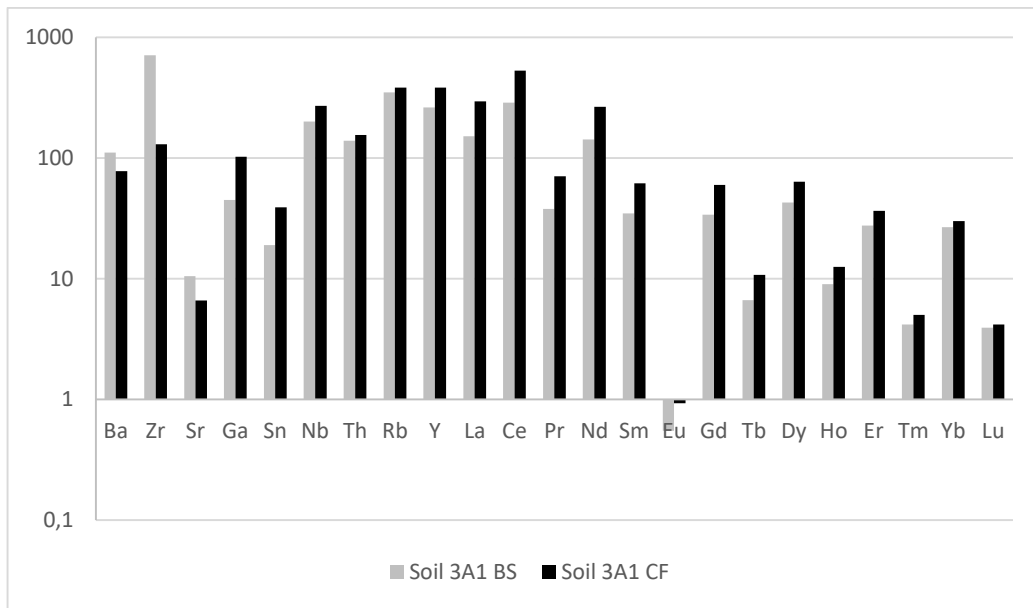


Figure 22. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 3A1.

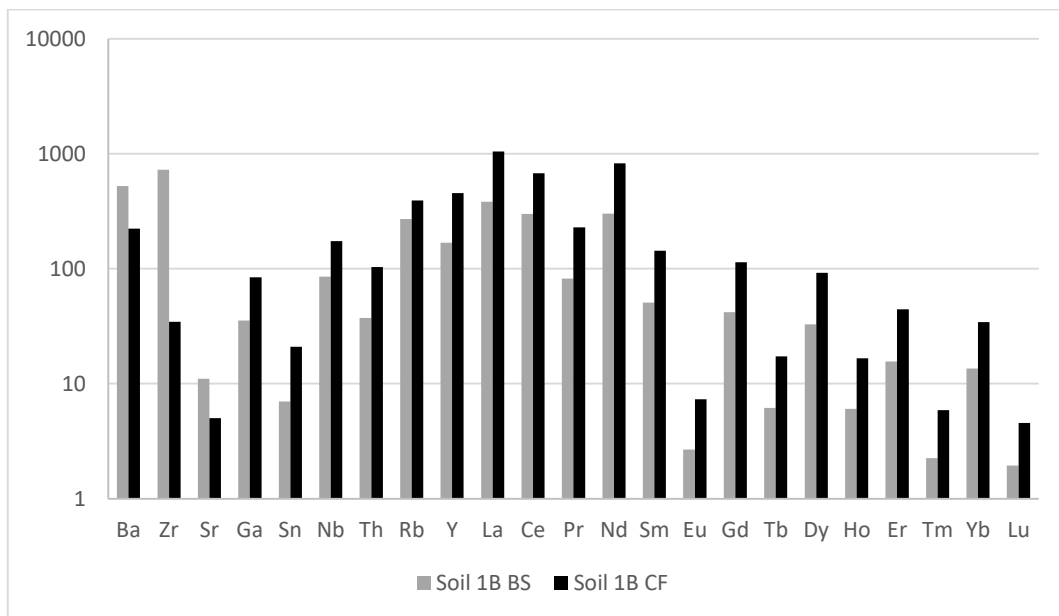


Figure 23. Changes in the concentration (in ppm) of trace elements between Bulk Soil and Clay Fraction in the soil 1B.

Table 4. Whole rock and soil analyses. BS = Bulk Soil; CF = Clay Fraction.

	CVMO -2A2	CVMO -10R	CVMO -25C	MO-06	MO-08	Soil 1B _{BS}	Soil 1B _{CF}	Soil 1C _{BS}	Soil 2A _{BS}	Soil 2B1 _{BS}	Soil 2B2 _{BS}	Soil 2C _{BS}	Soil 3A1 _{BS}	Soil 3A1 _{CF}	Soil 3A2 _{BS}	Soil 3A2 _{CF}	Soil 4A1 _{BS}	Soil 4A1 _{CF}	Soil 4A2 _{BS}	Soil 4A2 _{CF}
SiO2(%)	71.58	73.53	71.18	60.09	74.07	72,5	38,98	80.47	72.28	65.24	66.75	71.63	69.25	40.62	63.32	39.12	78.68	32.02	73.62	31.25
TiO2	0.28	0.17	0.32	0.06	0.19	0,29	0,53	0.16	0.17	0.2	0.18	0.15	0.18	0.25	0.28	0.3	0.38	0.38	0.29	0.37
Al2O3	13.39	12.72	12.29	19.99	13.08	13,46	32,7	9.66	14.66	18.73	17.67	15.16	16.22	34.98	18.23	34.57	9.11	38.09	13.58	39.79
Fe2O3	3.6	2.55	5.31	5.88	2.65	3,81	10,75	2.1	2.75	3.35	3.14	2.43	2.08	4.54	3.17	6.28	5.12	8.26	3.1	7.26
MnO	0.05	0.03	0.07	0.06	0.03	0,02	0,04	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	<0.01	0.01	0.01
MgO	0.11	0.05	0.1	0.05	0.04	0,04	0,11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.13	0.27	0.15	0.27	0.12	0.12	0.06	0.11
CaO	0.87	1.03	1.07	2.07	0.72	0,04	0,07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.12	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02
Na2O	3.23	2.66	2.93	0.11	3.15	0,1	0,02	0.08	0.1	0.1	0.1	0.12	0.72	0.02	0.48	0.02	0.02	0.01	0.02	<0.01
K2O	5.42	5.67	5.09	7.29	5.44	3,63	1,15	3.55	2.87	3.46	4.03	5.18	4.26	1.15	4.72	1.28	0.61	0.58	0.6	0.43
P2O5	0.04	0.02	0.03	<0.01	0.03	<0.01	0,02	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
LOI	1.1	1.3	1.2	4.1	0.85	5,8	15,1	3.7	6.9	8.6	7.8	5	6.8	17.7	9.1	17.7	5.6	20.1	8.5	20.5
TOTAL	99.7	99.7	99.6	99.73	100.5	99,6	99,45	99.8	99.8	99.7	99.7	99.7	99.7	99.6	99.6	99.6	99.7	99.6	99.8	99.8
Be (ppm)	0	11	4	20	4.79	<1	6	<1	1	2	2	<1	3	11	6	8	1	<1	<1	1
Cs	1.4	2.4	1.5	11.8	7	2	5,8	0.9	2.1	2.9	2.8	1.9	2.9	7.6	3.1	6.5	0.6	3.2	1.3	3.4
Rb	293.7	283.1	241	1347.1	372	270,5	391,8	172.2	287.9	363.3	367.1	420.6	349.9	382.1	411.3	417.9	52.7	137.6	47.1	75.6
Ba	738	903	832	116	194.6	523	223	443	115	136	156	172	111	78	192	109	56	34	95	76
Sr	63.3	72.2	65.8	6.2	31.9	11	5	9.9	7.3	9.1	10.4	13.4	10.5	6.6	13.5	3.4	6	1.6	2.6	2.8
Ga	37.2	29.9	29.7	96.4	33.7	35,4	84,3	24.6	41.8	52.2	52.1	46.8	45	102.7	51.6	97	24.2	100.1	31.6	81.3
Ni	0.4	0.2	0.9	-	0	0,3	0,6	0.4	0.3	0.8	0.2	<0.1	0.3	0.8	0.7	1	2.4	4	0.6	1.3
Cu	9	7.6	3.5	83.1	4.1	12,1	34,6	4.1	3.5	21.4	10	4.5	7.9	31.7	7.4	30.4	5.6	27.7	16.5	30.8
Pb	23.4	21.3	18.4	25.6	51.1	25,4	62,5	16.4	34.2	42.4	33	26.6	42.1	69.8	51.1	76.7	72.4	69.9	20.9	36.6
Zn	63	81	146	69	102	78	149	49	35	55	47	56	35	61	64	102	10	35	13	26
Th	41.9	38.9	35.9	67.5	80.4	37,3	103,3	16.5	95	111	106.4	97.4	138.8	154.9	137.1	130.1	104.9	158	44.1	92
U	3.8	4	3.3	12.7	12.5	7	12,9	3.9	15.9	20.6	24.2	32.1	17.9	20.1	21.6	19.4	16.6	23	7.5	11.3

	CVMO -2A2	CVMO -10R	CVMO -25C	MO-06	MO08	Soil 1B _{BS}	Soil 1B _{CF}	Soil 1C _{BS}	Soil 2A _{BS}	Soil 2B1 _{BS}	Soil 2B2 _{BS}	Soil 2C _{BS}	Soil 3A1 _{BS}	Soil 3A1 _{CF}	Soil 3A2 _{BS}	Soil 3A2 _{CF}	Soil 4A1 _{BS}	Soil 4A1 _{CF}	Soil 4A2 _{BS}	Soil 4A2 _{CF}
Zr	635.6	341.6	740.6	307.1	283.5	723.3	34.6	320.3	423.5	424.2	395.9	361.4	710	129.9	1217.5	89.8	348.9	113.2	1052.6	83.6
Hf	17.6	10.2	20.6	13	14.5	20.5	1.9	9.2	16.6	16.6	15.4	15.7	29.8	5.4	46.2	3.7	14.7	4.6	32.1	3.8
Sn	4	6	7	804	6.5	7	21	4	6	7	7	4	19	39	15	27	5	27	7	16
Nb	79.4	51.2	87.3	91	134	85.4	173.8	48.6	153.6	185.9	181.1	163.3	200.7	271	238.3	218.7	88.6	267.9	76.3	108.5
Ta	3.6	2.9	4	3.6	4.5	4	8.8	3.2	8.8	10	9.4	8.2	12	13.4	12.3	10.9	4.7	10.9	4.4	6.3
W	1.2	5.4	1.1	19.5	0	1.9	5.7	0.8	4	4.3	3.9	2.3	5.4	7.9	5.3	6.1	2.6	5.9	2.4	5.4
V	<8	<8	<8	<8	n.a.	<8	<8	<8	9	<8	<8	<8	28	51	34	51	68	43	20	45
Sc	7	6	7	9	2.64	8	22	4	6	7	7	4	4	9	15	9	7	10	4	9
Y	99.8	87.5	180.1	191	335.3	168.1	455.7	109.5	136.1	178.6	175.9	189.7	262	383.6	265	364.8	51.9	136.2	31,9	43.1
La	186.7	175.7	258.5	49.7	441.6	382.1	1045.1	297.6	131.5	186.4	195.4	240.9	151.1	294.8	244.4	475.9	68.5	365.5	57,9	121.2
Ce	340.6	354.5	394.1	112.9	661	300.1	676	167.1	368.8	429.5	338.1	284.7	287.7	528.4	537.5	761	1771	1004.3	331,8	769.3
Pr	40.9	38.8	55.5	16.49	81.8	82.3	228.3	62.7	32.7	44.5	44.73	51.7	37.9	70.5	56.8	100.9	19.9	90.2	14,3	27.3
Nd	148.4	137.1	199	74	339	301.6	825.6	215.7	119.5	164.5	163.3	187.8	142.7	265.5	209.3	364.5	75.5	338.3	54,9	100.9
Sm	26.3	23.6	35.4	22.32	52.9	50.7	143.5	35.2	26.2	33.6	31.2	34.3	34.8	61.6	42.7	69.8	16.2	63.3	9,3	16.4
Eu	1.58	1.63	1.9	0.5	1.11	2.67	7.3	1.74	0.6	0.83	0.75	0.78	0.55	0.93	0.88	1.52	0.41	1.52	0,59	1.01
Gd	22.5	19.3	31.4	24.26	51.8	41.8	113.8	27.5	25.3	31.9	29.3	30.7	34	60.0	41	64.0	17.3	45.6	7,6	13.4
Tb	3.35	2.97	5.02	4.71	9.4	6.17	17.3	4	4.24	5.24	4.79	5	6.65	10.77	7.11	10.45	2.32	6.54	1,06	1.68
Dy	18.3	16.9	28.9	29.66	57.3	32.9	92	20.5	25.3	31.3	28.9	30.1	42.8	63.5	44.3	60.9	13.7	36.5	6,1	8.9
Ho	3.4	3.3	5.6	5.85	10.5	6.0	16.6	3.6	5.2	6.4	6	6.2	9	12.5	9.3	12.1	2.6	6.4	1,4	1.7
Er	9.7	9.4	16.0	16.92	29.8	15.6	44.5	9.8	15.6	19	18.2	19.2	27.6	36.5	27.9	34.5	8.1	17.8	4,4	4.8
Tm	1.38	1.38	2.22	2.46	4.1	2.25	5.87	1.26	2.38	2.99	2.75	2.95	4.17	5.03	4.34	4.82	1.32	2.52	0,73	0.74
Yb	8.6	8.47	13.29	15.8	22.5	13.53	34.33	7.58	15.54	19.12	17.09	18.17	26.82	30.04	27.45	29.03	9.51	15.78	5,57	5.01
Lu	1.27	1.18	1.97	2.18		1.94	4.55	1.01	2.25	2.73	2.62	2.67	3.94	4.19	4.17	4.01	1.23	2.06	0,88	0.77
ΣETRY	912.7	881.8	1228.9	568.7	2098	1407.7	3710.5	964.9	911.3	1156.7	1059.0	1104.7	1071.7	1827.8	1522.1	2358.3	2059.4	2132.5	528,4	1116.1
Ce/Ce*	0.96	1.0	0.81	0.97	0.85	0.41	0.34	0.30	1.38	1.16	0.89	0.63	0.93	0.90	1.12	0.04	11.75	1.36	2,82	3.28
CIA	58.4	57.6	57.5	67.9	58.4	78.1	96.3	72.6	83.1	83.9	81.0	74.1	76.3	96.4	77.7	96.3	93.3	98.4	95,6	98.9



4.3. Single-Step Extraction Analysis

The results of chemical extractions are shown in Table 5. The concentrations of extracted REEY range from 241 to 765 ppm in the soils samples, representing 45 to 58 wt% of the total REEY contents. In the clay fraction, the extracted contents are higher, 567 to 1,961 ppm, representing between 35 and 83 wt% of the total REEY. It should be noted that the exchangeable amount of Ce_{exch} is lower than other REEs, which are on average 20% for soil samples and 42% for clay fractions.

Table 5. Single Step Extraction analyses. SSE = extraction from bulk soil samples; AAD = extraction from clay fractions.

	Soil 1B SSE	Soil 1B AAD	Soil 2B1 SSE	Soil 3A1 SSE	Soil 3A1 AAD	Soil 3A2 SSE	Soil 3A2 AAD	Soil 4A1 AAD	Soil 4A2 SSE	Soil 4A2 AAD
Y	151.16	241.10	150.82	117.56	264.69	145.71	334.11	94.38	16.99	30.89
La	265.86	462.64	187.54	115.25	271.29	196.91	468.00	383.13	62.38	119.41
Ce	16.70	40.01	30.95	186.16	432.17	80.21	533.28	181.06	88.22	285.47
Pr	46.02	80.90	40.17	23.51	52.73	41.15	85.02	76.49	12.06	21.75
Nd	179.97	310.49	155.38	87.58	198.57	157.15	325.43	294.35	43.84	80.74
Sm	29.19	48.73	28.02	17.90	40.49	27.62	56.50	46.53	6.35	10.45
Eu	1.47	2.22	0.54	0.20	0.49	0.47	1.09	0.95	0.37	0.59
Gd	29.39	48.09	26.70	17.90	39.83	26.07	52.68	31.23	4.26	6.54
Tb	3.78	6.12	3.75	2.65	5.70	3.47	7.42	3.78	0.51	0.89
Dy	22.76	35.13	21.70	14.87	32.13	21.35	42.81	19.01	3.11	4.72
Ho	4.35	6.76	4.49	2.89	6.71	4.12	8.85	3.19	0.54	0.82
Er	11.21	17.47	12.62	7.69	17.94	11.10	23.11	7.70	1.42	2.45
Tm	1.24	1.85	1.52	0.88	2.03	1.28	2.79	0.88	0.17	0.30
Yb	7.20	11.11	9.38	5.51	11.89	8.43	17.60	5.25	1.08	1.86
Lu	1.00	1.51	1.22	0.71	1.68	1.15	2.42	0.70	0.14	0.22
Σ ETRY	771.3	1314.1	674.8	601.3	1378.3	726.2	1961.1	1148.6	241.5	567.1
Ce/Ce*	0.037	0.051	0.087	0.877	0.886	0.218	0.655	0.259	0.789	1.373

4.4. X-ray diffraction and Chemical Index of Alteration

Results from X-ray diffraction of soils are very similar and indicate the presence of quartz, kaolinite, illite, microcline and gibbsite (Figure 24). A semi-quantitative analysis was performed for the bulk sample (BS) and the clay fractions (CF) of soils 1 and 2 (Table 6). For both samples, the mineral content of the BS, from the highest to the lowest, is: quartz, microcline, kaolinite, illite and gibbsite. In the clay fraction, kaolinite is the most abundant mineral, followed by gibbsite, illite, quartz and microcline, though not necessarily in this order. It



is observed that quartz decreases from the near-surface samples to samples deeper in the soil profile. Kaolinite increases in intermediate horizons, such as soils 2B1_{BS} and 2B2_{BS}.

4.7 Chemical Index of Alteration and Enrichment Factor

The Chemical Index of Alteration (CIA) proposed by Nesbitt and Young (1982) can be a good marker for quantify the intensity of weathering process. The CIA is the ratio of $= [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)] \times 100$, where CaO is in silicates. This index was calculated for soil and clay samples (Table 4). The values increased from deep horizon to topsoil for all soil, varying from 62 to 93 for soils. The CIA increased up to 95 (96 to 99) for all clay fractions.

The Enrichment Factor (EF) data are shown in Table 7. For Soil 2, it can be noted that the EF of REEY is higher in sarolite, i.e. horizon C and decrease upward to horizon B2, B1 and A. In Soil 1, the behavior is the same from sample B to C, but sample B is richer in REEs than sample C. The last one has higher EF because its Ti content is around half that of sample B, which causes its EF to be higher.



Soil 2B1

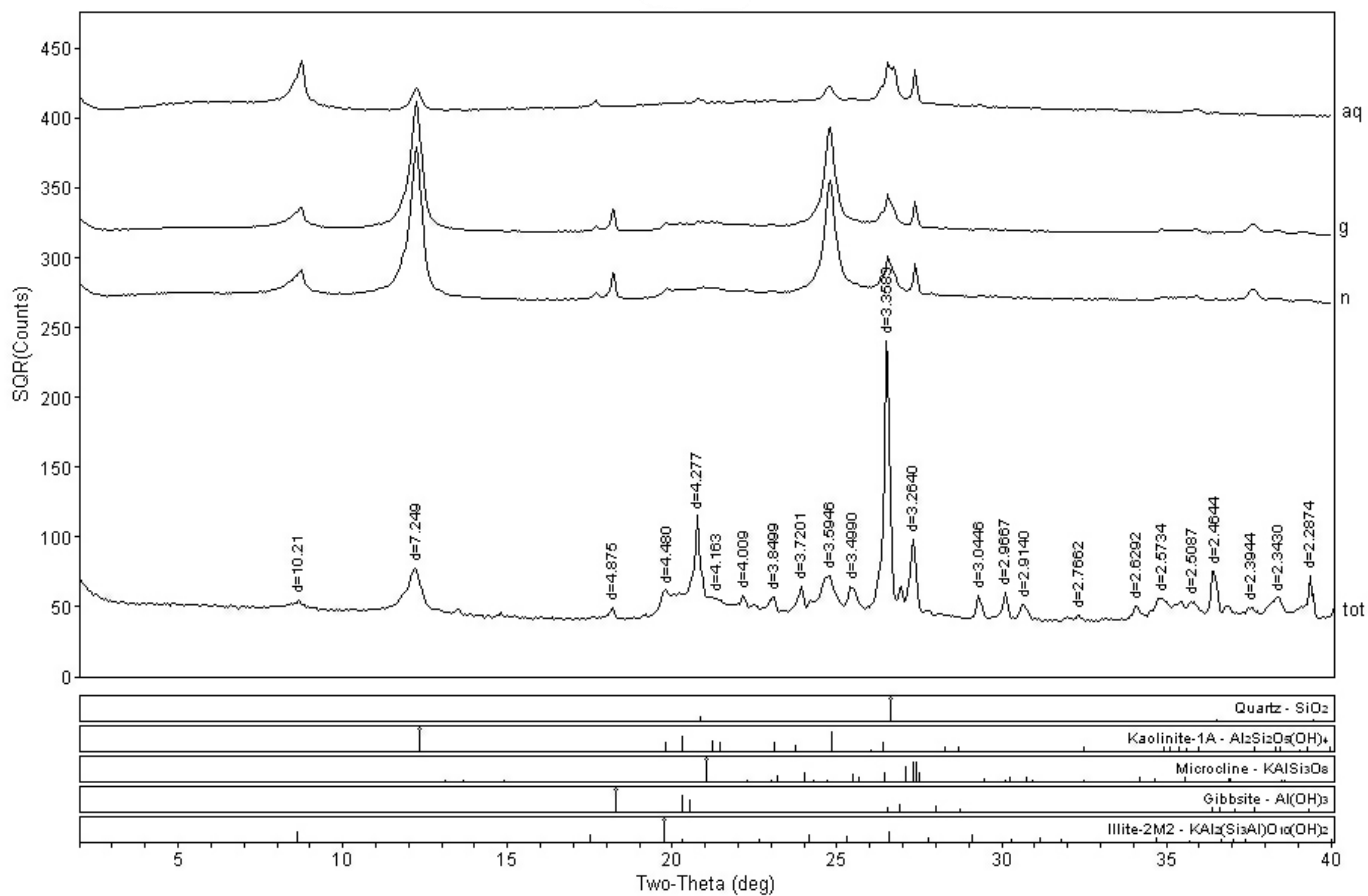


Figure 24. X ray difratogram of soil 2B1. Total = bulk sample; n = clay fraction; g = glicolated and aq = heated.



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências
Dissertação de Mestrado – Ciro Costa Vieira

Table 6. Semi-quantitative analyses of X ray difratograms, where BS = bulke sample; CF = clay fraction, ++++ = around 60% of total sample; +++ = around 40% of total sample; ++ = around 20% of total sample; + = around 10% of total sample; +/- = around 5% of total sample; and - = not identified.

	Soil 1B		Soil 1C		Soil 2A		Soil 2B1		Soil 2B2		Soil 2C	
	BS	CF	BS	CF	BS	CF	BS	CF	BS	CF	BS	CF
Quartz	+++	-	++++	+	++++	+/-	+++	-	+++	-	+++	-
Microcline	+	+/-	++	+	+	+/-	+	+	++	+	++	+
Illite	+/-	+	+-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+	+	++	++
Kaolinite	++	+++	+	+++	++	+++	++	++++	++	++++	+	+++
Gibbsite	+/-	/+-	-	-	+/-	+/-	+/-	+	+	+	-	-

Table 7. Enrichment Factor of soil samples normalized by CVMO-25C (rock sample). Ti was used as element normalizer.

	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
EF 1B _{BS}	1.12	1.00	1.21	0.79	0.32	0.44	0.04	0.04	0.79	1.03	1.63	0.84	1.64	1.67	1.58	1.55	1.47	1.36	1.26	1.18	1.07	1.12	1.12	1.09
EF 1C _{BS}	2.26	1.00	1.57	0.79	0.29	0.40	0.04	0.06	1.40	1.22	2.30	0.85	2.26	2.17	1.99	1.83	1.75	1.59	1.42	1.27	1.23	1.14	1.14	1.03
EF 2A _{BS}	1.91	1.00	2.25	0.98	0.27	0.38	0.045	0.06	1.06	1.42	0.96	1.76	1.11	1.13	1.40	0.59	1.52	1.60	1.65	1.73	1.84	2.02	2.20	2.15
EF 2B1 _{BS}	1.47	1.00	2.44	1.01	0.23	0.32	0.03	0.06	1.09	1.59	1.15	1.74	1.29	1.32	1.52	0.70	1.62	1.67	1.74	1.83	1.89	2.16	2.30	2.22
EF 2B2 _{BS}	1.67	1.00	2.56	1.05	0.25	0.36	0.03	0.06	1.41	1.74	1.34	1.53	1.43	1.46	1.57	0.70	1.66	1.70	1.78	1.90	2.02	2.20	2.29	2.36
EF 2C _{BS}	2.15	1.00	2.63	0.98	0.31	0.21	0.02	0.09	2.17	2.25	1.99	1.54	1.99	2.01	2.07	0.88	2.08	2.13	2.23	2.35	2.55	2.84	2.92	2.89



5. Discussions

5.1. REEs fractionation during magmatic differentiation and hydrothermal alteration

A-type granites usually show weakly fractionated REEs patterns that indicate a relative enrichment in HREEs, as are observed in the Mocambo biotite granite (Figure 18). REEs behave as compatible elements due to their large ionic radii. These elements normally concentrate in the liquid during fractional crystallization. Within the REEs group, HREEs are more incompatible than LREEs, because the ionic radii decreases from the LREEs to HREEs. Thus, these elements tend to be more enriched in more fractionated magmas, and the direct relationship between the increase in REEs and the increase of SiO₂%, or the increase in magma fractionation, is correct.

The REEY-bearing minerals of the biotite granite can be separated into three groups: i) enriched in LREEs, such as allanite, apatite and monazite; ii) enriched in HREEs, such as zircon and thorite; and iii) fergusonite, which appears as a mixture of fergusonite-(Ce), which is enriched in LREEs, and fergusonite-(Y), which is enriched in HREEs (Table 3). Rock samples MO-08 and CVMO-25C, which represent the parent biotite granite respectively, are the most enriched in REEs, especially LREEs. The Mocambo greisen includes other REE-bearing minerals that can be separated into LREE-rich phases, such as bastinäsite and monazite, and HREE-rich phases, such as xenotime-(Y) and hingganite-(Y). The concentration of REEY in the greisen is lower than in the parent granite, but both rocks have similar HREEY contents (Figure 18; Table 4). This is in agreement with the observations of Sanematsu *et al.* (2009) in granites from Laos, where hydrothermal rocks are depleted in REEs relative to the parent granite. The depletion in LREEs is the result of the alteration of allanite and apatite, while the behavior of zircon, which is resistant to the hydrothermal alteration, keeps the HREEY concentration unchanged.

5.2. REEs behavior during weathering

According to Farrah and Pickering (1979), the exchange capacity of certain cations in solution with clay minerals is related to their valence numbers, ionic ratios and ionic strengths. The fractionation between HREEs and LREEs can be explained through a chemical phenomenon known as lanthanide contraction, which consists of decreases in the atomic and ionic radii of REEs with increasing atomic number. Therefore, the LREEs³⁺ are preferentially



adsorbed on mineral surfaces to a greater degree than HREEs³⁺ which are more mobile (Bao and Zhao, 2008). After thousands of years of leaching and accumulation, and given the stability of the soil and the low rate of denudation (Huang *et al.*, 1996; Harlavan and Erel, 2002), significant amounts of REEs can accumulate in the lower parts of soil profiles (B and C horizons). In addition, according to Coppin *et al.* (2002), REEs fractionation is also controlled by the nature of the adsorptive material and the amount of water in the soil. It has been established by some experiments that HREEs are preferentially adsorbed on kaolinite compared to LREEs under high ionic strength and low pH in the solution. The semi-quantitative analyses made on the X-ray diffraction patterns of soil 2 (Table 6) show the lowest concentration of kaolinite in sample 2A_{BS} and the greatest kaolinite abundance in sample 2B1_{BS}. Moreover, samples 2B2_{BS} and 2C_{BS} contain greater amounts of kaolinite than sample 2A_{BS}. High values of REEs can be associated with high concentrations of clay minerals, especially kaolinite and illite, which can be used as a marker of REEs enrichment.

The transport of REEs during weathering is discussed in Bao and Zhao (2008) and Sanematsu *et al.* (2009 and 2013). The first factor to be considered is the resistance of the REE-bearing minerals to weathering. Wu *et al.* (1993) divided these minerals into three groups: i) strongly resistant to weathering, such as xenotime and zircon; ii) moderately resistant to weathering, including fergusonite, monazite and allanite; and iii) weakly resistant to weathering, including bastinäsite, parasite, synchysite-(Y), apatite, etc. The second factor is the environment, the climate and the topography, which control soil formation.

The Mocambo region has a tropical climate and the relief of the granite massif is formed by a topographic high with extensive planar surfaces that favor the formation of *in situ* soil (Figure 25). The soil profiles are in general shallow, but the presence of many REE-bearing minerals seen in thin section, such as xenotime, fergusonite, allanite, bastinäsite and hingganite indicates that these profiles may be enriched in REEY.

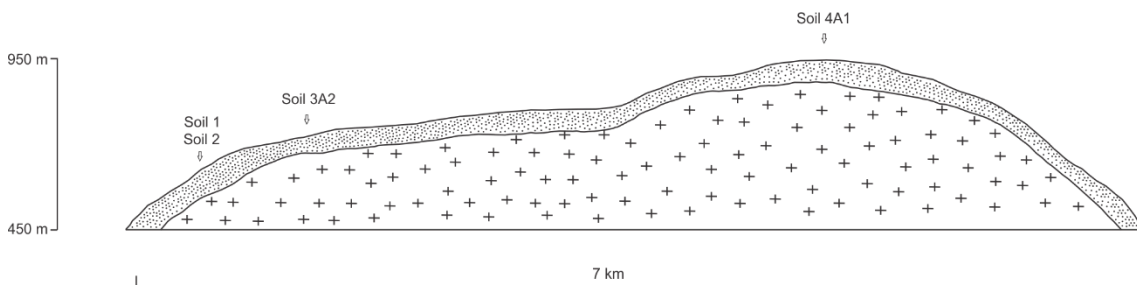


Figure 25. Schematic section in the Mocambo Massif showing its topography, approximate soil thickness and location of soil samples.



According to Bao and Zhao (2008) the leaching of REEs from soil begins with the alteration of the accessory minerals that are weakly resistant to weathering, such as bastinäsite and doverite (synchysite-(Y)). The amount of REEs liberated by the weathering of these minerals is mainly incorporated into secondary minerals. As the weathering progressively increases, minerals more resistant to weathering are also altered and release REEs. These elements are taken up by solutions, especially those with neutral to acidic conditions (low pH), and accumulate within the soil profile. Next, near the top of the profile, the interactions between these ions and the superficial waters allows the leaching of the REEs downwards in the profile, due to the low pH of these solutions, which is caused by contact with the surface and biological CO₂. The re-adsorption of REEY in the lower parts of the soil profile results from the increase in the pH due to the contact of the lower-pH solution with higher-pH groundwater (Coppin *et al.* 2002; Sanematsu *et al.*, 2013). Thus, the A horizon become more enriched in LREEs (less soluble) and the B and C horizons become more enriched in HREEs.

In the Mocambo Massif, the amounts of REEs are almost the same in the parent granite and in the B soil horizon, but lower in the A horizon (Table 4) which is in agreement with larger mobility of REEs in topsoil conditions. Considering all soils samples, between 45 to 58 wt% of the total REEY is exchangeable, with values higher than 600 ppm. Moreover, the clay fraction of all samples present higher values, ranging from 47 to 84 wt% of the total REEY. In details, the single-step extraction analyses show that LREEs are more adsorbed by clay minerals than HREEs, with the exception of the Soil 1B samples, where Soil 1B_{BS} has more adsorbed HREEs than LREEs. The Soil 1B_{CF} has almost the same percentage of REEs adsorbed for LREEs and HREEs (Figure 26). Ce displays anomalous behavior, which will be discussed in Section 5.4.

The soil 2 presents the larger contrast from topsoil to saprolite, with the greatest REEs content in sample 2B_{1BS} and the lowest content on the top of A horizon. The REEs amount decrease on average 18% from the samples 2B_{2BS} and 2C, i.e., lower parts of the soil profile, to sample 2A (Table 4). The REEs Enrichment Factor increase from the surface to saprolite in Soil 1 and 2 (Table 7), in accordance with several authors (Bao and Zhao, 2008; Sanematsu *et al.*, 2009 and 2013; Sanematsu and Kon, 2013). Although Soil 1B has higher REEYs contents, it's Ti content is almost two times higher than Ti content in Soil 1C. The EF and the amounts of kaolinite show REEYs behavior during weathering, as explained above.

5.3. Ce anomaly

The geochemical behavior of Ce is different from the other REEs and must be considered in the discussion of REEY behavior during weathering, as noted by several authors (Bao & Zhao 2008, Sanematsu *et al.* 2009 and 2013 and Sanematsu & Kon 2013). This element occurs in nature as Ce³⁺ and Ce⁴⁺, with the trivalent form being oxidized to the 4+ state



under oxidizing conditions (Brookins, 1983), which is known to be less soluble and more easily fixed into minerals.

The atmosphere is an oxidizing environment, causing the oxidation of Ce^{3+} to Ce^{4+} very quickly by contact with oxygen. Given this feature, during weathering, Ce^{4+} is not leached as the other REEs are, remaining preferentially fixed in Fe and Mn oxides or in cerianite, giving rise to a positive Ce anomaly in the weathering materials. This anomaly can be calculated by $Ce/Ce^* = C_{eN}/(L_{aN}xPr_N)^{1/2}$, where N represents normalization using the C1-chondrite composition (Sun and McDonough, 1989) (Table 4). In other words, the soil profiles tend to be enriched in Ce in the A horizons (positive Ce anomaly), variable in the B horizons (positive or negative Ce anomaly) and depleted in the C horizons (negative Ce anomaly). In the profiles studied, Ce repartition is in agreement with the literature. Soil 2 displays a positive Ce anomaly in the samples 2A_{BS} and 2B_{1BS} and a negative Ce anomaly for the samples 2B_{2BS} and 2C_{BS} (Table 4). Moreover, sample 2A_{BS} has a higher Ce anomaly than sample 2B_{1BS} (1.38 and 1.16, respectively).

Table 8. Enrichment Factor of soil samples normalized by CVMO-10R (rock sample). Ti was used as element normalizer

	EF Soil 4A1	EF Soil 4A2
SiO₂ (%)	0.479	0.587
TiO₂	1.000	1.000
Al₂O₃	0.320	0.626
Fe₂O₃	0.898	0.713
MnO	0.149	0.195
MgO	1.074	0.703
CaO	0.009	0.006
Na₂O	0.003	0.004
K₂O	0.048	0.062
Y₂O₃	0.265	0.214
La₂O₃	0.174	0.193
Ce₂O₃	2.235	0.549
Pr₂O₃	0.230	0.217
Nd₂O₃	0.246	0.235
Sm₂O₃	0.307	0.231
Eu₂O₃	0.113	0.212
Gd₂O₃	0.401	0.231
Tb₂O₃	0.349	0.209
Dy₂O₃	0.362	0.211
Ho₂O₃	0.356	0.245
Er₂O₃	0.382	0.274
Tm₂O₃	0.428	0.310
Yb₂O₃	0.502	0.385
Lu₂O₃	0.466	0.437



Soil 4, especially Soil 4A1, differs from the others because it has the greatest Ce anomaly (Figure 20 and Table 4). The EF for Soil 4 using rock sampled next to Soil 4A2 (CVMO-10R) as background showed a Ce enrichment more than 2 times higher for Soil 4A1 than Soil4A2 (Table 8). This sample was sifted and grains of cerianite were found. Finally, $C_{e_{exch}}$ show values mostly below 10%, while the other values vary from 35% to 83%. This is very clear in the diagrams comparing the samples and their adsorbed content (Figure 26). Results are in agreement with the hypothesis that Ce is hosted in Fe and Mn oxides or in cerianite in soils. It argue once again that Ce behavior in soils differs from other REEs³⁺.

5.4. REEs enrichment during granite weathering

The amount of REEs in the Mocambo Massif is significantly different in rock, saprolite and soil samples. In examining the analyses of rock, soil and clay, it is possible to note that some soil samples, especially soils 1B and 2B (discussed below), are more enriched in REEs than their associated rock samples (Table 40). Saprolite, i.e. hor. C, is commonly depleted in REEs compared to the parent rock, and the soils, i.e. hor. B and A, are enriched in REEs compared to both the saprolite and the rock, depending on the soil horizon. The depletion of REEs in the saprolite is explained by the degree of incompatibility of these elements, making them preferentially solubilized and thus making the saprolite poorer in REEs than rock. These leached elements are transported upward through the soil profile, enriching the soil relative to the saprolite. According to Bao and Zhao (2008) and Sanematsu *et al.* (2009 and 2013), the enrichment in soil can be explained by the presence of clay minerals, such as kaolinite, halloysite and illite, besides goethite. These authors also argue that REEs released from REE-bearing minerals are adsorbed on the surfaces of these clay minerals, as they are in the form of REEs³⁺. This adsorption depends on pH, characteristics of the cation and nature of the adsorptive material. Then the lower REEs content in saprolite can also be explained by the lower amount of scavenging minerals during the firsts steps of weathering and then lower soil REE-adsorbing capacity. Further, as the weathering continue and the amount of clay fraction increased the REEs liberated from primary minerals weathering seems preferentially be retained. Moreover, CFs are more enriched in REEs than the respective soil samples is in agreement with the hypothesis of REEs adsorption on clay minerals. The presence of some REE-bearing grains resistant to weathering, such as zircon, thorite, cerianite and xenotime, also contribute to the REEs enrichment of the soils..

According to Bao and Zhao (2008), thickness of weathering profiles on parent rocks, within an ion-adsorption ore, generally range from 6 to 10 m, but they can reach up to 30 m. In addition, soil horizons with more than 500 ppm of ion-exchangeable REEY and commercially



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências
Dissertação de Mestrado – Ciro Costa Vieira

significant sizes are considered to be ore. In the Mocambo Massif, the average concentration of ion-exchangeable REEY is 600 ppm and the weathering profiles can reach up to 10 m, suggesting a great potential for REEY ore extraction.

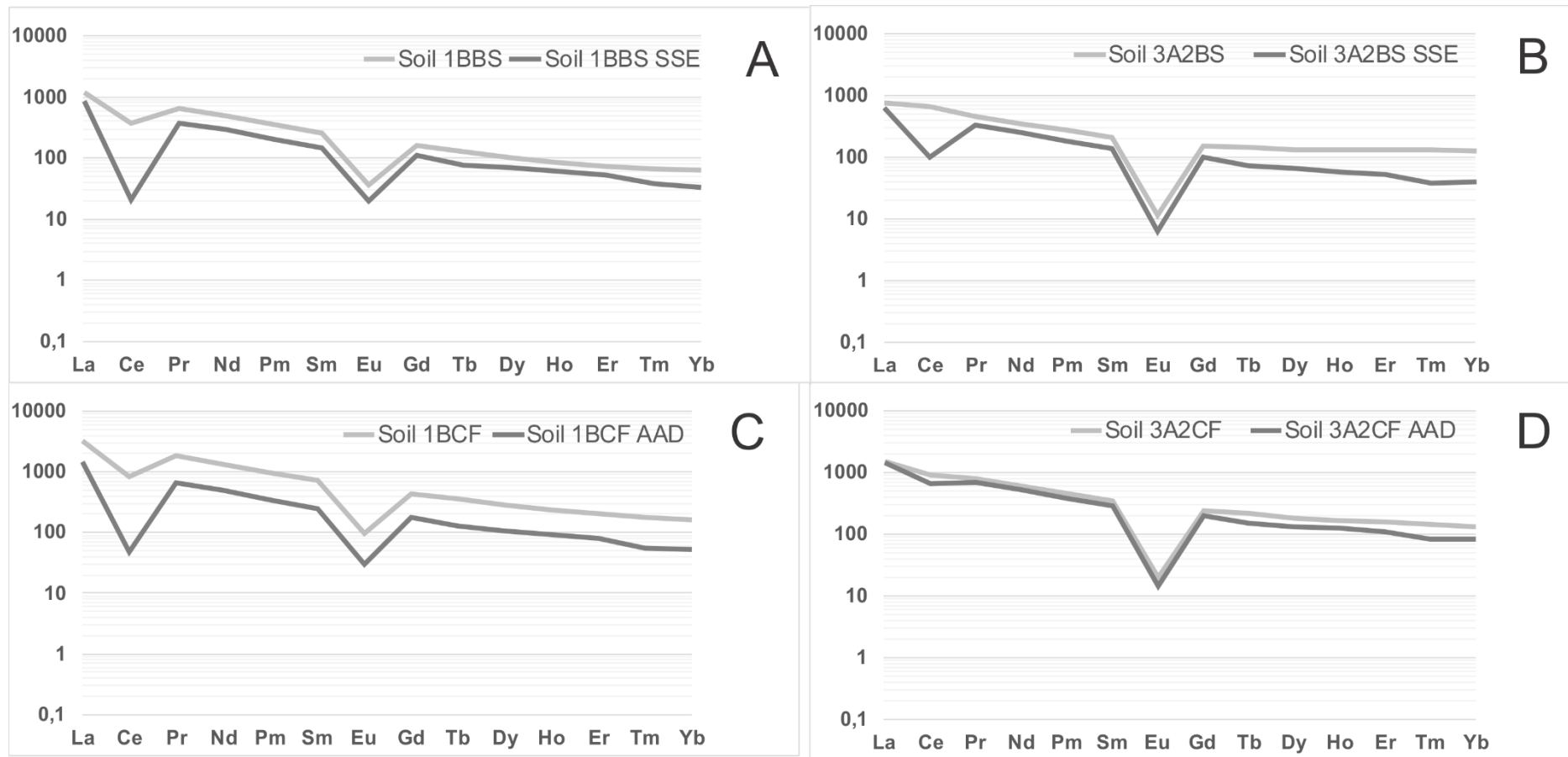


Figure 26. Chondrite-normalized REE diagrams where: BS = Bulk Sample; CF = Clay Fraction, SSE = REE_{exch} from soil and AAD = REE_{exch} from clay.

6. Conclusion

The potential of the Mocambo Massif to host REEY concentrations has been reported in the literature for a long time (Marini & Botelho (1986); Marini *et al.* (1992); Teixeira & Botelho (1999, 2002 and 2006). REEY-bearing minerals observed in the parent granite are apatite, zircon, allanite-(Ce), bastinäsite-(Ce), parasite-(Ce), synshysite-(Ce), thorite, monazite, britholite and fergusonite, while in the greisen the REEY carriers are xenotime, thorite, bastinäsite-(Ce), monazite, zircon and hingganite-(Y).

The parent granite and greisen have 555-1229 ppm and 569 ppm, respectively, of REEY on average. Due to the tropical weather, with high rainfall and warm conditions almost all year, coupled with low rates of denudation, favorable conditions occur with weathered soil profiles varying from a few centimeters to approximately 8 meters (Figures 3 and 25). The strong weathering conditions causes the mobilization of REEY, resulting in an enrichment in LREEs and positive Ce anomalies in the superficial horizon (A horizon). In the lower horizons (B and C horizons).occur enrichment in HREEs and negative Ce anomalies. In soils, between 45 to 58 wt% of the total REEY is exchangeable, with values higher than 600 ppm. Clay fraction samples present higher values, ranging from 47 to 84 wt% of the total REEY. Taken together, our results suggest that these elements are mostly adsorbed on clay minerals. Considering the REEs contents, their forms of occurrence and the thicknesses of the soil profiles, we suggest that Mocambo Massif has a potential for ion-adsorption type REEs deposit, especially for HREEY. Finally, more samples and analyses need to be done, mainly in whole soil profiles, to better characterize and evaluate the massif as a target for REEs extraction.

Acknowledgements

The corresponding author is grateful to the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for having being granted with the scholarship 133247/2014-7. This study was financially supported by CNPq (Projects 550266/2011-9 and 311203/2014-0). We are grateful to the Geosciences Institute of the University of Brasilia for the access to all laboratorial facilities.

6. Discussões e Conclusões

O Maciço Mocambo mostrou-se interessante quanto ao seu conteúdo de ETRY e à possibilidade de um depósito destes elementos. Este apresenta, predominantemente, um biotita granito rosado da série Pb1b da Suíte Pedra Branca, em poucos locais a série Pb1c, e em seu interior um greisen. O granito parental possui como minerais portadores de ETR apatita, zircão, allanita-(Ce), bastnaesita-(Ce), parisita-(Ce), synshysita-(Ce), torita, monazita e fergusonita, enquanto greisen xenotima, torita, bastnaesita-(Ce), torita, monazita, zircão e hingganita-(Y). Estes minerais já evidenciam que o magma parental é rico em ETRY.

O clima tropical da região, com altas temperaturas durante a maior parte do ano e um verão bastante úmido devido ao alto índice pluviométrico, associado a uma baixa taxa de denudação favorecem a formação de perfis de solo, com tamanho variando de alguns centímetros até 8 metros. Durante o intemperismo do granito e a formação do solo os ETR e Y são mobilizados do primeiro, causando um enriquecimento destes nos perfis. Ressalta-se que no horizonte A há um enriquecimento dos ETRL, com anomalia de Ce positiva, e nos horizontes B e C há um enriquecimento dos ETRP, com anomalia de Ce negativa – em alguns casos o horizonte B pode apresentar anomalia de Ce positiva. Esta anomalia é causada pela oxidação do Ce^{3+} em Ce^{4+} , que ocorre rapidamente com o contato deste cátion com a atmosfera. O Ce^{4+} entra na estrutura da Cerianita ou de óxidos de Fe e Mn e assim é menos lixiviado que os outros ETR. Os resultados de extrações químicas no solo confirmam a diferença na partição, com, na média, 46 a 58% de massa para os ETR e apenas 4 a 26% para o Ce, com exceção de um amostra que apresentou 64% de massa para o Ce. Em outras palavras, Ce é menos trocável, o que está de acordo com a incorporação de Ce em óxidos durante a pedogênese. Grãos de cerianita estão presentes na amostra CVMO-09, que é uma amostra superficial e, portanto, também corrobora com a questão.

Obtiveram-se mapas geofísicos de aerogamaespectrometria com o objetivo de correlacionar anomalias gamaespectrométricas com enriquecimento em ETRY nos solos. Entretanto, observou-se que as maiores anomalias correspondiam a lajedos do granito e, portanto, não foi possível esta correlação.

O potencial do maciço é grande, mas são necessárias mais amostragens e análises para uma melhor compreensão da mobilidade dos ETRY. Uma amostragem maior em perfil de solo, com amostras a cada 1 metro do topo até o saprolito é de suma importância para entender por completo o a mobilidade e fracionamento destes elementos. Uma amostragem de solo sobre o greisen, se possível um perfil com diversas amostras que melhor representam os processos pedogenéticos, seria interessante pois esta rocha apresenta maior enriquecimento em ETRPY em relação ao granito parental. Diferentes análises de extração são também importantes para uma melhor compreensão da forma e características químicas de cada elemento dentro de todo o perfil de solo. O Maciço Mocambo apresenta elevados teores de

ETRY mas seus perfis de solo não são muito extensos, quando comparados a perfis de depósitos de ETR principalmente da China. Assim, mais amostras, dados e análises permitirão uma melhor definição de seu real potencial para um depósito de ETRY.

8. Referências Bibliográficas

Alvarenga, C. J. S., Dardenne, M. A., Botelho, N. F., Machado, M. A., Lima, O. N. B., Almeida, T. **2007**. Geologia das folhas Monte Alegre de Goiás (SD.23-V-C-III), Cavalcante (SD.23-V-C-V) e Nova Roma (SD.23-V-C-VI), Escala 1:100.000. *CPRM (Brazilian Geological Survey)/Universidade de Brasília/Instituto de Geociências*. Sheet memoirs. 67 p

Balashov, Y. A., Ronov, A. B., Migdisov, A. A., Turanskaya, N. V. **1964**. The effects of climate and facies environment on the fractionation of rare earths during sedimentation. *Geochemistry International* 10, 951–969.

Bao, Z. & Zhao, Z. **2008** Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. *Ore Geol. Rev.*, 33, 519-535.

Botelho, N.F. 1992. Les ensembles granitiques subalcalins a peralumineux mineralises en Sn et In de la Sous-Province Paranã, etat de Goiás, Bresil. PhD. Thesis. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). 344 p.

Boulangé, B. and Colin, F. **1994**. Rare earth element mobility during conversion of nepheline syenite into lateritic bauxite at Passa Quatro, Minas Gerais, Brazil. *Applied Geochemistry* 9, 701–711.

Braun, J.-J., Viers, J., Dupré, B., Polve, M., Ndam, J., Muller, J.-P. **1998**. Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: the implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 273–299

Brookins, D.G., **1983**. Eh–pH diagrams of REE at 25 °C and one bar pressure. *Geochemical Journal* 17, 223–229.

Coppin F., Berger G., Bauer A., Castet S., Loubet M. **2002**. Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chemical Geology* 182:57–68.

Duddy, L. R. **1980**. Redistribution and fractionation of rare-earth and other elements in a weathering profile. *Chemical Geology* 30, 363–381.

Farrah, H., Pickering, W.F., **1979**. pH effects in the adsorption of heavy metal ions by clays. *Chemical Geology* 25, 317–326.

Floss, C. and Crozaz, G. **1991**. Ce anomalies in the LEW85300 eucrite: evidence for REE mobilization during Antarctic weathering. *Earth and Planetary Science Letters* 107, 13–24.

Foley, N.K., De Vivo, B., Salminen, R. **2013**. Rare Earth Elements: The role of geology, exploration, and analytical geochemistry in ensuring diverse sources of supply and a globally sustainable resource. *Journal of Geochemical Exploration*, 133 1-5.

Fritz, S.J. **1988**. A comparative study of gabbro and granite weathering. *Chemical Geology* 68, 275–290.

Goldstein, S. J. and Jacobson, S. B. **1988**. Rare earth elements in river waters. *Earth and Planetary Science Letters* 89, 35–47.

Harlavan, Y., Erel, Y., **2002**. The release of Pb and REE from granitoids by the dissolution of accessory phases. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 837–848.

Hatch, G. **2012**. Rare-Earth Terminology – A Quick Refresher On The Basics. In News Analysis, Rare Earthsm Tools & Metrics (accessed in <http://www.techmetalsresearch.com/2012/12/rare-earth-terminology-a-quick-refresher-on-the-basics/> on January 1, 2017).

<http://www.reehandbook.com/definition.html> (accessed on January 1, 2017).

[http://webmineral.com/data/Hingganite-\(Y\).shtml#.WHP_0PkrLIU](http://webmineral.com/data/Hingganite-(Y).shtml#.WHP_0PkrLIU) (accessed on January 1, 2017).

Huang, D.H., Wu, C.G., Han, J.Z. **1989**. REE geochemistry and mineralization characteristics of the Zudong and Guanxi Granites, Jiangxi Province. *Acta Geol. Sin.* 2, 139–157.

Huang, Z.G., Zhang, W.Q., Chen, J.H., Liu, R.H., He, Z.Y., **1996**. Lateritic Weathering Crust in South China. *Ocean Publishing House*, 312 pp. (in Chinese).

Lenharo, S.L.R., Moura, M.A., Botelho, N.F. **2002**. Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: Examples from Pitinga and Goiás, Brazil. *Precambrian Research*, 119: 277-299

Marini, O.J.; & Botelho, N.F. **1986** A Província de Granitos Estaníferos de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 16. 119-131.

Marini, O.J.; Botelho, N.F. & Rossi, Ph. **1992** Elementos terras raras em granitóides da província estanífera de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 22, 61-72.

Martin, J. M., Hogdahl, O., Philippot, J. C. **1976**. Rare earth elements supply to the oceans. *Journal of Geophysical Research* 81, 3119–3124.

Middelburg, J. J., Van der Weijden, C. H., Woittiez, J. R. W. **1988**. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. *Chemical Geology* 68, 253–273

Murakami, H., & Ishihara, S. **2008** REE mineralization of weathered crust and clay sediment on granitic rocks in the Sanyo belt, SW Japan and southern Jiangxi province, China. *Resource Geol.*, 58, 373-401.

Nesbitt, H. W. **1979**. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature* 279, 206–210.

Nesbitt, H.W.; & Young, G.M. **1982** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element geochemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.

Nesbitt, H. W., Markovics, G. **1997**. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1653–1670.

Patino, L. C., Samuels, A. C., Carr, M. J., Feigenson, M. D. **1998**. The effects of weathering on the REE profiles of lavas from Southeast Guatemala. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 30 (7), 92.

Pimentel, M.M., Heaman, L., Fuck, R.A., Marini, O.J., **1991**. U–Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-type acid magmatism in central Brazil. *Precambrian Research* 52, 321–335.

Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Botelho, N.F., **1999**. Granites and the geodynamic history of the Neoproterozoic Brasilia Belt: a review. *Lithos* 46, 463–483.

Price, R.C., Gray, C.M., Wilson, R.E., Frey, F.A., Taylor, S.R. **1991**. The effects of weathering on REE, Y and Ba abundance in Tertiary basalts from southeastern Australia. *Chemical Geology* 93, 245–265.

Rickwood P. C. **1989**. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements: *Lithos*, v. 22, p. 247-263.

Rocha, A.; Schissel, D.; Sprecher, A.; Tarso, P. and J. Goode, J., **2013**. Process Development for the Serra Verde Weathered Crust Elution-deposited Rare Earth Deposit in Brazil. In *Rare Earth Elements – Proceedings of the 52nd Conference of Metallurgists (COM 2013)*, Edited by I. London, J. Goode, G. Moldoveanu and M. Rayat. Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (MetSoc-CIM), Montreal, Canada, 2013.

Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., Duangsurigna, S., Vilayhack, S. **2009** Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol.60 (11/12), 527-558.

Sanematsu, K., Kon, Y., Imai, A., Watanabe, K. and Watanabe, Y. **2013** Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand. *Mineral. Deposita*, **48**, 437-451.

Sanematsu, K. and Kon, Y. **2013** Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion-adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, **64**, 313-330.

Sanematsu, K., Ejima, T., Kon, Y., Manaka, T., Zaw, K., Morita, and yuna Seo, Y. **2016**. Fractionation of rare-earth elements during magmatic differentiation and weathering of calc-alkaline granites in southern Myanmar. *Min. Mag.*, 80(1): 77-102.

Santana, I. V.; Wall, F., Botelho, N. F., **2015**. Occurrence and behaviour of monazite-(Ce) and xenotime-(Y) in detrital and saprolitic environments related to the Serra Dourada granite, Goiás/Tocantins State, Brazil: potential for REE deposits. *Journal of Geochemical Exploration* 155, 1–13.

Sharma, A. and Rajamani, V. **2000**. Major element, REE and other trace element behaviour in amphibolite weathering under semiarid conditions in southern India. *Journal of Geology* 108, 487–496.

Sholkovitz, E. R. **1992**. Chemical evolution of rare earth elements: fractionation between colloidal and solution phases of filtered river waters. *Earth and Planetary Science Letters* 114, 77–84.

Sholkovitz, E. R. **1995**. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquatic Biochemistry* 1, 1–34.

Sun, S. S. & McDonough, W. F. **1989**. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds) *Magmatism in the ocean basins* (Geological Society Special Publication, no. 42). pp 313–345.

Teixeira, L.M. **2002** Caracterização de Minerais Portadores de Terras Raras e sua Aplicação à Petrologia e Geocronologia de Granitos das Subprovíncias Tocantins e Paranã – Goiás. *Tese (Doutorado)*. Universidade de Brasília.

Teixeira, L. M. & Botelho, N. F. **1999**. Comportamento dos elementos Terras Raras Pesadas em zircão, xenotima e torita de granitos e greisens da Subprovíncia Estanífera Paranã, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(4): 549-556.

Teixeira, L. M. & Botelho, N. F. **2002**. Comportamento cristalquímico de monazita primária e hidrotermal durante a evolução de granitos e greisens: exemplos das Subprovíncias Tocantins e Paranã, Goiás. *Revista Brasileiro de Geociências*, 32(3): 335-342.

Teixeira, L. M. & Botelho, N. F. **2006**. Comportamento geoquímico de ETR durante evolução magmática e alteração hidrotermal de granitos: exemplos da Província Estanífera de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(4): 679-691.

Topp, S. E., Salbu, B., Roaldset, E., Jorgensen, P. **1984**. Vertical distribution of trace elements in laterite soil (Suriname). *Chemical Geology* 47, 159–174

U.S. Geological Survey, **2013**. Mineral Commodity Summaries. *REE*, p. 130–131.

U.S. Geological Survey, **2016**. Mineral Commodity Summaries. *REE*, p. 134–135

Whalen, J.B., Currie, K.L., and Chappell, B.W., **1987**. S-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 95, p. 407-419.

Wu, C.; Huang, D. & Guo, Z. **1990** REE geochemistry in the weathered crust of granites, Longnan area, Jiangxi province. *Acta Geol. Sinica*, 3, 193-210.

Wu, C.Y., Lu, H.L., Xu, L.M., Hou, L., **1993**. A preliminary study on modes of occurrence of rare earth elements in the tropicalsubtropical weathering crust of Nanling region. *Mineral Deposits* 12, 297–307 (in Chinese with English abstract).

Wyllie, P.J.; Jones, A.P.; & Deng, J. **1996** Rare earth elements in carbonate-rich melts from mantle to crust. In: Jones, A.P.; Wall, F. & Williams, C.T. **1996** Rare Earth Minerals: Chemistry, origin and ore deposits Mineralogical Society Series 7. *Chapman and Hall*, London, p.82.

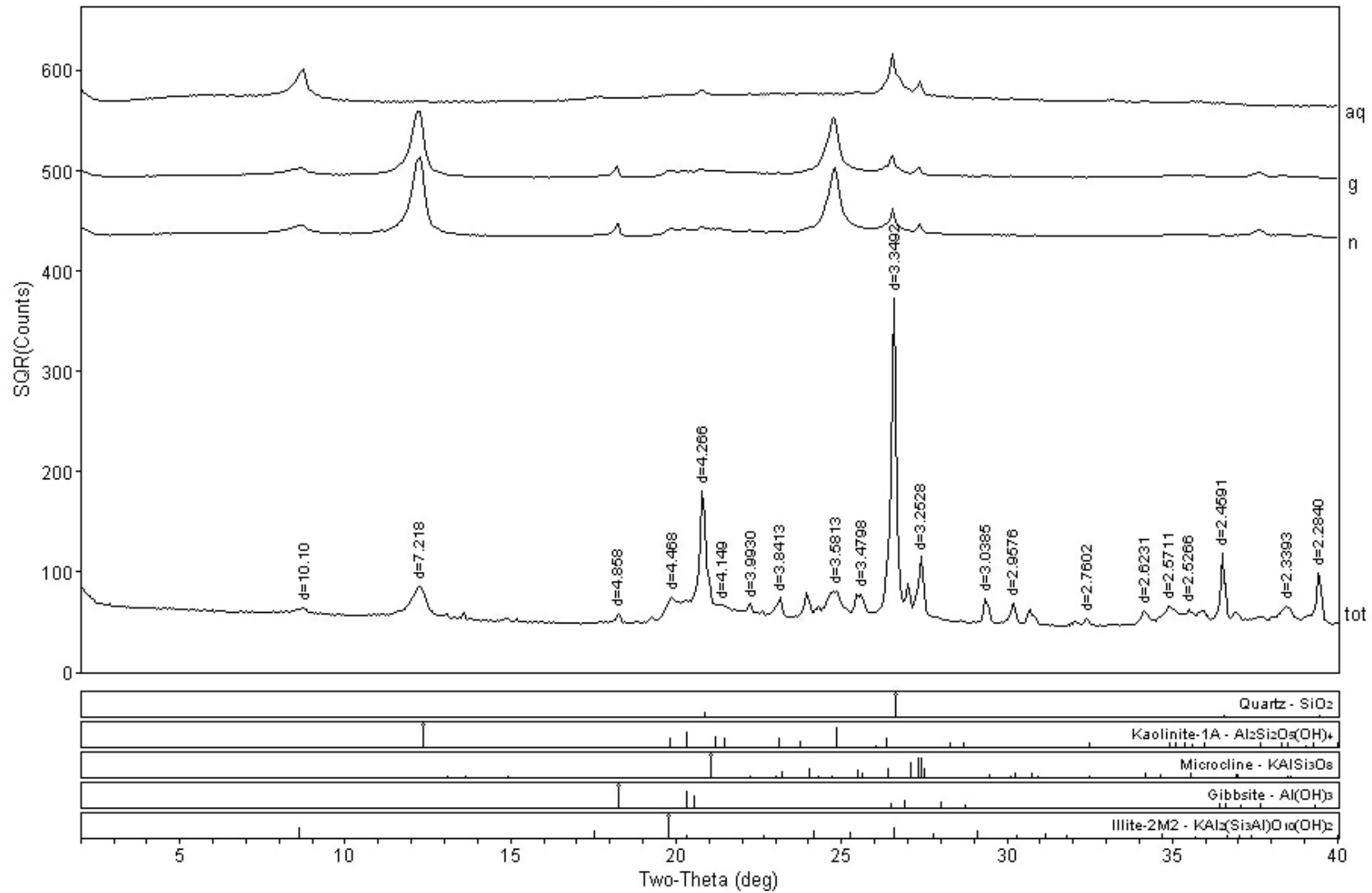
Yang, Y.Q., Hu, Z.S., Luo, Z.M., **1981**. Geological characteristics of mineralization of rare earth deposits of the ion-adsorption type and their prospecting direction. *Bulletin of Institute of Mineral Deposit*, Chinese Academy of Geological Sciences, vol. 2, pp. 102–118 (in Chinese with English abstract).

Anexos

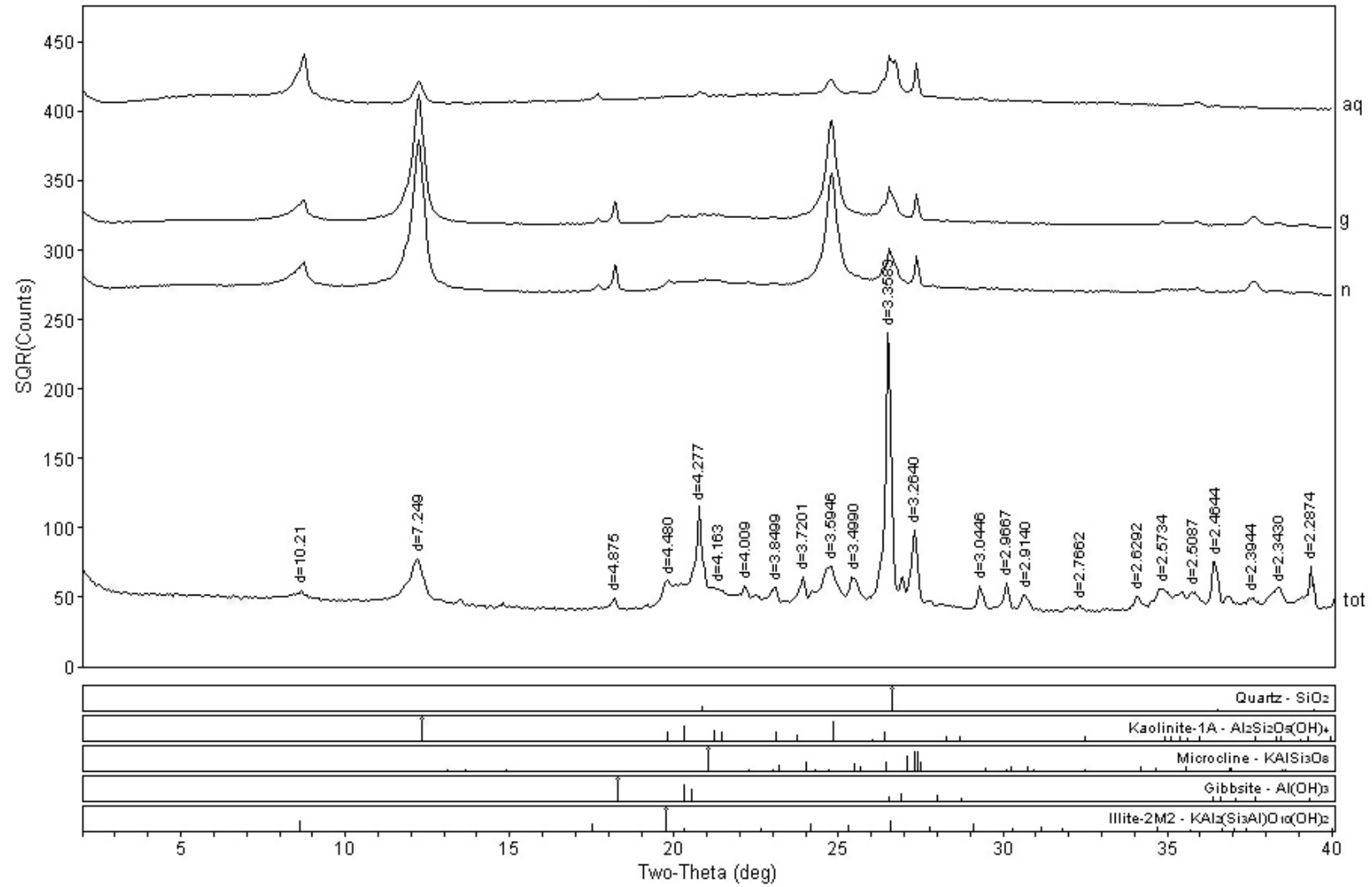
Difratogramas de raios X das Amostras CVMO-08A – D e CVMO-25D – E

Análises de Microsonda Eletrônica dos minerais: apatita, zircão, torita, parisita, allanita, bastnaesita, monazita, hingganita e xenotima.

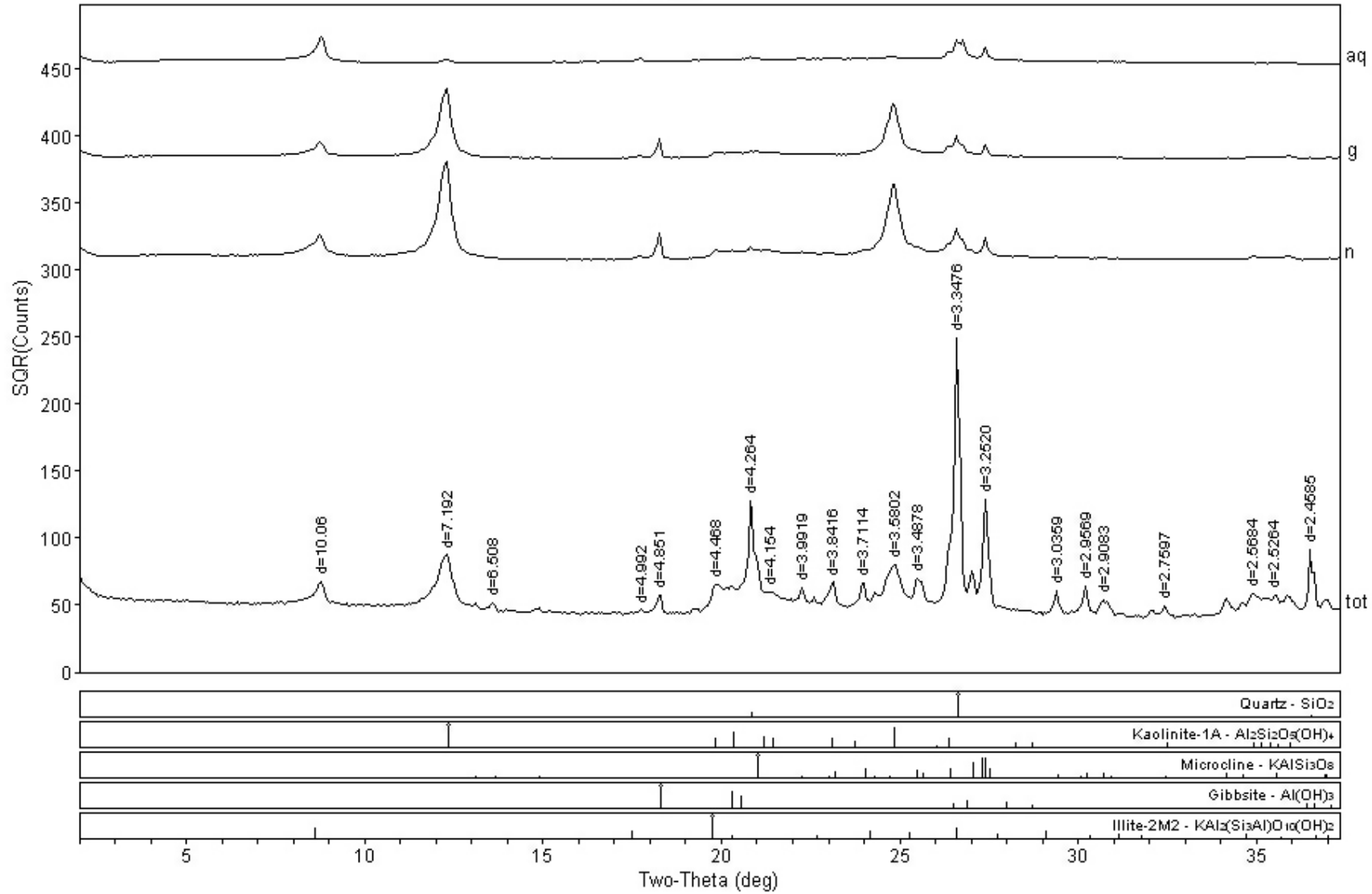
Soil 2A



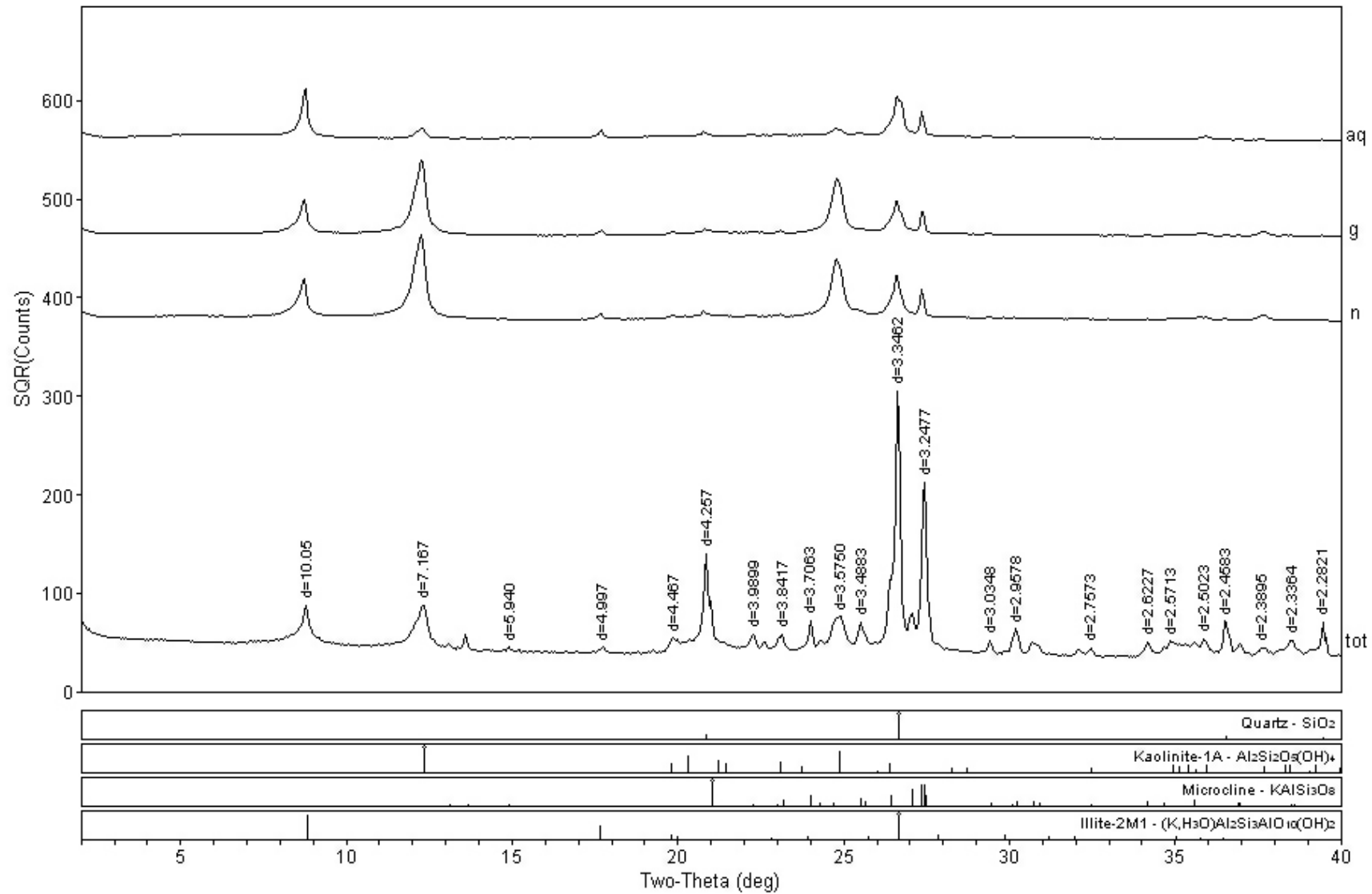
Soil 2B1



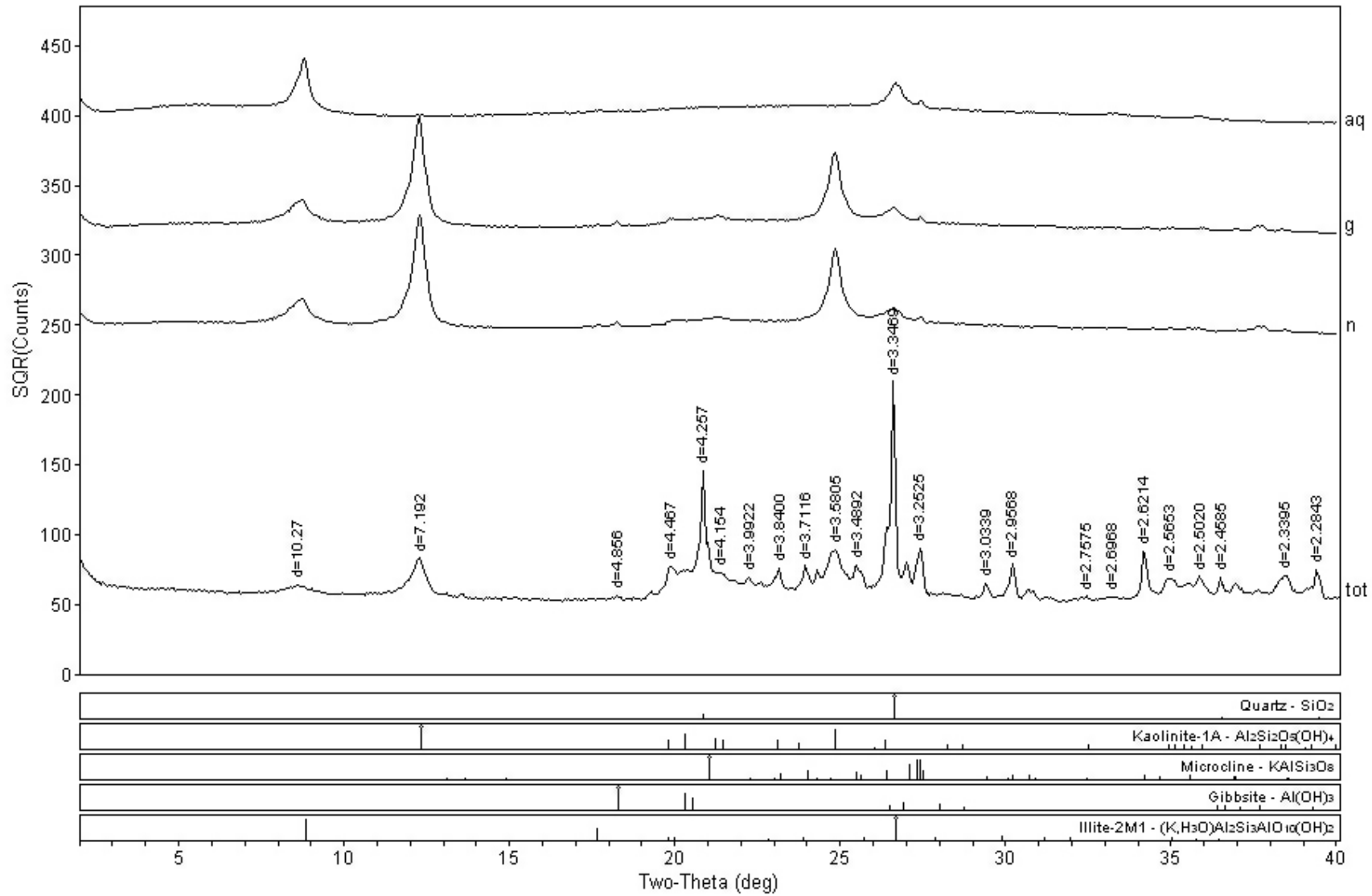
Soil 2B2



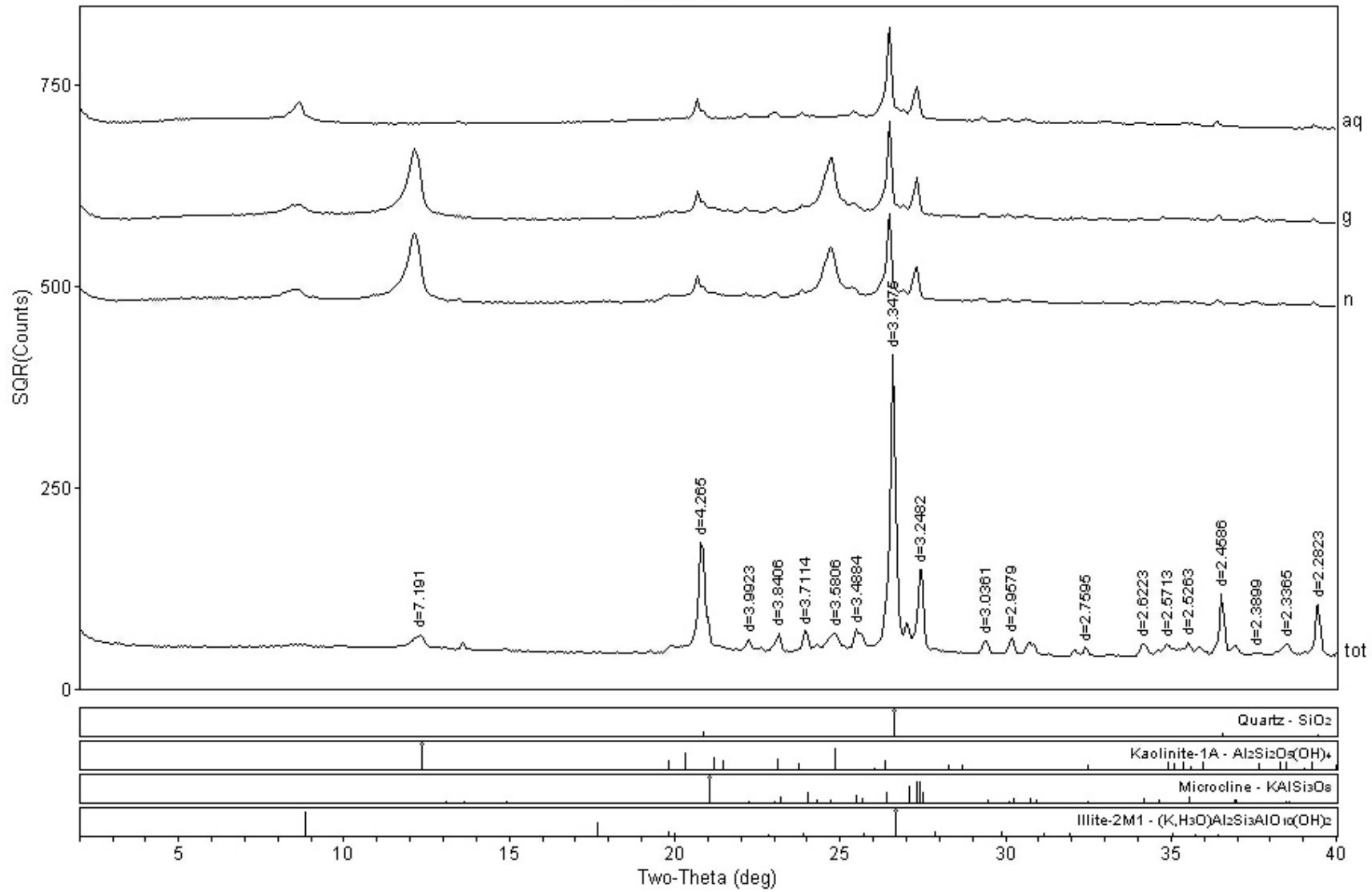
Soil 2C



Soil 1B



Soil 1C



ZIRCÃO															
Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
0	33,191	0,027	0,095	0	0,243	0	0	0,345	0,14	64,572	0	0	0	0	0
0,003	33,023	0,017	0,365	0	0	0	0	0	0,134	63,45	0,009	0,091	0	0	0
0	32,899	0,091	0,421	0,033	0,006	0,16	0	0,126	0,273	64,594	0,012	0	0	0,013	0
0	33,123	0,039	0,369	0,039	0,095	0,13	0,046	0	0,114	64,842	0,001	0,071	0	0	0,006
0,006	32,998	0,076	0,151	0,077	0,083	0,207	0,069	0,144	0	64,921	0	0	0	0	0,022
0,032	32,713	0,117	0,588	0	0,059	0,122	0,103	0,044	0,099	64,689	0,024	0,05	0,004	0	0
0,095	26,752	0,105	0,204	0,106	0	0,164	0	0	0,132	60,345	0,007	0,083	0,001	0	0
3,226	31,026	0	0,383	0,147	0	0,154	0	0,227	10,122	52,179	0,009	0,067	0,033	0	0,095
0,005	33,024	0,014	0,144	0	0	0	0	0,259	0	62,908	0	0,007	0,051	0	0
0	32,319	0,036	0,197	0	0,023	0,191	0,211	0,191	0,283	63,957	0,025	0	0	0	0
0,014	32,314	0,039	0,321	0	0	0,086	0	0,048	0,292	62,339	0,002	0,048	0	0	0
0,008	33,052	0,111	0,367	0,032	0,116	0,294	0	0,08	0,06	65,049	0	0	0	0	0
0,003	32,845	0	0,202	0,098	0,053	0,014	0,102	0,154	0,074	62,72	0,016	0	0	0	0
0,032	31,39	0,063	0,379	0	0,078	0,357	0	0	0,132	68,315	0	0	0,038	0	0
0	32,723	0,128	0,151	0	0	0,117	0,047	0,193	0,144	62,956	0,007	0	0,12	0	0
0	32,811	0,034	0,39	0,063	0,118	0,179	0	0	0,024	64,412	0,012	0,1	0,028	0,028	0,013
0,028	32,903	0,091	0,407	0,007	0	0,056	0	0	0,3	64,108	0,001	0,06	0,039	0	0,052
0	32,793	0,06	0,186	0,042	0,183	0,129	0,056	0	0,142	65,378	0,001	0,163	0	0	0,013
0,018	33,045	0,026	0,381	0,064	0,106	0,226	0,069	0	0,126	64,134	0	0,096	0	0	0,033
0	32,819	0,083	0,226	0,082	0	0,124	0	0	0,17	64,943	0	0,131	0,053	0	0
0,014	32,754	0,042	0,41	0,063	0,124	0,323	0,128	0,105	0,165	64,545	0,019	0	0,069	0,048	0,008
0	32,48	0	0,389	0,033	0,147	0,322	0	0,066	0,207	63,816	0,013	0,041	0,015	0	0,083
0,005	32,288	0,198	0,401	0,053	0,077	0,598	0,078	0,096	0,182	67,763	0,006	0,043	0	0	0,133
0	33,34	0,133	0,447	0,093	0,012	0,33	0	0	0,055	63,395	0	0,144	0	0	0
0,204	32,723	0,075	0,536	0,107	0,124	0,38	0,025	0,02	1,18	63,866	0,005	0	0,063	0	0,043
0	33,4	0,036	0,101	0,025	0	0,197	0	0,055	0	64,348	0	0,165	0,048	0	0,058
PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0	0,001	0	0,014	0	0	0	0	0,113	0	0,056	0	0,043	0	0,009	98,613
0	0,008	0	0	0	0	0	0	0,099	0	0,022	0	0,024	0	0	97,092
0	0,003	0	0	0,021	0	0	0	0,136	0	0,075	0	0,002	0	0,009	98,628
0	0	0	0	0,028	0	0	0,015	0,104	0,005	0,011	0,029	0,002	0	0	98,875
0	0	0	0	0,027	0	0	0,014	0,066	0	0,004	0,098	0,013	0	0,035	98,754
0	0	0	0	0	0	0	0	0,117	0	0,062	0,038	0	0	0	98,644
0	0	0,011	0	0,054	0	0	0,002	0,116	0	0,003	0,015	0,001	0	0,009	87,994
0	0,008	0	0	0	0	0	0	0,075	0,008	0,009	0	0	0	0	97,668
0	0,005	0	0	0	0,038	0	0,033	0,143	0	0	0	0	0	0,038	96,412
0	0,004	0	0	0,023	0	0	0	0,148	0,021	0,067	0,055	0	0	0,001	97,433
0	0,005	0	0,045	0,016	0	0	0,011	0,142	0	0,044	0,01	0,024	0	0	95,503
0	0	0,01	0,025	0,037	0	0	0	0,109	0,001	0,019	0,059	0,005	0,072	0,009	99,169
0	0,004	0,017	0,011	0	0	0	0,039	0,15	0	0,04	0,046	0,01	0,022	0,015	96,281
0	0,014	0	0	0	0,042	0	0,027	0,098	0,004	0,024	0,044	0	0,099	0,001	100,784
0	0	0	0,034	0,021	0	0	0,027	0,125	0	0	0,052	0	0	0,005	96,586
0	0,004	0	0	0,02	0,012	0	0,021	0,106	0	0,018	0,042	0	0	0,001	98,212
0	0,038	0	0,029	0,006	0	0	0,018	0,139	0	0,002	0,014	0,008	0	0,004	98,052
0	0,01	0,031	0	0	0	0	0	0,162	0	0	0,019	0,002	0	0,01	99,146
0	0	0,06	0,035	0	0	0	0	0,132	0	0,043	0,022	0,005	0	0	98,324
0	0,017	0,04	0	0	0	0	0,04	0,033	0	0,08	0,021	0,01	0	0,01	98,631
0	0,005	0,024	0,005	0	0	0	0	0,209	0	0	0,027	0,004	0	0	98,817
0	0,011	0	0,048	0	0	0	0	0,149	0	0,005	0,047	0,001	0	0,013	97,612
0	0,003	0,04	0	0	0,005	0	0,052	0,034	0	0	0	0	0,153	0,001	101,921
0	0,002	0	0	0,074	0	0	0,009	0,146	0	0,094	0,003	0	0	0	97,949
0	0	0,026	0	0	0	0	0,013	0,1	0,107	0,075	0,031	0,023	0	0,02	99,351
0	0	0	0,086	0	0,016	0	0	0,035	0	0,044	0,009	0,022	0	0	98,433

																ZIRCÃO															
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3															
0	0,082	31,835	0,133	0,421	0	0	0,224	0	0,183	0,245	62,78	0,011	0,057	0,045	0	0,025															
0	0	32,311	0,073	0,219	0	0	0,222	0,189	0	0,111	68,84	0,018	0	0,128	0	0,051															
0	0,009	31,944	0,071	0,431	0	0	0,268	0,101	0	0	70,559	0,019	0	0,059	0,025	0,064															
0	0,078	32,198	0,073	0,474	0,045	0,083	0,101	0,175	0,015	0,179	64,924	0	0,073	0,059	0	0															
0	0,003	32,493	0,1	0,551	0,055	0,024	0,721	0	0,011	0,236	65,294	0,005	0,059	0,068	0,036	0,087															
0	0,001	32,326	0,112	0,231	0	0,042	0,126	0	0	0,007	63,179	0,004	0,028	0,085	0	0,123															
0	0,051	31,133	0,601	0,355	0,05	0,1	1,039	0,136	0,175	0,458	63,344	0,046	0,014	0,07	0	0,019															
0	0,016	33,463	0,03	0,16	0	0,045	0	0,011	0	0,028	67,938	0	0,184	0,098	0	0,045															
0	0,034	32,919	0,088	0,197	0	0	0,147	0,249	0,057	0,154	66,958	0,007	0	0,022	0	0,058															
0	0,015	32,66	0,053	0,43	0	0,056	0,292	0,1	0	0,101	69,651	0	0,024	0,099	0	0,122															
0	0,014	32,785	0,065	0,214	0,054	0	0,364	0	0	0,123	64,959	0,005	0,058	0,131	0	0,049															
0,034	0,364	21,288	0,167	0,49	0,057	0	0,903	0,099	0,937	0,53	49,631	0,013	0	0,028	0,014	0,68															
0	0,034	31,875	0,25	0,464	0,036	0	0,523	0,023	0,206	0,614	64,935	0,002	0	0,211	0	0,17															
0	0	31,574	0,195	0,284	0	0	0,676	0	0,133	0,342	61,149	0,023	0	0,06	0	0,168															
0	0,003	32,279	0,163	0,566	0	0	0,797	0	0,262	0,414	64,394	0,041	0,052	0,081	0	0,128															
0,036	0,041	32,239	0,32	0,207	0	0	0,642	0	0,019	0,271	68,761	0,043	0	0,1	0	0,205															
0	0,31	32,777	0,008	0,326	0	0,029	0,246	0,212	0,124	0,271	61,619	0,161	0,039	0,089	0	0,071															
0	0,014	31,649	0,27	0,436	0,061	0,017	0,821	0,19	0,09	0,385	67,019	0	0	0,118	0	0,166															
0	0,001	33,193	0,052	0	0	0,201	0,05	0	0	0,1	64,334	0,01	0	0,14	0,022	0,205															
0	0	31,323	0,246	0,085	0,011	0,05	0,181	0,281	0,16	0,373	66,267	0,046	0	0,159	0	0,29															
0	0,043	32,092	0,076	0	0	0	0,409	0,154	0,124	0,376	61,225	0,072	0	0,175	0	0,264															
0,166	0	29,006	0,461	0,337	0,24	0	0,803	0,238	1,757	1,282	58,116	0,123	0	0,355	0,021	0,581															
0	0,061	28,63	0,665	0,385	0	0	0,84	0,127	0,722	0,801	55,751	0,086	0,041	0,165	0	0,195															
0	0	31,993	0	0,505	0,14	0	0,078	0,013	0	0,088	66,746	0,037	0,146	0,388	0,013	0,526															
0	0,013	32,711	0,135	0,125	0,013	0,05	0,481	0,069	0	0,33	68,271	0,075	0,018	0,428	0,069	0,461															
0	0,169	29,09	0,444	0,315	0,14	0	0,68	0,214	0,2	1,102	59,616	0,032	0	0,372	0	0,514															
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total															
0	0	0,002	0	0,053	0,019	0	0	0,003	0,091	0,028	0,135	0	0,046	0	0	96,041															
0	0	0,003	0	0	0	0	0	0,014	0,09	0	0,036	0	0,02	0,166	0	102,162															
0,023	0	0,003	0	0,074	0	0,027	0	0,033	0,176	0,017	0,074	0	0	0,03	0,003	103,55															
0,039	0	0,202	0	0,059	0,002	0	0	0,001	0,144	0,019	0	0	0	0	0,037	98,477															
0,062	0	0	0	0,028	0,017	0	0	0,042	0,157	0	0,027	0	0,022	0,028	0,019	99,743															
0	0	0	0,047	0,014	0,017	0	0	0,061	0,127	0	0	0	0,034	0,093	0,042	96,264															
0	0	0,023	0,079	0	0	0,057	0	0,019	0,099	0	0,033	0	0,02	0,197	0	97,591															
0,032	0	0,01	0,051	0	0	0	0	0,035	0,117	0	0,041	0,001	0,024	0,04	0	102,018															
0	0	0	0,003	0,066	0,057	0	0	0,055	0,225	0	0	0	0,01	0,137	0,055	100,89															
0,03	0	0,013	0	0,004	0,049	0,005	0	0,027	0,15	0	0,057	0,033	0,023	0,072	0,003	103,603															
0	0	0	0,017	0	0	0	0	0	0,152	0,057	0,199	0,013	0,076	0	0,027	98,821															
0	0,01	0,02	0,026	0	0	0,015	0	0,032	0	0	0,026	0	0,033	0,031	0,026	75,235															
0,004	0	0,015	0,011	0	0	0,028	0	0,092	0,18	0,012	0,062	0,035	0	0,157	0	99,343															
0,028	0	0,012	0	0,031	0,062	0,027	0	0,226	0	0	0,009	0,02	0,005	0,311	0	94,604															
0,009	0	0,038	0	0,037	0	0	0	0,153	0,158	0	0,038	0,003	0	0,249	0	99,18															
0,008	0	0,094	0,032	0	0	0,017	0,106	0,035	0,095	0	0,008	0,045	0	0,251	0	102,884															
0,026	0	0,028	0	0	0,013	0	0	0,16	0,089	0	0,219	0	0,031	0,095	0,029	96,282															
0	0	0	0,036	0,038	0,017	0	0	0,113	0,219	0,018	0,268	0,022	0,046	0,115	0,027	101,236															
0,073	0	0,04	0,043	0	0,036	0	0	0,091	0,141	0,05	0,234	0,013	0,107	0,011	0,028	98,308															
0	0	0,013	0,073	0	0,017	0	0,027	0,151	0,17	0,005	0,006	0,048	0,012	0,477	0,011	99,472															
0	0	0,022	0,023	0	0,107	0	0,107	0,02	0,133	0,027	0,193	0	0,104	0,237	0,026	95,01															
0,064	0	0,205	0	0	0,007	0	0,034	0,06	0,108	0	0,071	0	0	0,216	0,002	93,486															
0,094	0	0,057	0,042	0,017	0	0	0	0,218	0,259	0	0,005	0,058	0,034	0,555	0,024	88,469															
0,047	0	0,07	0	0	0	0	0,086	0,491	0,083	0,016	0,053	0	0,014	0,075	0	100,673															
0,035	0	0,186	0,045	0	0,076	0	0,174	0,227	0,012	0	0,022	0,003	0,022	0,344	0	103,249															
0,047	0	0,018	0,007	0,01	0,035	0,005	0,302	0,935	0,149	0	0,036	0	0,039	0,163	0,026	92,888															

TORITA																
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
2,407	0,145	14,02	0,949	4,606	0	0,171	7,958	0,16	0,662	6,926	1,266	0	0,328	0,63	0,114	0,727
2,829	0,148	14,996	0,856	0,031	0,003	0,011	4,246	0	0,44	5,194	0	0	0,168	0,303	0	0,145
2,539	0,251	15,055	0,574	0,145	0,12	0	3,653	0,073	1,807	3,398	0	0	0	0,218	0	0,069
2,966	0,219	16,277	0,598	1,171	0,111	0,193	3,264	0	1,102	0,441	0,283	0	0,244	0,572	0	0,818
3,608	0,071	14,291	0,461	0	0	0	9,298	0	0,212	1,838	0	0	0,089	0,512	0,004	0,429
2,993	0,125	15,957	0,592	0,001	0	0,088	5,547	0	0,854	0,573	0	0	0,116	0,718	0,013	0,609
3,375	0,112	14,366	0,36	0,142	0,037	0	9,191	0,121	0,429	0,606	0	0	0	0,699	0,022	0,654
2,342	0,27	17,628	0,43	0,14	0,057	0,098	8,078	0,246	0,681	3,698	0	0,001	0,14	0,805	0,124	0,651
2,626	0,247	16,438	0,317	0,09	0	0,145	7,991	0	0,086	2,191	0,152	0,001	0,16	0,64	0,206	0,536
2,314	0,243	16,984	0,389	0,031	0,178	0,198	4,532	0,121	0,919	2,367	0	0	0,193	0,309	0	0,291
3,122	0,021	12,504	0,356	0	0,026	0	7,806	0,072	0,423	2,176	0	0	0,129	0,59	0	0,658
2,584	0,518	16,31	0,275	0	0,025	0	3,089	0	0,672	0,654	0	0,011	0,26	0,456	0,026	0,3
2,893	0,661	16,822	0,353	0	0	0	3,113	0	0,579	0,688	0	0,011	0,109	0,258	0	0,21
1,66	1,178	20,473	0,042	0	0	0	0,478	0	1,116	1,646	0	0	0,068	0,074	0	0,021
1,7	1,039	20,083	0	0	0,08	0,042	0,157	0	1,554	1,376	0	0	0,08	0,106	0	0
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,169	0,202	0	0	0,05	0,406	0,043	0,663	42,061	0	0	0,237	0	0,18	2,391	0	87,47
0	0,093	0,007	0,118	0,024	0,533	0,083	0,422	58,204	0	0,09	0,364	0,074	0,261	1,66	0	91,30
0,024	0,22	0,024	0,189	0,054	0,212	0	0,041	51,45	0	0,024	0,233	0	0,191	8,294	0	88,86
0,059	0	0,048	0,08	0	0,377	0,097	0,712	51,015	0	0	0,12	0	0,071	3,563	0	84,40
0,096	0	0,002	0,122	0,053	0,381	0	0,389	52,188	0,018	0	0,178	0	0,137	8,443	0,02	92,84
0,246	0,096	0	0	0	0,409	0	0,623	49,507	0	0,018	0,171	0	0,143	4,48	0	83,88
0,139	0	0,024	0,023	0,07	0,428	0	0,845	46,93	0,004	0,023	0,183	0,059	0,155	5,54	0	84,54
0,244	0,054	0,006	0,141	0	0,464	0	0,781	48,336	0	0,083	0,484	0,058	0,329	3,233	0,017	89,62
0,201	0,081	0,057	0	0,069	0,481	0	0,738	50,442	0,005	0,039	0,227	0,057	0,11	3,519	0	87,85
0,113	0,146	0	0,085	0	0,285	0	0,375	51,634	0	0	0,341	0,067	0,204	6,492	0	88,81
0,222	0	0,017	0,009	0	0,348	0	0,761	57,578	0	0,032	0,365	0,008	0,245	2,658	0	90,13
0,094	0	0,015	0,462	0,007	0,541	0	0,464	46,818	0	0,726	4,865	0,301	1,41	9,533	0,007	90,42
0,035	0,056	0,049	0,102	0	0,409	0	0,403	48,823	0	0,622	2,017	0,05	0,559	8,468	0	87,29
0	0,217	0,014	0	0	0	0	0	57,944	0,013	0,425	0,978	0,116	0,165	3,964	0,02	90,61
0	0,133	0	0,124	0,057	0,108	0	0	52,997	0	0,708	2,093	0,154	0,604	4,316	0,029	87,54

MONAZITA																
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
1,217	0,079	0,444	25,099	0	0,055	0	0,143	0,011	0	0,175	0	0	0,117	0,098	0,033	0
4,247	0,079	0,374	15,327	0,114	0	0	0,643	0	0,517	0,268	0	0	0,306	0,254	0,156	0,213
1,737	0,008	0,071	24,806	0,075	0	0,024	0,594	0	1,381	0,093	0	0	0,212	0,109	0,06	0,022
2,817	0,168	0,206	21,963	0,067	0,054	0	4,097	0	2,034	0,839	0,013	0	0,388	1,245	0,3	0,935
4,194	0,136	0,518	21,016	0	0	0,089	4,669	0	2,676	0,406	0	0	0,352	0,551	0,19	0,573
2,521	0,154	0,29	21,965	0	0	0	3,861	0	2,214	0,539	0	0	0,224	0,587	0,151	0,456
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,017	0,064	0,065	2,559	0,61	0,529	0	0,104	2,166	0	9,9	37,284	3,546	14,568	0,033	0,015	98,93
0	0,032	0,04	1,454	0,543	0,562	0	0,331	1,332	0	10,628	37,238	3,033	11,812	0,061	0	89,56
0,035	0,007	0,038	1,605	0,416	0,319	0	0,003	0,79	0	11,988	42,152	3,735	14,42	0,248	0,01	104,96
0,241	0,299	0,026	2,529	0,392	2,242	0	2,183	0,373	0	7,652	24,932	2,102	9,081	0,531	0,2	87,91
0,133	1,056	0,032	2,165	0,369	1,605	0	1,451	0,311	0,011	10,698	30,431	2,663	10,284	0,476	0,162	97,22
0,059	0,297	0,03	2,282	0,448	1,467	0	1,208	0,445	0,025	10,707	31,163	2,691	10,412	0,509	0,226	94,93

F	PARISITA-(CE)															
	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
8,864	0,84	1,443	0,096	0,043	0,089	0,535	2,334	0	5,033	1,005	0	0	0,192	0,154	0,027	0,04
9,873	0,63	1,508	0,229	0,06	0,078	0	3,897	0,091	3,179	0,591	0	0	0,098	0,417	0,167	0,325
8,676	0,97	1,784	0,046	0,064	0	0,327	1,957	0,082	4,522	1,338	0,065	0	0	0,191	0	0
8,969	1,481	2,145	0,171	0	0,081	1,146	3,77	0,01	2,547	0,392	0	0	0,231	0,463	0,033	0,347
5,557	0,251	2,435	0,017	0	0,03	0,236	0,044	0,092	4,261	1,111	0	0,121	0	0,005	0	0,012
7,413	0,933	2,505	0	0	0,109	0	3,912	0,117	3,18	3,64	0	0	0,258	0,336	0,037	0,153
9,318	0,886	2,623	0,245	0	0,027	0,849	3,092	0,175	2,084	3,698	0	0	0,255	0,481	0,044	0,321
8,818	4,141	3,848	0	0	0,191	0,235	6,899	0,228	1,839	0,218	0	0,057	0,151	0,168	0,008	0,024
8,727	1,991	4,65	0,359	0,23	0,211	0,454	1,725	0	6,306	2,957	0,053	0	0,055	0,182	0,126	0,146
9,007	4,118	6,221	0,234	0	0,056	1,038	4,277	0,187	2,934	2,479	0	0	0,194	0,621	0,229	0,404
8,066	1,686	6,934	0,343	0	0,07	1,457	2,333	0,028	2,712	7,678	0	0,038	0,087	0,223	0,049	0,153
7,87	2,574	7,22	0,134	0	0,097	0,608	1,879	0	6,377	4,577	0	0,041	0,059	0,188	0	0,048
8,837	6,044	10,326	0,309	0	0,106	2,006	3,819	0,043	2,448	3,152	0	0	0,007	0,438	0,027	0,244
7,793	5,097	14,558	0,014	0	0,183	1,591	2,751	0,123	5,303	8,125	0	0,03	0,046	0,324	0,09	0,277
5,664	5,055	14,579	0	0,126	0,079	1,352	1,859	0,095	5,71	8,245	0,023	0,129	0,019	0,185	0,079	0,102
9,057	2,099	1,361	0,162	0	0,112	1,256	6,164	0	2,12	0,444	0	0	0,328	0,759	0,098	0,412
9,893	0,514	0,892	0,151	0,007	0,003	1,999	4,277	0,324	2,583	0,392	0	0	0,328	0,462	0,003	0,399
5,716	0,686	2,218	0,641	0	0,268	0,047	3,231	0,119	3,547	2,698	0	0,071	0,189	0,276	0,142	0,098
7,756	0,087	0,271	0,173	0,157	0,13	0,07	12,073	0	2,516	0,188	0	0	0,517	0,645	0,279	0,366
7,697	0,028	3,915	0,128	0,271	0,022	0,049	15,922	0	2,557	0,686	0	0	0,479	0,922	0,33	0,44
9,057	2,099	1,361	0,162	0	0,112	1,256	6,164	0	2,12	0,444	0	0	0,328	0,759	0,098	0,412
9,893	0,514	0,892	0,151	0,007	0,003	1,999	4,277	0,324	2,583	0,392	0	0	0,328	0,462	0,003	0,399
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,009	0	0,03	1,336	0,349	0,799	0	0,422	4,65	0,05	12,92	30,387	2,628	10,265	0	0,04	84,58
0,109	0,002	0,033	1,425	0,346	0,791	0	0,696	2,434	0,025	12,827	33,592	2,545	10,198	0	0	86,166
0,075	0	0,045	1,421	0,443	0,547	0	0,354	4,084	0,051	13,375	32,952	2,805	10,612	0	0,064	86,85
0,041	0	0,032	1,823	0,409	0,907	0	0,759	1,993	0,054	10,429	29,251	2,422	9,44	0	0,032	79,378
0,065	0,026	0,017	0,069	0,166	0	0	0	0,078	0,177	30,657	29,064	0,96	3,249	0	0	78,7
0,119	0	0,161	2,09	0,447	1,344	0	0,949	6,719	0,061	12,597	26,296	2,707	10,964	0	0,027	87,074
0,094	0,05	0,04	1,572	0,394	0,763	0	0,651	2,159	0,07	13,593	33,714	2,654	10,359	0	0,06	90,271
0,111	0,02	0,154	1,09	0,334	0	0	0,082	0,035	0,037	15,862	26,723	2,132	9,207	0	0,098	82,71
0,001	0,106	0,027	1,321	0,38	0,436	0	0,362	4,234	0,08	11,905	30,681	2,679	10,309	0	0,007	90,7
0,121	0,005	0,027	1,777	0,344	1,078	0	0,931	1,324	0	12,532	33,144	2,668	10,57	0	0	96,52
0,062	0,745	0,112	0,99	0,306	0,212	0	0,314	2,568	0	12,385	26,668	1,891	7,528	0	0,011	85,649
0,094	0,126	0,045	1,087	0,373	0,433	0	0,358	8,197	0,136	10,55	26,54	2,257	8,615	0	0,1	90,583
0,098	0	0,023	1,381	0,273	0,888	0	0,687	3,111	0,02	11,487	29,534	2,308	9,213	0	0,068	96,897
0,082	0,284	0,047	1,373	0,4	1,062	0	0,594	1,761	0	10,753	27,437	2,26	8,728	0	0,052	101,138
0,066	0,176	0,049	0,815	0,327	0,39	0	0,072	2,527	0,063	8,984	20,529	1,899	7,188	0	0,06	86,446
0,089	0,008	0,021	1,971	0,356	1,241	0	1,338	1,724	0	12,136	32,516	2,577	10,631	0	0,055	89,035
0,15	0	0,026	1,858	0,367	0,821	0	0,7	1,767	0	13,05	34,308	2,69	10,768	0	0,073	88,805
0,081	0,066	0,116	1,509	0,44	0,884	0	0,644	0,791	0,007	10,011	28,169	2,212	8,922	0	0,037	73,836
0,299	0	0,091	3,892	0,298	4,344	0,355	2,501	6,173	0,016	5,257	10,818	1,927	11,092	0,159	0,016	72,466
0,258	0,04	0,063	4,032	0,321	4,765	0,328	3,186	8,177	0,034	6,078	9,973	2,043	10,904	0,117	0,055	83,82
0,089	0,008	0,021	1,971	0,356	1,241	0	1,338	1,724	0	12,136	32,516	2,577	10,631	0	0,055	89,035
0,15	0	0,026	1,858	0,367	0,821	0	0,7	1,767	0	13,05	34,308	2,69	10,768	0	0,073	88,805

																	Allanita-(Ce)																		
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3																			
3,359	6,503	19,5	0	0,129	0,177	3,038	1,594	0	5,905	15,587	0	0,195	0,037	0,239	0	0,018																			
0,981	9,025	26,669	0	0	0,315	3,732	0,435	0,096	7,849	17,588	0	0,137	0,153	0,143	0,001	0,008																			
0,6	10,627	28,474	0	0,165	0,301	1,464	0,368	0	9,887	12,933	0,084	0,194	0	0,114	0	0,081																			
0,81	10,173	29,167	0	0	0,47	2,025	0,217	0,041	8,966	16,228	0,018	0,29	0,041	0,119	0	0																			
0,703	8,491	24,886	0,002	0	0,289	4,071	0,522	0	5,994	20,203	0	0,222	0	0,254	0	0,035																			
0,432	9,977	27,829	0,02	0	0,276	1,224	0,446	0,043	9,561	12,808	0,084	0,173	0	0,083	0	0																			
5,457	7,051	15,786	0,023	0	0,416	1,876	1,697	0	4,726	9,439	0	0,067	0	0,19	0	0,057																			
0,502	8,95	27,382	0,026	0,364	0,558	3,075	0,391	0,205	9,123	14,416	0,053	0,203	0	0,139	0,018	0,038																			
1,683	7,278	23,297	0,029	0,53	0,389	6,96	0,255	0,066	8,259	14,019	0,088	0,084	0,184	0,011	0	0																			
1,808	16,627	25,746	0,031	0,204	0,096	3,322	1,143	0,171	2,188	15,584	0,198	0,107	0,004	0,294	0	0,054																			
0,345	11,559	28,987	0,037	0,107	0,316	1,681	0,988	0,177	9,949	13,381	0	0,158	0,008	0	0,006	0,103																			
0,371	12,705	29,459	0,039	0,023	0,357	0,968	0,493	0,083	10,491	13,35	0	0,023	0,036	0,133	0	0,054																			
0,311	11,652	27,596	0,054	0,184	0,223	1,774	0,196	0,125	9,829	14,387	0	0,121	0,012	0,03	0	0																			
1,028	10,725	28,963	0,056	0,002	0,218	0,846	0,883	0	8,388	15,494	0	0,215	0	0,042	0,038	0,059																			
1,111	9,705	26,709	0,069	0	0,296	2,479	0,34	0	7,713	14,968	0	0,245	0,055	0,029	0,068	0																			
3,26	7,884	21,308	0,072	0,356	0,11	2,02	1,438	0	7,635	11,364	0	0,137	0,012	0,105	0	0,031																			
0,598	10,346	28,124	0,088	0,298	0,296	2,354	0,222	0,191	9,907	13,272	0	0,208	0,026	0,119	0,02	0																			
0,62	9,1	27,327	0,096	0	0,343	2,814	0,481	0,111	7,972	16,051	0	0,3	0	0,098	0	0,038																			
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total																			
0	0,22	0,202	0,718	0,217	0,16	0	0,206	1,074	0,014	7,822	12,933	1,513	5,58	0	0,088	87,028																			
0,006	0,052	0,076	0,484	0,128	0,095	0	0,003	0,691	0	4,703	14,335	1,072	3,744	0	0,05	92,571																			
0,047	0	0,029	0,386	0,167	0,129	0	0	1,154	0,191	4,788	14,54	0,897	3,163	0	0,044	90,827																			
0,074	0,495	0,126	0,487	0,176	0	0	0,015	1,299	0	4,486	13,327	0,973	3,168	0	0,025	93,216																			
0	0,174	0,31	0,619	0,087	0,131	0	0,037	2,052	0	5,405	12,666	1,078	3,995	0	0,063	92,289																			
0,045	0,229	0,047	0,483	0,142	0,124	0	0	1,246	0,123	4,357	14,059	0,988	3,44	0	0,034	88,273																			
0	0,028	0,152	0,573	0,165	0,052	0	0,101	0,445	0,025	4,939	13,475	1	3,736	0	0,083	71,559																			
0,001	0,261	0,035	0,61	0,109	0,082	0	0	1,109	0,122	3,92	14,013	1,051	3,734	0	0,085	90,575																			
0,013	0,077	0,022	0,566	0,253	0	0	0	6,233	0,161	9,349	25,1	1,827	6,767	0	0,044	113,544																			
0	0,072	0,181	1,115	0,337	0,229	0	0,118	2,552	0	7,689	14,884	1,709	6,212	0	0,067	102,742																			
0,004	0,242	0,032	0,988	0,221	0,518	0	0,151	0,077	0,146	3,673	13,241	1,28	5,38	0	0,044	93,799																			
0	0	0,016	0,919	0,086	0,442	0	0,069	0,109	0	3,145	13,625	1,302	5,654	0	0,056	94,008																			
0	0,094	0,026	0,272	0,176	0	0	0	0,225	0,01	6,056	16,123	1,114	3,321	0	0,025	93,936																			
0	0,069	0,058	0,528	0,104	0,167	0	0,1	0,967	0,222	3,636	10,802	0,84	2,958	0	0,066	87,474																			
0	0,023	0,042	0,508	0,104	0,071	0	0,077	0,7	0	5,206	15,587	0,965	3,594	0	0,087	90,751																			
0,057	0,14	0,07	0,864	0,285	0,165	0	0,048	0,5	0,012	7,613	15,748	1,62	5,925	0	0,082	88,861																			
0	0	0,019	0,179	0,129	0,1	0	0	0,987	0,138	5,054	15,585	0,997	3,361	0	0,086	92,704																			
0	0,934	0,131	0,26	0,147	0,003	0	0,026	1,224	0,03	4,573	12,991	0,83	3,002	0	0	89,502																			

																	Hingganita								
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3									
0,25	0,995	18,708	0,071	0	0	0,088	24,325	0,048	0,691	9,252	0	0	0,922	1,924	0,339	1,439									
0,372	0,242	18,833	0,038	0,048	0	0,098	18,588	0,31	0,583	7,718	0	0	0,728	1,862	0,262	1,222									
1,907	0,127	18,968	0	0,254	0,028	0	21,703	0	0,615	7,274	0	0	1,074	2,344	0,424	1,429									
0,424	0	19,235	0	0	0	0,064	22,525	0,086	0,666	4,227	0	0	0,863	2,049	0,369	1,141									
0,364	0,11	19,469	0,154	0	0	0,081	24,979	0,023	0,282	9,266	0	0	0,755	1,897	0,287	1,425									
0,615	0,074	19,643	0,053	0,199	0	0	22,343	0,087	0,267	8,388	0	0,241	0,471	1,793	0,299	1,494									
0,629	0	20,147	0,052	0	0,042	0,139	19,789	0,046	0,125	2,645	0	0	0,765	1,251	0,288	0,862									
0,634	0,038	20,397	0	0	0	0,127	23,678	0	0,345	3,206	0	0	0,938	2,124	0,304	1,184									
0,612	0,061	20,399	0	0	0	0	24,613	0	0,755	2,057	0	0,024	0,845	1,847	0,367	1,049									
0,523	0,085	20,492	0	0	0	0,099	24,589	0	0,163	1,803	0	0,073	0,955	1,982	0,361	1,263									
0,55	0,001	20,673	0	0	0	0	25,648	0	0	1,606	0	0,094	0,711	1,783	0,316	1,357									
0,421	0,008	20,71	0,09	0,174	0,008	0	27,315	0	0,942	10,049	0	0,098	0,782	2,045	0,293	1,708									
0,691	0,168	20,816	0	0,059	0,055	0,011	22,443	0	1,309	8,799	0	0,147	0,777	1,769	0,284	1,318									
0,647	0,049	20,972	0,015	0,153	0	0	24,062	0	0,355	5,725	0	0,052	0,876	1,723	0,333	1,234									
0,77	0,084	20,98	0	0	0	0,061	25,166	0,282	0	1,024	0	0,004	1,03	2,625	0,316	2,117									
0,389	0,031	21,007	0,052	0	0,06	0,006	22,019	0,045	0	9,709	0	0	0,91	1,885	0,308	1,172									
1,151	0,165	21,063	0,046	0,059	0,038	0	18,388	0	1,493	4,467	0	0,015	0,33	1,501	0,262	1,205									
0,771	0,059	21,118	0	0,387	0	0	26,066	0	0,863	1,715	0	0,188	0,728	1,929	0,372	1,326									
0,635	0,109	21,157	0,068	0,07	0	0	24,564	0	0,391	5,241	0	0,221	0,955	2,125	0,291	1,493									
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total									
0,406	0,259	0,268	2,59	0,204	3,873	0	3,993	0,116	0	0,179	2,889	0,478	3,567	0	0	77,874									
0,351	0,265	0,077	2,511	0,159	3,616	0	3,981	0,148	0	0,193	2,954	0,449	3,514	0	0,051	69,173									
0,457	0,048	0,018	3,584	0,167	5,037	0,706	4,941	0,195	0	0,204	2,083	0,355	3,536	0,023	0	77,501									
0,432	0,095	0,025	2,758	0,166	4,155	0	5,172	0,083	0	0,374	4,585	0,649	4,354	0	0	74,497									
0,456	0	0,026	2,733	0,135	3,698	0,617	4,034	0,072	0,016	0,195	2,547	0,538	4,401	0,001	0,029	78,59									
0,311	0,834	0,122	2,428	0,15	3,259	0	3,869	0,23	0,028	0,153	2,994	0,434	3,779	0	0,038	74,596									
0,401	0,077	0,012	4,457	0,229	5,35	0,375	3,073	0,68	0	1,975	8,21	1,181	8,239	0	0,025	81,064									
0,439	0,244	0,024	3,099	0,213	4,66	0	5,355	0,121	0	0,364	4,613	0,629	4,224	0	0	76,96									
0,472	0,46	0,11	3,106	0,17	4,906	0	5,032	0,167	0	0,264	3,902	0,581	4,393	0	0,01	76,202									
0,513	0,398	0,059	3,126	0,174	4,472	0	4,787	0,178	0	0,236	3,755	0,65	4,889	0	0,011	75,636									
0,527	0,396	0,055	2,897	0,144	3,826	0	4,453	0,159	0	0,202	3,641	0,628	4,648	0	0	74,315									
0,483	0,056	0,073	1,902	0,141	2,659	0	3,256	0,136	0	0,158	2,763	0,359	2,777	0	0,018	79,424									
0,391	0,204	0,24	2,543	0,078	3,319	0	3,627	0,324	0,045	0,468	2,524	0,471	3,429	0,297	0,039	76,645									
0,27	0,066	0,102	2,616	0,023	3,616	0	4,144	0,155	0	0,155	3,103	0,383	3,26	0	0	74,089									
0,675	0	0,02	1,87	0,12	3,268	0,631	4,454	0,298	0	0,164	2,348	0,395	2,822	0	0,017	71,541									
0,542	0,204	0,028	2,895	0,207	4,569	0,656	5,008	0,113	0	0,393	4,171	0,598	4,194	0	0	81,171									
0,438	0,667	0,028	3,449	0,092	3,731	0,375	2,564	0,373	0	0,344	4,228	0,808	5,993	0	0,013	73,286									
0,408	0,88	0,079	2,581	0,15	4,034	0	4,184	0,294	0	0,272	3,343	0,583	4,29	0	0	76,62									
0,507	0	0,174	3,002	0,122	4,306	0	4,453	0,305	0,022	0,212	4,351	0,533	4,494	0	0	79,801									

F	Hingganita															
	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
0,65	0,073	21,192	0	0,115	0,003	0,089	24,54	0	0,93	7,412	0	0,298	0,744	1,817	0,276	1,257
0,746	0	21,331	0,038	0	0,055	0,041	27,52	0,223	0	1,878	0	0,036	1,086	2,073	0,291	1,137
0,45	0,071	21,364	0,043	0,231	0	0	27,155	0	1,009	8,611	0	0,039	0,708	1,876	0,245	1,603
0,584	0,222	21,586	0,064	0,026	0,053	0	28,124	0,16	0,21	4,036	0	0	0,373	0,902	0,159	0,964
0,696	0,076	21,69	0,031	0	0,17	0,105	20,865	0,203	1,257	7,796	0	0,156	0,856	2,226	0,396	1,501
0,719	0,18	21,816	0,082	0,027	0	0,089	26,356	0	0,264	2	0	0,145	0,895	2,269	0,398	1,509
0,523	0,083	22,021	0,082	0,177	0,138	0	23,394	0,103	1,148	3,81	0	0	1,087	2,483	0,282	1,64
0,526	0,127	22,236	0,108	0	0	0,062	25,167	0	0,508	9,548	0	0,03	0,452	1,35	0,219	0,911
0,564	0,6	22,27	0,06	0,216	0	0,167	23,982	0,08	0,892	4,16	0	0,06	0,734	2,08	0,358	1,322
0,887	0,219	22,289	0,133	0,254	0,093	0,038	24,165	0	0,547	9,403	0	0,028	0,926	1,675	0,323	1,252
0,83	0,091	22,379	0,095	0	0,174	0,044	28,13	0,159	0,563	1,574	0	0	1,202	2,647	0,385	1,625
0,507	0,039	22,395	0,004	0,103	0,055	0,226	24,527	0	0,173	4,174	0	0,037	1,082	2,554	0,378	1,657
0,567	0,08	22,404	0	0,01	0,113	0	26,706	0,154	1,093	8,182	0	0	0,798	1,824	0,282	1,238
0,724	0,12	22,745	0,075	0,162	0	0	25,064	0,046	0,5	8,328	0	0	0,316	0,897	0,122	0,723
0,788	0,012	23,197	0	0,054	0,069	0	25,895	0,146	1,717	1,89	0	0	0,578	1,464	0,171	1,395
0,517	0,082	23,244	0	0,143	0,004	0,033	29,955	0	0,981	5,207	0	0,076	0,981	1,908	0,293	1,31
0,441	0,063	26,831	0,007	0	0	0,071	22,956	0,211	0,237	9,505	0	0,062	0,687	1,536	0,225	0,914
0,98	9,539	30,34	0,062	0,077	0,122	0	17,033	0	0,666	10,126	0	0,221	0,35	0,531	0,03	0,423
0,215	0	40,999	0,018	0	0	0,166	18,609	0,169	0,497	6,229	0	0,025	0,414	1,106	0,126	0,66
0,218	0,038	60,46	0	0,16	0	0,163	14,115	0,245	0,305	5,827	0	0,028	0,262	0,447	0,061	0,299
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,374	0,828	0,149	2,503	0,054	3,185	0	3,85	0,273	0	0,207	3,32	0,515	3,897	0	0	78,551
0,369	0,104	0,03	2,856	0,125	3,961	0	4,838	0,079	0	0,29	4,598	0,648	4,368	0	0,032	78,753
0,418	0	0,051	1,563	0,141	2,539	0	2,836	0,118	0,024	0,181	2,558	0,301	2,565	0	0	76,7
0,198	0,054	4,032	0,878	0,051	1,331	0,167	1,351	0,085	0	0,098	1,422	0,181	1,66	0	0	68,971
0,468	0,051	0,126	2,898	0,154	4,136	0,544	4,25	0,182	0	0,245	3,376	0,549	4,26	0,026	0,009	79,298
0,575	0,06	0,166	3,099	0,148	4,207	0	4,606	0,213	0	0,208	3,865	0,577	4,21	0	0	78,683
0,621	0	0,002	2,352	0,062	4,231	0,746	5,243	0,247	0,011	0,154	2,175	0,375	3,074	0,039	0,02	76,323
0,348	0,163	2,06	2,053	0,149	2,681	0	2,782	0,201	0	0,163	2,17	0,373	2,709	0,327	0,06	77,483
0,342	0,048	0,061	2,951	0,073	3,725	0	3,831	0,315	0	0,166	2,199	0,451	3,393	0,241	0	75,341
0,386	0,062	0,204	1,946	0,084	2,856	0,435	3,443	0,167	0	0,199	2,051	0,325	2,747	0,043	0,016	77,196
0,532	0	0,006	2,362	0,095	4,108	0,716	5,108	0,193	0	0,128	2,442	0,434	3,334	0,019	0	79,375
0,465	0,213	0,083	2,102	0,161	3,874	0,667	5,103	0,201	0	0,194	2,582	0,455	3,454	0,01	0,015	77,49
0,416	0,172	0,957	2,584	0,103	3,478	0	3,84	0,114	0	0,163	2,378	0,45	3,217	0,254	0,023	81,6
0,273	0,175	0,064	1,34	0,07	1,935	0	2,11	0,056	0	0,089	1,534	0,247	2,076	0,19	0,001	69,982
0,439	0	0,01	1,943	0,156	3,105	0,348	2,565	0,037	0	0,811	5,551	0,686	3,825	0	0,019	76,871
0,503	0,02	0,125	2,585	0,061	3,708	0,529	3,949	0,128	0,027	0,11	1,906	0,43	3,525	0	0,005	82,345
0,294	0,073	0,059	1,797	0,162	2,701	0	2,972	0,124	0	0,104	2,255	0,387	2,751	0	0	77,425
0,146	0	4,365	0,804	0,05	1,215	0,18	1,049	0,069	0	0,013	0,809	0,151	1,196	0,141	0	80,688
0,225	0,135	0,046	1,475	0,114	1,91	0	2,108	0,059	0	0,096	1,784	0,18	1,89	0	0,031	79,286
0,054	0,077	0,03	0,504	0,034	0,791	0	0,726	0,033	0	0,047	0,695	0,117	0,765	0	0	86,501

F	Batinaesita-(Ce)															
	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
5,998	0,025	0,151	0,083	0	0	0	1,038	0,14	0	0,097	0	0	0,235	0,129	0,179	0,179
6,804	0	0,007	0,069	0	0,053	0	0,99	0,066	0,459	0,111	0	0	0,136	0,242	0,139	0,072
5,916	0,105	0,294	0	0	0,049	0	0,766	0	0	0,131	0	0,042	0,061	0,058	0,038	0
5,702	0,008	0,071	0,013	0,233	0	0	0,347	0	0,129	0,117	0	0	0	0	0,152	0
5,601	0	0,072	0,014	0	0	0	0,544	0	0	0,086	0	0	0	0	0,18	0
6,876	0,005	1,721	0,077	0,128	0,075	0,038	2,688	0,124	0	0,189	0	0	0,251	0,093	0,034	0,077
6,134	0,013	0,091	0	0,019	0	0,049	0,387	0,055	0	0,055	0	0,056	0	0,1	0,064	0
5,768	0	0,011	0,019	0,015	0,062	0,082	0,076	0,2	0,145	0	0	0	0,077	0,02	0,014	0
5,822	0	0,021	0	0,292	0,01	0	0,299	0	0,096	0	0,041	0	0,14	0,064	0,11	0,015
6,107	0,029	0,055	0,019	0	0,235	0,076	0,235	0	0,118	0	0	0	0,044	0,145	0,085	0,058
6,294	0,004	0,087	0	0,013	0,187	0,223	0,234	0	0,201	0	0	0	0	0,031	0,108	0
7,467	0	0,046	0,004	0,301	0,18	0	0,733	0	0,22	0,014	0	0	0	0	0,109	0
5,2	0	0,056	0,039	0	0	0,044	0,492	0	0	0	0,001	0	0	0,085	0,071	0
5,376	0,004	0,059	0,008	0	0,109	0,022	0,229	0	0	0,041	0	0	0	0,035	0,035	0,005
6,552	0,171	0,339	0,05	0,189	0,149	0,14	1,204	0,167	0,401	0,552	0	0	0	0,167	0,04	0,033
5,497	0,034	0,089	0	0,019	0	0,194	0,334	0	0	0,154	0	0	0	0,012	0	0,012
6,499	0	0,028	0	0,188	0	0,196	0,177	0,301	0,425	0,066	0	0,005	0,157	0	0	0,144
5,998	0	0,033	0	0	0,141	0	1,009	0	0	0,055	0	0	0,135	0	0,015	0
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0	0	0,047	6,468	0,532	2,804	0	0,194	0,872	0,063	5,918	30,169	4,295	24,599	0,013	0,029	84,257
0,08	0,027	0,017	3,708	0,542	2,763	0,026	0,634	0,886	0,082	9,575	33,916	3,563	17,562	0,026	0,037	82,592
0	0,019	0,059	1,882	0,48	0,43	0	0	0,296	0,031	9,11	35,142	3,57	16,02	0	0,022	74,521
0	0	0,018	3,477	0,644	1,007	0	0,024	0,345	0,002	9,197	37,342	4,321	21,589	0	0,06	84,798
0,04	0	0,013	3,904	0,573	1,636	0	0	0,398	0,116	13,215	37,978	3,587	16,471	0	0,05	84,478
0	0	0,056	2,137	0,535	0,937	0	0,013	0,566	0,053	12,409	38,696	3,287	13,216	0	0,03	84,311
0,027	0,131	0,054	2,02	0,632	0,628	0	0	0,441	0	10,297	39,596	4,174	19,077	0,01	0	84,11
0	0	0	1,498	0,414	0	0	0	0,252	0	18,475	39,976	2,956	13,386	0	0,008	83,454
0	0,007	0,013	2,219	0,553	0,665	0	0	0,495	0,09	13,019	40,325	3,504	14,994	0,021	0,052	82,867
0	0	0,015	3,013	0,711	1,323	0	0	0,507	0,105	9,364	40,542	4,233	18,865	0,016	0,041	85,941
0,028	0	0	1,711	0,487	0,061	0	0	0,395	0,034	18,524	40,822	2,961	11,379	0	0,018	83,802
0,008	0	0,006	3,55	0,595	1,23	0	0,062	0,403	0,08	10,772	40,95	3,713	16,69	0	0,015	87,148
0	0	0,029	2,488	0,512	1,142	0	0	0,73	0,162	9,32	40,958	4,259	18,514	0,023	0,031	84,156
0,007	0	0,018	1,522	0,479	0,463	0	0,03	0,369	0,13	16,707	41,039	3,021	11,973	0	0,045	81,726
0	0	0,153	2,166	0,528	1,076	0	0	0,782	0,2	11,99	41,103	3,881	15,234	0	0	87,267
0	0,016	0,036	1,626	0,498	0,636	0	0	0,347	0	14,319	41,211	3,807	15,586	0	0,042	84,469
0,06	0	0,02	1,207	0,373	0	0	0,027	0,483	0,033	19,336	41,26	2,898	10,273	0	0,02	84,176
0,083	0,024	0,01	1,3	0,514	0,335	0	0,171	0,584	0,098	15,269	41,383	3,131	12,075	0,013	0,004	82,38

							Batinaesita-(Ce)									
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
5,877	0,012	0,061	0,026	0	0,141	0	0,564	0	0	0,074	0	0	0	0,147	0	0
6,161	0,001	0,008	0,004	0	0,122	0,011	0,692	0,21	0	0,017	0	0,014	0	0,013	0	0,069
6,464	0,015	0,032	0,046	0,343	0	0,126	0,105	0	0,159	0,055	0	0	0	0,077	0	0,006
5,497	0,029	0	0	0	0,038	0,065	0,211	0,041	0	0,075	0	0	0,058	0,043	0	0,035
6,551	0	0,016	0	0,004	0,049	0	0,241	0	0,691	0	0	0	0	0,04	0,04	0
6,067	0,016	0,023	0,11	0	0,023	0	0,826	0,052	0	0,131	0	0	0	0,038	0	0
5,906	0	0,008	0	0	0,135	0	0,361	0	0	0,074	0	0	0	0,047	0,044	0,063
3,379	0,026	0,137	0	0,025	0,053	0,011	0,02	0,146	0,045	0,088	0	0	0,17	0,067	0	0,036
6,061	0	0,026	0	0	0	0,017	0,211	0	0,318	0,05	0,009	0	0	0,061	0,018	0,001
6,49	1,168	2,259	0	0,197	0,095	0,139	0,395	0	0,149	1,401	0	0	0,104	0,022	0,014	0
5,705	0,005	0,019	0	0,104	0	0,039	0	0	0	0,025	0,035	0	0,052	0,057	0,026	0
6,715	0	0	0,027	0,118	0,156	0,163	0	0,057	0,273	0	0	0	0	0,102	0	0
6,916	0,032	0,074	0	0	0	0	1,045	0	0,344	0,117	0	0	0,004	0,015	0	0
6,846	0	0,017	0,008	0	0,102	0	0	0,066	0,616	0	0	0	0,046	0	0	0,032
5,886	0	0,034	0	0,157	0	0	0,227	0	0	0,011	0	0	0,204	0,094	0,045	0,031
5,941	0,022	0	0,037	0,002	0,065	0	0,308	0,027	0	0,036	0	0	0	0,036	0,053	0,016
5,932	0	0,014	0	0	0,001	0,051	0,414	0	0	0	0	0	0	0	0,015	0
6,469	0,026	0	0,007	0	0,108	0	0,275	0,248	0,238	0,11	0	0	0,28	0,25	0	0
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,075	0	0,118	1,211	0,494	0,162	0	0	0,479	0,031	15,87	41,573	3,402	12,954	0	0,054	83,325
0,111	0,036	0,019	1,064	0,416	0	0	0	0,656	0,038	16,069	42,2	2,946	9,944	0	0,02	80,841
0,022	0	0,008	0,958	0,431	0	0	0	0,186	0,048	18,944	42,559	2,912	11,021	0	0	84,517
0	0	0,002	0,792	0,518	0	0	0	0,15	0	19,611	42,725	2,938	10,359	0	0	83,187
0	0	0,013	0,935	0,467	0	0	0,137	1,008	0,037	19,535	42,789	2,617	9,497	0,036	0,042	84,745
0	0	0	1,048	0,508	0,203	0	0	0,359	0,082	16,712	43,375	3,218	11,026	0	0	83,817
0	0	0,01	1,428	0,553	0,192	0	0	0,595	0,073	13,326	44,114	3,684	13,815	0	0	84,428
0	0	0,006	0,517	0,561	0	0	0	0,042	0	16,985	44,443	3,369	11,237	0	0,002	81,365
0	0	0,016	1,874	0,564	0,215	0	0	0,146	0,019	13,391	44,52	4,243	17,447	0,289	0	89,496
0	0	0,03	1,306	0,505	0	0	0	0,137	0,027	18,758	45,05	3,297	11,882	0,241	0	93,666
0	0	0,011	1,144	0,486	0	0,05	0	0,175	0,004	15,811	45,338	3,673	14,344	0,25	0,04	87,393
0,016	0	0	0,259	0,385	0	0,008	0	0,047	0,032	24,5	45,358	2,602	7,495	0,269	0,003	88,585
0,022	0	0,043	1,294	0,487	0	0	0	0,341	0,142	16,025	45,95	3,555	12,354	0,272	0,08	89,112
0	0,029	0,009	0,242	0,279	0	0	0	0,082	0	25,97	46,263	2,307	6,427	0,229	0	89,57
0	0	0,009	1,353	0,602	0,536	0,082	0	0,759	0,088	13,672	48,038	3,935	12,942	0,257	0	88,962
0,03	0	0,005	1,423	0,613	0,613	0,064	0,157	0,721	0,123	13,951	48,113	3,692	12,895	0,299	0,022	89,264
0	0,075	0	1,387	0,485	0,462	0,059	0	0,762	0,145	13,548	48,128	3,892	12,912	0,296	0,044	88,622
0	0	0	1,188	0,494	0,193	0,051	0	0,746	0,084	14,758	48,176	3,7	12,095	0,253	0,028	89,777

	Xenotima-(Y)															
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
0,883	0	0,209	31,488	0	0,096	0	37,548	0,12	0	0	0	0	1,138	3,826	0,524	3,463
0	0,012	0,087	32,327	0	0	0,08	37,905	0,092	0,02	0,051	0	0	1,266	4,134	0,59	4,047
0,284	0,029	4,098	28,292	0,524	0	0,055	37,951	0,225	0,334	0,475	2,465	0	0,738	2,655	0,324	2,405
0	0,035	0,217	33,396	0	0,006	0,162	38,718	0	0,134	0,185	0	0	0,952	2,538	0,39	2,805
0	0,047	0,152	31,858	0,005	0,058	0	39,64	0,135	0	0,133	0,048	0,083	1,306	3,737	0,575	3,697
1,703	0,012	0,297	31,314	0	0,049	0	39,882	0	0,19	0,072	0	0	1,225	3,271	0,536	3,307
0,141	0,015	0,152	34,36	0	0,182	0,005	41,194	0	0,156	0,126	0	0	0,799	2,123	0,327	2,491
0,258	0,206	2,342	30,634	0	0	0,057	41,284	0	0	0,916	0	0	1,381	3,077	0,466	2,784
0	0	0,593	31,803	0	0	0	42,541	0,045	0,171	0,132	0	0	0,702	2,473	0,306	2,422
0,18	0,016	0,201	31,681	0	0,058	0,074	43,192	0	0	0,052	0	0	0,872	2,872	0,396	2,556
0	0,009	0,232	34,039	0	0	0,1	43,355	0	0,186	0,054	0	0	0,499	2,282	0,395	2,685
0	0,025	0,055	34,205	0	0,011	0,122	43,414	0,022	0,106	0,06	0	0	0,959	2,729	0,411	2,6
0	0,031	0,224	33,62	0	0,018	0,033	43,521	0	0	0,103	0	0,066	0,919	2,903	0,402	2,738
0,435	0	0,313	32,706	0	0	0	43,61	0	0,011	0	0	0	0,81	2,829	0,366	2,283
0	0,049	0,15	32,244	0	0	0	43,705	0	0	0,019	0	0	0,672	2,039	0,346	2,694
0,485	0,041	2,112	30,709	0,115	0,099	0,086	43,848	0,255	0	0,074	2,636	0	0,779	2,579	0,405	2,689
0,208	0	0,436	33,011	0	0,073	0,16	44,223	0	0,071	0,044	0	0	0,847	2,818	0,444	2,569
0,105	0,009	0,466	33,162	0	0,134	0	44,289	0	0	0	0	0	0,661	1,605	0,257	1,934
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,837	0,024	0	0,194	0	1,328	0,412	3,953	0	0	0,044	0,055	0	0,052	0,052	0	86,246
0,905	0	0,054	0,264	0	1,563	0,224	4,595	0	0,004	0,035	0,052	0,003	0	0,28	0	88,59
0,699	0	0,033	1,185	0,04	2,202	0,449	3,215	0,126	0,018	0,072	0,902	0,222	1,439	0,059	0,024	91,539
0,719	0	0,066	0,474	0,027	1,501	0,275	2,917	0,162	0,007	0,014	0,311	0,046	0,54	0,038	0	86,635
0,833	0	0,127	0,036	0,041	1,436	0,423	4,611	0,028	0,02	0	0,022	0	0	0	0	89,051
0,723	0	0	0,6	0,018	1,967	0,428	4,022	0,265	0	0,026	0,061	0,008	0,122	0,107	0	90,205
0,545	0	0,008	0,425	0	1,203	0,214	2,451	0,092	0	0,08	0,296	0,092	0,192	0	0	87,669
0,574	0	0	0,516	0,039	1,674	0,475	4,245	0,162	0,018	0,026	0,085	0,044	0,171	0,289	0	91,723
0,653	0	0	0,699	0	2,037	0,336	3,098	0,095	0,015	0,038	0,281	0,087	0,477	0	0,031	89,035
0,585	0	0	0,535	0,064	2,113	0,445	3,924	0,112	0,018	0	0,099	0	0,176	0,299	0	90,52
0,566	0,021	0,003	0,264	0,053	1,024	0,232	2,227	0,095	0,024	0	0,13	0,042	0,292	0	0	88,809
0,633	0	0	0,386	0	1,648	0,433	3,273	0,125	0	0,018	0,077	0	0,171	0	0	91,483
0,667	0	0,168	0,261	0,017	1,505	0,421	3,81	0,334	0	0,208	0,847	0,042	0,343	0,023	0,014	93,238
0,585	0	0,018	0,336	0	1,89	0,409	4,363	0,163	0,015	0	0,125	0	0,287	0,286	0	91,84
0,629	0	0	0,258	0	0,87	0,152	2,013	0,113	0	0	0,053	0,051	0,171	0	0	86,228
0,566	0	0,007	0,396	0	1,374	0,193	2,692	0,022	0,01	0	0,024	0	0,161	0,252	0	92,609
0,62	0	0	0,986	0,01	1,886	0	3,591	0,212	0,092	0,055	0,782	0,17	1,079	0,282	0,02	94,689
0,437	0,11	0	0,482	0	1,554	0,307	2,628	1,797	0	0,082	0,306	0,009	0,308	0,091	0	90,733

							Xenotima-(Y)									
F	Al2O3	SiO2	P2O5	Nb2O5	MnO	TiO2	Y2O3	Ta2O5	CaO	FeO	ZrO2	Na2O	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3
0,258	0,006	1,786	32,571	0	0,034	0	44,314	0	0,212	0,459	0	0	0,161	0,218	0,067	0,235
0	0	0,092	34,643	0	0	0,105	44,596	0	0,066	0,156	0	0,006	1,063	3,066	0,393	2,712
0,154	0	0,128	33,363	0,056	0	0,038	44,69	0	0,347	0,135	0	0	0,743	1,959	0,304	2,547
0,075	0,028	0,363	34,125	0,105	0	0,049	44,84	0	0,182	0,032	0	0	0,895	2,739	0,419	2,385
0	0	0,046	34,988	0,07	0,052	0	44,935	0,067	0,341	0,102	0	0	0,683	2,391	0,404	2,769
0,107	0,008	0,153	33,514	0,026	0,004	0	44,954	0,244	0	0,059	0	0	0,736	2,676	0,326	2,634
0,068	0	0,086	33,746	0	0	0,044	45,003	0,032	0	0,19	0	0,052	0,733	2,004	0,227	2,602
0	0,044	0,139	33,709	0	0	0	45,067	0	0,52	0,103	0	0,19	0,352	1,431	0,196	2,031
0,636	0	0,265	32,656	0	0,018	0,189	45,122	0	0	0,182	0	0	0,83	2,636	0,432	2,629
0	0,005	0,087	33,605	0	0,138	0,017	45,277	0	0,175	0	0	0	0,965	2,573	0,322	2,533
0,038	0,016	0,088	33,526	0	0	0	45,462	0,419	0,031	0,044	0	0	0,871	2,472	0,433	2,82
0	0	0,076	34,745	0	0	0	45,495	0,225	0,327	0	0	0	0,902	2,417	0,323	2,647
0	0,041	0,83	34,052	0	0	0	45,593	0	0	0,361	0	0	0,677	1,703	0,397	1,382
0,328	0,039	0,286	33,2	0	0	0	45,818	0,024	0,145	0	0	0,018	0,712	1,885	0,281	2,598
0,136	0,02	0,475	34,434	0	0,063	0	46,02	0,09	0,358	0,106	0	0,004	0,372	0,821	0,061	0,938
0	0,011	0,051	33,983	0	0	0	46,314	0,057	0,233	0,003	0	0	0,794	2,559	0,447	2,476
0	0	0,039	34,051	0	0,043	0,144	46,807	0	0,154	0,025	0	0	0,656	2,363	0,361	2,604
0,047	0	0,101	35,211	0	0	0	47,191	0,077	0	0,047	0	0	0,765	2,334	0,361	2,641
0	0,033	0,231	34,502	0	0,007	0	47,267	0,209	0	0,163	0	0	0,612	2,058	0,349	2,662
Lu2O3	PbO	K2O	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb2O3	Dy2O3	ThO2	SrO	La2O3	Ce2O3	Pr2O3	Nd2O3	UO2	BaO	Total
0,109	0	0,008	0	0,001	0,092	0	0,112	0,134	0	0,015	0,023	0,034	0,012	0,034	0,019	80,914
0,673	0	0,016	1,252	0,075	2,475	0,475	4,191	0,101	0	0,088	1,048	0,194	1,703	0,037	0,002	99,228
0,635	0	0,002	0,261	0,023	0,875	0,224	1,898	0,105	0	0	0,054	0	0,16	0	0,004	88,705
0,588	0	0	0,996	0,035	2,253	0,455	3,804	0,139	0	0,063	0,728	0,074	1,041	0	0,032	96,445
0,66	0	0	0,323	0	1,161	0,259	2,274	0,067	0,034	0	0,044	0	0,156	0,007	0,018	91,851
0,608	0	0,021	0,488	0	1,585	0,228	2,859	0,128	0	0,034	0,069	0,056	0,173	0,257	0	91,947
0,593	0	0,036	0,15	0,017	0,94	0,172	1,895	0,125	0,059	0,015	0,015	0	0,149	0	0	88,953
0,468	0	0,609	0,207	0,006	0,62	0,171	1,251	0,107	0	0,007	0,061	0	0,151	0	0	87,44
0,568	0	0	0,138	0,037	1,432	0,229	3,066	0,19	0	0	0,049	0	0,154	0,29	0,019	91,767
0,51	0	0	0,22	0,039	1,636	0,301	3,166	0,116	0,03	0	0,068	0,004	0,153	0,038	0	91,978
0,55	0	0	0,374	0,012	1,27	0,344	2,71	0,203	0	0	0,038	0	0,238	0,231	0	92,19
0,628	0	0	0,329	0	1,256	0,367	2,477	0,107	0,056	0	0,019	0,035	0,195	0	0	92,626
0,528	0,172	0,394	3,117	0,109	4,202	0,569	3,766	0,157	0,011	0,189	2,115	0,433	3,706	0,009	0	104,513
0,656	0,038	0,134	0,349	0	0,921	0,226	1,743	0,131	0	0,007	0,014	0	0,227	0	0	89,78
0,251	0	0	0,051	0	0,208	0,123	0,521	0	0	0	0,218	0,103	0,116	0	0	85,489
0,568	0	0	0,344	0,052	1,428	0,386	2,538	0,097	0	0	0,097	0,054	0,154	0,184	0,009	92,839
0,598	0	0	0,446	0,052	1,482	0,229	2,549	0	0	0,037	0,058	0	0,094	0,01	0	92,802
0,417	0	0	0,367	0	1,323	0,285	2,619	0,086	0	0,02	0,036	0	0,134	0	0	94,062
0,568	0	0	0,232	0,02	0,74	0,131	2,031	0,187	0,024	0	0,037	0,028	0,055	0,246	0,045	92,437