

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO RIO GRANDE DO NORTE

GERSON ROMANO DOS SANTOS JUNIOR

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS DE TERRAS
RARAS, URÂNIO E TÓRIO EM PERFIS REGOLÍTICOS/LATERITIZADOS EM
ROCHAS DO COMPLEXO JEQUIÉ BAHIA, BRASIL**

NATAL

2019

GERSON ROMANO DOS SANTOS JUNIOR

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS DE TERRAS
RARAS, URÂNIO E TÓRIO EM PERFIS REGOLÍTICOS/LATERITIZADOS EM
ROCHAS DO COMPLEXO JEQUIÉ BAHIA, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de pesquisa de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Pontes
Coorientador: Prof. Dr. André Carlos Silva

NATAL
2019

Santos Júnior, Gerson Romano dos.
S237a Avaliação da variabilidade geoquímica de elementos de terras raras,
urânio e tório em perfis regolíticos - Lateritizados em rochas do complexo
Jequié Bahia, Brasil / Gerson Romano dos Santos Júnior. – Natal, 2019.
109 f : il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos
Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Júlio César Pontes.

Coorientador: Dr. André Carlos da Silva

1. Depósitos minerais. 2. Óxidos de terras raras. 3. Recursos minerais –
Classificação. 4. Íon Adsorption Clays – Depósito. I. Pontes, Júlio César. II.
Silva, André Carlos da. III, Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Norte. III. Título.

CDU 553(814.2)

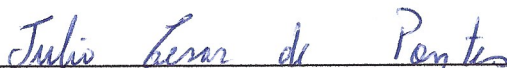
GERSON ROMANO DOS SANTOS JUNIOR

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS DE TERRAS
RARAS, URÂNIO E TÓRIO EM PERFIS REGOLÍTICOS/LATERITIZADOS NAS
ROCHAS DO CÔMPLEXO JEQUIÉ BAHIA, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de pesquisa de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais.

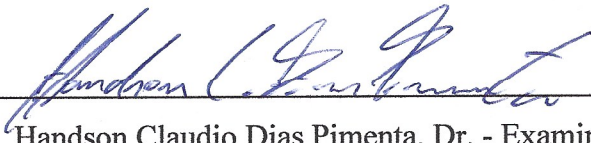
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 29/08/2019 pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA



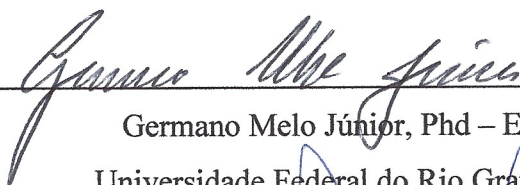
Júlio César Pontes, Dr. – Presidente

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



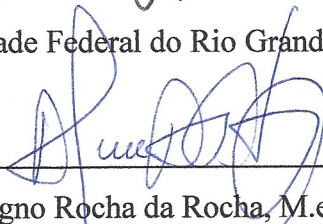
Handson Claudio Dias Pimenta, Dr. - Examinador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Germano Melo Júnior, Phd – Examinador

Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Alexandre Magno Rocha da Rocha, M.e - Examinador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me conduzido até aqui, pois Ele não tem me faltado.

Aos meus genitores Maria José dos Santos e Gerson Romano dos Santos, por terem me feito crescer, por educarem-me, por me fazerem aprender e ser quem sou. Sem eles eu certamente não estaria aqui e não teria força para crer que posso ir ainda mais longe. Obrigado!

À minha esposa Andréa de Lima Campelo por estar ao meu lado me doando seu amor e fazendo com que fosse possível estudar e trabalhar com tranquilidade, a qual absorveu a grande maioria das demandas do nosso convívio com nossos filhos e com as nossas responsabilidades diárias.

Aos meus filhos Eduardo Maximus da Silva Romano e Ana Leticia Lima Romano que são fonte de energia para seguir em frente, pelos quais eu tento sempre, dia após dia, ser melhor, com o objetivo de dar-lhes uma boa referência.

Às minhas irmãs que são como um jardim de flores balsâmico por onde sempre eu de passar com um sorriso no rosto e um abraço apertado pronto a dar.

Aos meus amigos, em especial: Alexandre Magno Rocha da Rocha, Gilson Ramos Pereira e Pedro Paulo Silva Leite que me ajudaram a compor esta obra.

Aos meus orientadores: Julio César Pontes e André Carlos Silva, por todo suporte que me foi prontamente dado.

Aos professores da Pós-Graduação em Uso Sustentável dos Recursos Naturais (PPgUSRN) que me proporcionaram o conhecimento necessário para o meu desenvolvimento ao longo o curso.

E a todos os amigos que fiz durante o curso, bem como aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a conclusão desta longa, árdua e valorosa caminhada.

RESUMO

Os depósitos minerais econômicos de Terras Raras mais comuns estão associados às rochas magmáticas calcálicas a alcalinas e seus produtos de intemperismo. Neste trabalho, são apresentados dados de sondagem realizada em rochas intemperizadas com perfil regolítico/laterítico pertencentes ao Complexo Jequié/BA, mineralizadas em terras raras submetidas a processos exógenos semelhantes aos ocorridos nos depósitos do tipo *Ion Adsorption Clays* (IAC) no sul da China. A interpretação dos dados de sondagem permitiu a classificação de recursos minerais de terras raras com teores semelhantes, por vezes superiores, aos dos depósitos IAC no sul da China. Nesse contexto, o índice químico de alteração de rocha (CIA) foi adotado como ferramenta de classificação, separando horizontalmente o perfil intempérico mineralizado em seis horizontes litogeoquímicos. Os dados indicam que houve enriquecimento supergênico dos óxidos de terras raras (OTR) nas porções mais inferiores do perfil e, por vezes, nas zonas superiores. Os teores médios no perfil de intemperismo variaram entre 0,09% e 0,22% de OTR, com valores máximos de 1,6%. Já os teores dos elementos Tório (Th) e Urânio (U) apresentam tendência de aumento das concentrações nas porções superiores do perfil intempérico, principalmente quando associados aos horizontes litogeoquímicos classificados como zona mosqueada lateritizada. Com base na classificação litogeoquímica estabelecida, foram criadas matrizes de correlação que ajudaram na definição das possíveis fases de ocorrência de terras raras no perfil intempérico. Nesse sentido, uma seção modelo representando o depósito de mineral de terras raras de origem supergênica em rochas do Complexo Jequié/BA foi desenvolvida.

Palavras-chave: Óxidos de Terras Raras. Classificação de Recursos Minerais. Complexo Jequié. Depósito do Tipo Íon Adsorption Clays.

ABSTRACT

The most common rare earth economic mineral deposits are associated with calcic to alkaline magmatic rocks and their products of the weathering. In this work, we present data from drilling conducted in rare earth mineralized weathered rocks from Jequié Complex, in Brazil. These rocks were subjected to intense weathering process, similar to what occurred in the Ion Adsorption Clays deposits in southern China. The data analysis allowed the classification of rare earth mineral resources with similar levels, sometimes higher than those of the Chinese deposits, contained in the lateritic regolith profile studied. The chemical index of alteration (CIA) was adopted as a classification tool, horizontally separating the mineralized weathering profile into six zones. The data indicated that there was a supergenic enrichment of the REO in the lower portions of the profile and sometimes in the upper zones. The REO average content ranged from 0.09% to 0.22% with maximum of 1.6%. The Th and U elements tended to increase concentrations in the upper portions of the weathering profile, mainly associated with laterization and high leaching zones. Based on the established lithochemical classification, correlation matrices were designed to help define the possible phases of rare earth occurrence in the weather profile. A model section representing the rare earth mineral deposit of supergenic origin in rocks from Jequié / BA Complex was developed.

Keywords: Rare Earth Oxides. Mineral Resources Classification. Jequié Complex/BA, Brazil. Ion Adsorption Clays Type Deposits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Classificação dos depósitos minerais de ETR mais conhecidos.....	19
Figura 1 – Principais ambientes geológicos que podem dar origem a formação de depósitos de terras raras.....	20
Gráfico 1 – Distribuição das principais reservas conhecidas de terras raras no mundo em milhões de toneladas (Mt) (adaptado de CPRM, 2015).....	21
Quadro 2 – Principais usos, aplicações e funcionalidades dos elementos de terras raras.	22
Figura 2 – Matriz crítica em médio prazo (2015 a 2025) para elementos químicos de uso na produção energética.	24
Gráfico 2 – Distribuição dos principais recursos minerais de ETR conhecidos no mundo.	28
Gráfico 3 – Produção global de óxidos de terras raras 1960-2010.....	30
Gráfico 4 – Distribuição da produção de ETR em toneladas e sua representatividade percentual em relação aos demais principais produtores no mundo no período de 2008-2016.	31
Quadro 3 – Principais países produtores de Elemento de Terras Raras (ETR) de 2008-2016.	31
Fotografia 1 – Veio de quartzo mineralizado em ETR.....	43
Fotografia 2 – Milonito mineralizado em ETR.	43
Fotografia 3 – Solo do tipo coluvionar.....	44
Fotografia 4 – Marcação de uma coleta de amostra de canal realizada em um corte de estrada em zona mosqueada.	45
Fotografia 5 – Fragmento de testemunho de sonda de uma amostra de zona mosqueada coletada.	46
Fotografia 6 – Saprolito fragmentado de coloração bege.....	47
Gráfico 5 – Distribuição dos conteúdos de ETR normalizados em relação ao condrito de Sun e McDonough (1989).	49
Gráfico 6 – Classificação das rochas graníticas.	50
Fotografia 7 – Amostras do perfil intempérico mineralizado em ETR submetidas a caracterização mineralógica no LTC.....	51
Imagem 1 – BSE ao MEV, inclusões de monazita (dimensões inferiores a 15 µm) e ilmenita em óxido de ferro - JEQCMT001.....	54
Imagem 2 – BSE ao MEV, monazita (EDS1) mostrando tório e urânio em sua composição, mista com óxido de ferro (EDS2) e goethita (EDS3) - JEQCMT001.	54

Imagem 3 – Mapeamento químico de EDS. Partícula mista de Al-fosfato e goethita. Al-fosfato mostrando ETR em sua composição - JEQCMT001.....	55
Imagem 4 – BSE ao MEV, monazita (EDS1) intimamente associada com Al-fosfato (EDS2). Al-fosfato apresenta ETR em sua composição - JEQCMT002.....	56
Imagem 5 – BSE ao MEV, monazita com superfície limpa (EDS1) e tório associado, mista com ilmenita (EDS2) - JEQCMT002.	56
Imagem 6 – BSE ao MEV, Cerianita (EDS1) com aspecto poroso associada com quartzo (EDS2) e K-feldspato (EDS3) - JEQCMT003.	57
Imagem 7 – Mapeamento químico de EDS. Partícula mista de caulinita e monazita - JEQCMT003.....	58
Imagem 8 – BSE ao MEV, associações entre monazita e goethita. Intercrescimentos em (A) e monazita porosa em (B) - JEQCMT004.....	59
Imagem 9 – BSE ao MEV, associação entre goethita (EDS1) e Al-fosfato (EDS 2, 3, 4). Al-fosfato mostrando ETR em sua composição - JEQCMT004.....	59
Imagem 10 – Mapeamento químico de EDS. Agregado de caulinita, quartzo, monazita e óxido de ferro - JEQCMT004.....	60
Imagem 11 – BSE ao MEV, inclusões de monazita em alumino-fosfato, na forma de grãos bem cristalizados (EDS 1, 2, 3), com dimensões de até 100 µm e com conteúdo de tório associado. Alumino-fosfato também enriquecido em ETR (EDS 4) - JEQCMT005.	61
Imagem 12 – BSE ao MEV, microanálises químicas em alumino-fosfatos (EDS 1, 3), goethita (EDS 2, 7), monazita (EDS 4, 5), caulinita (EDS 6) e quartzo (EDS 8). Presença de tório associado à monazita e ETR aos alumino-fosfatos - JEQCMT005.	62
Gráfico 7 – Curvas de tendência dos dados em relação aos principais índices de intemperismo químico (953 amostras).	64
Gráfico 8 – Demonstra curva de tendência de CIA (%) com o aumento da proximidade a rocha fresca (BDRK).....	67
Gráfico 9 – Distribuição dos conteúdos de ETR normalizados em relação ao condrito de Sun e McDonough (1989). Comparação entre as rochas protólito e os horizontes litogeoquímicos.	71
Gráfico 10 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th2O, U2O8, P2O5 e Fe2O3 no furo AUG0088.	74
Gráfico 11 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th2O, U2O8, P2O5 e Fe2O3 no furo AUG0343.	75

Gráfico 12 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th ₂ O, U ₂ O ₈ , P ₂ O ₅ e Fe ₂ O ₃ no furo AUG0391.	76
Gráfico 13 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th ₂ O, U ₂ O ₈ , P ₂ O ₅ e Fe ₂ O ₃ no furo AUG0057.	78
Gráfico 14 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th ₂ O, U ₂ O ₈ , P ₂ O ₅ e Fe ₂ O ₃ no furo AUG0251.	79
Figura 3 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico LMTZ (17 amostras).....	81
Figura 4 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico MTZ (627 amostras).....	83
Figura 5 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico USPLT (137 amostras).	85
Figura 6 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico MSPLT (144 amostras).....	86
Figura 7 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico LSPLT (18 amostras).....	87
Figura 8 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico SPRK (10 amostras).	88
Figura 9 – Seção típica do depósito de ETR supergênico em rochas do Complexo Jequié, sudeste da Bahia, Brasil.....	90
Fotografia 8 – Ambiente de um depósito de ETR do tipo IAC, no sul de Jiangxi, China, após mineração por lixiviação em pilha.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação, principais minerais portadores de terras raras e seu conteúdo total	16
Tabela 2 – Principais projetos de ETR em desenvolvimento no mundo*	24
Tabela 3 – Sumário dos principais índices de intemperismo químico aplicados a perfis intempéricos.....	36
Tabela 4 – Substâncias analisadas, método de determinação e limites de detecção (LD).	40
Tabela 5 – Composição química das amostras de rocha do depósito de ETR em rochas pertencentes ao Complexo Jequié, Bahia, Brasil.....	48
Tabela 6 – Composição química das amostras estudadas (% ou ppm, em massa).....	52
Tabela 7 – Estimativa da composição mineralógica das amostras (MEV/EDS/MLA)...	53
Tabela 8 – % massa; valores não normalizados.	62
Tabela 9 – Sumário estatísticos dos dados de correspondentes a 103 furos de sondagem (953 amostras analisadas).	67
Tabela 10 – Sumário das espessuras dos horizontes litogeoquímicos.....	69
Tabela 11 – Produção de OTR no mundo e na China, e exportações da China 2011 a 2017 em (t).....	91
Tabela 12 – Projetos do tipo IAC em desenvolvimento, recursos minerais e teores.	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E SUA PROBLEMÁTICA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	JUSTIFICATIVAS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	TERRAS RARAS	16
2.1.1	Principais Processos Geológicos Associados a ETR	17
2.1.2	Principais Processos Formadores de Depósitos de ETR	18
2.2	IMPORTÂNCIA E PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS ELEMENTOS DE TERRAS RARAS	20
2.3	URÂNIO (U) E TÓRIO (TH)	28
2.4	ETR: PRODUÇÃO, PROCESSAMENTO E QUESTÕES AMBIENTAIS	30
2.5	ÍNDICES QUÍMICOS DE INTEMPERISMO DE ROCHAS	35
2.5.1	Ruxton Ratio (R)	36
2.5.2	Weathering Index of Parker (WIP)	37
2.5.3	Vogt's Residual Index (V)	37
2.5.4	Chemical Index of Alteration (CIA)	37
2.5.5	Chemical Index of Weathering (CIW)	39
2.5.6	Plagioclase Index of Alteration (PIA)	39
2.5.7	Silica–Titania Index (STI)	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE ETR EM ROCHAS PERTENCENTES AO COMPLEXO JEQUIÉ (BA), BRASIL	41
3.1.1	Geologia	41
3.1.2	Mineralogia	50

3.1.3	Forma de ocorrência dos minerais portadores de ETR	54
3.2	CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DOS FUROS	62
3.3	CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DO <i>CHEMICAL INDEX OF ALTERATION</i> (CIA) COMO FERRAMENTA DE CLASSIFICAÇÃO	63
4	RESULTADOS	66
4.1	CLASSIFICAÇÃO LITOGEOQUÍMICA DO DEPÓSITO SUPERGÊNICO DE ETR EM ROCHAS DO COMPLEXO JEQUIÉ, NO SUDESTE DA BAHIA, BRASIL	66
4.2	VARIABILIDADE GEOQUÍMICA À AFERIÇÃO DO CIA NO PERFIL INTEMPÉRICO DO DEPÓSITO ETR SUPERGÊNICO EM ROCHAS DO COMPLEXO JEQUIÉ	72
4.3	MATRIZES DE CORRELAÇÕES POR HORIZONTES LITOGEOQUÍMICOS DE CIA	80
4.4	INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, MINERALOGIA E LITOGEOQUÍMICA	89
5	DISCUSSÃO	91
6	CONCLUSÕES	97
7	RECOMENDAÇÕES	99
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE - PADRÕES INOVADORES INERENTES AO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	108

1 INTRODUÇÃO

Esta seção visa apresentar previamente os aspectos gerais que compõem e que norteiam o presente trabalho e o seu desenvolvimento. Para tanto, segue abaixo a contextualização do tema e sua problemática, bem como os objetivos, as justificativas e as demais seções.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E SUA PROBLEMÁTICA

Os Elementos de Terras Raras (ETR), o Tório (Th) e o Urânio (U) são elementos químicos que frequentemente ocorrem associados entre si para formar, junto a outras substâncias, um mesmo mineral (UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, 2000). Estes elementos também são comuns em uma mesma paragênese mineral em determinados tipos de rochas e isso faz com que eles comumente ocorram juntos na grande maioria dos ambientes geológicos formadores de depósitos minerais (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2010). Isso implica na necessidade de considerar, em praticamente todos os aspectos que envolvem a prospecção por essas substâncias na natureza e em seu aproveitamento econômico, a coexistência de tais elementos químicos em um depósito e/ou jazida mineral. Além disso, suas concentrações poderão atuar positivamente ou negativamente nas atividades relacionadas com a pesquisa mineral, com a lavra, com o beneficiamento e com a comercialização desses recursos naturais (AROGUNJO *et. al.*, 2009).

Essas substâncias são relativamente bem distribuídas na crosta terrestre e ocorrem, frequentemente, na forma de traços, não raro associadas a um mesmo tipo de rocha, a saber, as rochas carbonatíticas, os granitos alcalinos, os subalcalinos, os peraluminosos e granitos e/ou gnaisses calcialcalinos, bem como podem ser encontradas em outros tipos de rocha e nos seus respectivos produtos de alteração intempérica e/ou supergenia, tais como alúvio, elúvio, colúvio, solo e saprolito (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2010).

A associação entre esses elementos químicos deve-se ao que é chamado de afinidade geoquímica, que são características e propriedades físico-químicas dos elementos químicos os quais determinam quais elementos estarão mais presentes e/ou “andando” juntos ou não nos diferentes compartimentos da terra (BIONDI, 2015), desde os processos de formação das rochas no ambiente primário até a geração dos seus respectivos produtos de intemperismo por meio de processos secundários e/ou supergênicos. Como avaliar racionalmente os recursos, como otimizar o plano de exploração, como fortalecer a mineração na gestão sustentável desses

recursos minerais tão importantes para o mundo moderno são, portanto, todos os problemas práticos que precisam ser resolvidos com urgência (ZHAO *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2018).

Segundo Zhao (2017a, 2017b), grandes são os desafios que estão relacionados à busca de novos métodos exploratórios mais adequados para o delineamento, ao modelamento de corpos de minérios e ao cálculo de reservas nos depósitos supergênicos de ETR explorados no mundo, especialmente os depósitos minerais que se assemelham aos do sul da China, tipo IAC (ZHAO, 2017a, 2017b). Para esses autores, as jazidas que vêm produzindo ETR tipo IAC há mais de 30 anos ainda hoje utilizam métodos de exploração deficientes e isso implica em modelos geológicos aquém da importância econômica dessas substâncias o que, por consequência, tem levado os processos de lavra e o beneficiamento a não atender às expectativas de sustentabilidade para o aproveitamento econômico desses recursos minerais tão importantes.

Neste trabalho, apresentaremos novas interpretações de técnicas auxiliares para otimização dos processos prospectivos das substâncias contidas nesse contexto geológico/metagenético e vamos abordar o modo de como aplicar novos conceitos na busca da resolução dos problemas relacionados às dificuldades quanto à classificação de tais recursos minerais e sua caracterização.

1.2 OBJETIVOS

Neste item abordaremos o objetivo geral a ser alcançado no trabalho e em seguida trataremos de objetivos específicos relacionados.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a variabilidade vertical do comportamento geoquímico representado pelas concentrações de ETR, Th e U, no perfil intempérico regolito lateritizado mineralizado em ETR, em rochas do Complexo Jequié, na região sudeste da Bahia.

1.2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar o depósito supergênico estudado através de uma classificação litogeoquímica vertical, com o desenvolvimento da aferição do índice químico de alteração de rochas chamado de *Chemical Index of Alteration* (CIA).

Avaliar como a classificação litogeoquímica criada e o estudo da variabilidade dos teores de ETR, Th e U, nesse tipo de depósito mineral, podem ser úteis para otimizar o desenvolvimento de etapas subsequentes do projeto de prospecção que está em curso na região estudada.

Demonstrar e melhorar a aplicação do CIA como ferramenta auxiliar na caracterização dos recursos minerais de ETR encontrados nesse tipo de depósito mineral e integrar esse conceito ao uso de matrizes de correlação, visando evoluir no entendimento geoquímico da área estudada para otimizar os modelos geológicos e de avaliação dos recursos minerais do tipo IAC encontrados na região.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os elementos de terras raras são fundamentais para o desenvolvimento da vida moderna devido as suas excepcionais propriedades magnéticas e condutivas, que favorecem a confecção de uma gama de ligas complexas capazes de conduzir eletricidade e magnetismo muito mais rápido do que outras substâncias mais conhecidas, tais como ferro e cobre, além de permitir a construção de compostos cada vez mais leves e mais fortes (KLINGER, 2018).

Desde a crise de 2010, decorrente do monopólio Chinês, o qual, na época, dominava 97% do mercado mundial sobre a produção de terras raras, tem se intensificado os investimentos em todo o mundo na busca de medidas para transformar o setor e o cenário de dependência da China para a compra dessas substâncias. Estes esforços contemplam investimentos em pesquisa na busca de novas minas, de estratégias de mercado para baixar os preços, de investimentos em tecnologias e de estudos para mitigar danos ambientais relacionados às atividades de lavra e de beneficiamento (KLINGER, 2018).

A complexidade da incidência geológica de ETR, especialmente em depósitos do tipo IAC, e as dificuldades de se avaliar de forma consistente os recursos minerais relacionados a este tipo de modelo geológico mencionadas por Zhao (2017a, 2017b) representam variáveis desafiadoras à viabilidade de empreendimentos mineiros que visam ao aproveitamento econômico dessas substâncias. Nesse sentido, Zhao (2017a, 2017b), dentre outros, mencionam ainda que horizontes de perfil intempérico mineralizado em ETR com características do tipo de depósitos IAC, quando apresentam valores de CIA acima de 84% têm correlação negativa para conteúdo de ETR adsorvidos em argilas, ao passo que os horizontes de intemperismo mineralizados em ETR com valores de CIA abaixo de 84% apresentam correlação positiva para conteúdo de ETR adsorvidos em argilas.

Desse modo, este autor menciona ainda que há uma grande necessidade de se estudar melhor esse mecanismo e outros auxiliares na definição do modelo geológico de depósitos minerais, uma vez que os resultados de recuperação de ETR adsorvidos em argilas no processamento (lixiviação) dos horizontes caracterizados com CIA abaixo de 84% apresentam alta variabilidade, entre 40% e 95%, e isso impacta significativamente na economicidade do processo, na otimização da lavra e, por consequência, no seu aproveitamento econômico de forma sustentável.

Nesse contexto, o trabalho aqui apresentado torna-se necessário para demonstrar que é possível melhorar a caracterização e os processos de avaliação desse tipo de depósito mineral, através da otimização do uso do CIA atrelado a outras ferramentas e mecanismos de interpretação que serão demonstrados, com vistas a otimizar a identificação de zonas de maior interesse. A partir disso, será possível aprimorar as avaliações dos recursos minerais econômicos contidos nesse tipo de contexto geológico e consequentemente desenvolver práticas mais sustentáveis quanto à exploração e à exploração desses recursos minerais tão importantes.

Cientificamente, o trabalho deixará em aberto a possibilidade de outros pesquisadores avançarem no entendimento sobre como o uso das ferramentas e dos recursos geoquímicos e estatísticos, que serão demonstrados mais adiante, poderão auxiliar na avaliação econômica e ambiental de outras áreas potencialmente exploráveis com contexto geológico semelhante. Além disso, profissionalmente, a pesquisa fornecerá dados importantes para o progresso no desenvolvimento do projeto de pesquisa mineral que está em curso na região, caso seja confirmada a exequibilidade econômica dos recursos minerais de ETR que estão sob avaliação da área de estudo.

Sob o ponto de vista do uso sustentável dos recursos naturais, ao longo do trabalho, serão discutidas formas de mitigar aspectos negativos relacionados às concentrações de Th e U no perfil intempérico mineralizado em ETR, por meio das quais o estudo poderá contribuir para a otimização do processo de modelamento dos recursos minerais contidos no depósito e para o seu conhecimento geoquímico. Para isso, serão feitas recomendações e propostas de ações sustentáveis para o melhor aproveitamento dos recursos naturais.

Como produto final do trabalho, destaca-se a otimização no processo de caracterização e de avaliação das mineralizações de ETR no ambiente supergênico e, como consequência, a melhora na avaliação potencial, econômica e ambiental desse tipo de depósito mineral na fase de prospecção mineral e nos trabalhos avançados que suportarão as avaliações de lavra e beneficiamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção faremos uma abordagem na forma de subitens sobre os principais temas relacionados com o trabalho.

2.1 TERRAS RARAS

Os Elementos Terras Raras (ETR) são um grupo de quinze metais especiais definidos na tabela periódica como pertencentes à série de lantanídeos, são eles: lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), erbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu), além desses, existem ainda os elementos escândio (Sc) e ítrio (Y), que apresentam propriedades físicas e químicas semelhantes (HOATSON, JAIRETH e MIEZITIS, 2011).

Os ETR podem ser encontrados em diversos tipos de rochas da crosta e estão contidos principalmente nos minerais mais comumente encontrados na forma de carbonatos, fluorcarbonatos, fosfatos, silicatos, fluoretos e óxidos (tabela 1) ou ainda adsorvidos em argilas neoformadas, podendo, neste último caso, formar os chamados depósitos *Ion Adsorption Clays* (IAC) (MARIANO e MARIANO, 2012).

Os ETR normalmente são agrupados em leves (La, Ce, Pr, Nd – ETRL), médios (Sm, Eu, Gd – ETRM) e pesados (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu – ETRP). Esta classificação decorre da variação no tamanho do raio atômico (diminui do La ao Lu) e da variação no número atômico (aumenta do La ao Lu), de modo que, quanto menor o raio atômico e maior o número atômico, mais “pesado” é o lantanídeo. Dentre os ETR, destaca-se também o grupo das chamadas terras raras críticas, que são Pr, Nd, Tb e Dy – ETRC, assim, ele é definido levando em consideração os parâmetros que tratam da sua abundância na maioria das reservas minerais conhecidas e da sua importância econômica (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005).

Tabela 1 – Classificação, principais minerais portadores de terras raras e seu conteúdo total

Classificação	Mineral	Fórmula Química	% peso aprox. de OTR
	Ancilita	$Sr(ETR)(CO_3)_2OH \cdot H_2O$	43
Carbonatos e Fluorcarbonatos	Bastnaesita	$(ETR)(CO_3)F$	75
	Parisita	$Ca(ETR)_2(CO_3)_3F_2$	60
	Sinchisita	$Ca(ETR)(CO_3)_2F$	51

Continua

Continua			
Classificação	Mineral	Fórmula Química	% peso aprox. de OTR
Fosfatos	Britholita	$(\text{ETR}, \text{Ca})_5(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$	32
	Churchita	$\text{YPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	51
	Florencita	$(\text{ETR})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	32
	Monazita	$(\text{ETR}, \text{Th})\text{PO}_4$	65
	Rabdofanita	$(\text{ETR})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	65
	Xenotima	YPO_4	61
Silicatos	Allanita	$(\text{ETR}, \text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH}))$	37
	Cerita	$[\text{ETR}_9\text{Fe}^{3+}(\text{SiO}_2)_6(\text{OH})](\text{OH})_3$	70
	Cheralita	$(\text{Ca}, \text{ETR}, \text{Th})(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4$	31
	Chevkinita	$(\text{Ca}, \text{ETR}, \text{Th})_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Si}_4\text{O}_{22}$	42
	Eudialita	$\text{Na}_4(\text{Ca}, \text{ETR})_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Y})\text{ZrSi}_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{Cl})_2$	9
	Gadolinita	$(\text{ETR})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	54
Fluoretos	Fluorencita	$(\text{ETR})\text{F}_3$	
	Gagarinita	$\text{NaCaY}(\text{F}, \text{Cl})_6$	
Óxidos	Brannerita	$(\text{U}, \text{Ca}, \text{ETR})(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{O}_6$	9
	Euxenita	$(\text{Ca}, \text{ETR}, \text{U}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$	24
	Cerianita	$(\text{Ce}^{4+}, \text{Th})\text{O}_2$	63
	Fergusonita	$(\text{ETR})\text{NbO}_4$	47
	Loparita	$(\text{ETR}, \text{Na}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$	30
	Samarskita	$(\text{Y}, \text{Fe}^{3+}, \text{U})(\text{Nb}, \text{Ta})_5\text{O}_4$	24

Nota: OTR = somatório dos óxidos de terras raras + óxido de ítrio.

Fonte: (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2017; adaptado por ANTONIASSI, 2017).

2.1.1 Principais Processos Geológicos Associados a ETR

- magmas Carbonatíticos, comumente associados a complexos plutônicos, que forma plugs, cone, sheets, diques e mais raramente sills (BARKER, 1989). São gerados no manto litosférico por ascensão e por posicionamento dando origem a carbonatitos primários (vulcânicos ou plutônicos).
- magmas alcalinos ricos em CO_2 , gerados no manto litosférico por ascensão, *emplacement* e diferenciação em câmara magmática, gerando complexos alcalino-carbonatíticos (dunitos, piroxenitos, bebedouritos, ijolitos, sienitos, foscoritos, carbonatitos), ou por extrusão, gerando vulcanismo alcalino (nefelinitos, kamafugitos, fonolitos, lamprófiros, melilitos) (WOOLEY e KJARSGAARD, 2008);
- complexos carbonatíticos, a partir da evolução complexa de magmas, mediante processos recorrentes, às vezes simultâneos, tais como: cristalização fracionada,

imiscibilidade de líquidos, desgaseificação e/ou metassomatismo e assimilação crustal (BARKER, 1989).

2.1.2 Principais Processos Formadores de Depósitos de ETR

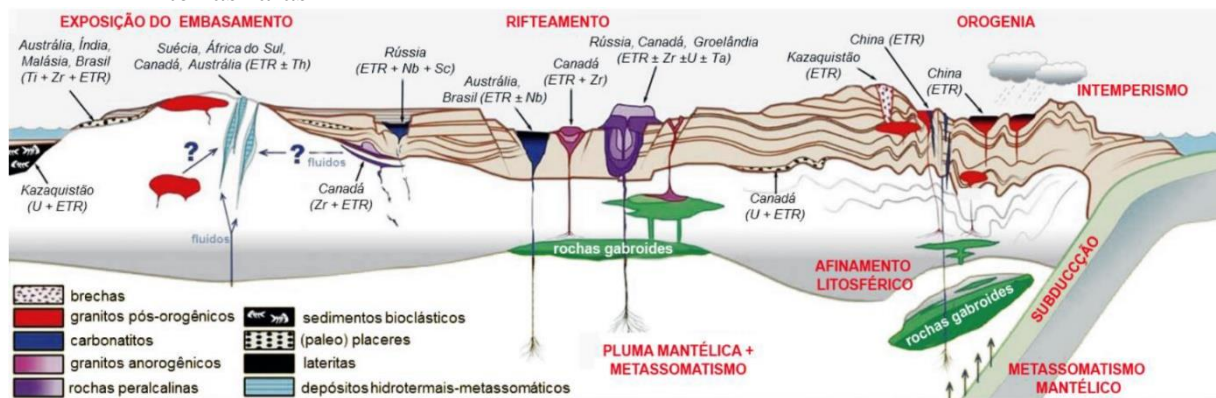
- a) ígneos (magmáticos + hidrotermais);
 - Associados a carbonatito: Bayan Obo (China), Mt. Pass (USA), Weshan, Maoniuping (China), Mount Weld (Australia), Araxá, Catalão, Barra do Itapirapuã (Brasil); depósitos minerais com predominância de ETRL.
- b) associados a sienitos e granitos;
 - Khibina, Lovozero (Rússia), Strange Lake (Canadá), Pitinga (Brasil); depósitos minerais com predominância de ETRL e ETRP.
- c) sedimentares;
 - Placers como Kerala (Índia), Richards Bay (África do Sul), litoral brasileiro (RJ, ES, BA, PI, MA) e conglomerados como Elliot Lake (Canadá); predominantemente areias monazíticas com abundância em ETRL.
- d) secundários e/ou supergênicos;
 - Residuais como Mount Weld (Austrália), Araxá e Catalão (Brasil), Kangankunde (Malawi) e adsorvidos em argilas (*Íon Adsorption Clays*) como Longman, Xunwu (China), Minaçu/GO (ROCHA, 2013), e em rochas do Complexo Jequié na Bahia (Brasil), como será mostrado mais adiante aqui neste trabalho.
- e) hidrotermais associados ou não com rochas alcalinas e calcialcalinas;
 - Veios de quartzo e fluorita em polimetálicos e pegmatitos, como na África do Sul, EUA e Canadá e ainda do tipo *Iron oxide-copper-gold deposits* (IOCG) como Olympic Dam, Australia e Carajás, Brasil com ETRL > ETRP, e também em Jequié, Jitaúna e Itagí (Bahia, Brasil), em rochas máficas e ultramáficas (FERNANDES et. al., 2019), e ainda nesta mesma região em milonitos, como será mostrado mais adiante.

Quadro 1 – Classificação dos depósitos minerais de ETR mais conhecidos

Associação	Tipo	Exemplo
Rochas Ígneas Peralcalinas	Magmatico (alcalino-ultrabásico)	Lovozero, Russia.
	Diques Pegmatíticos (alcalino-ultrabásico)	Khibina Massif, Russia.
	Diques Pegmatíticos (peralcalinas)	Motzfeldt, Greenland.
	Veios hidrotermais e stockworks	Lemhi Pass, Idaho.
	Vulcanicas	Brockman, Western Australia.
	Albitito e metassomatismo	Miask, Russia.
Carbonatíticos	Magmático	Mountain Pass, California.
	Diques e Veios	Kangakunde Hill, Malawi.
	Veios Hidrotermais e stockworks	Gallinas Mtns., New Mexico.
	Skarn	Saima, China.
	Rocha Carbonatítica	Bayan Obo, China.
	Metassomatismo	Magnet Cove, Arkansas.
Ferro, Cobre e Ouro Oxidado (IOCG)	Magnetita-Apatita replacement	Eagle Mountain, California.
	Hematita-Magnetita em Brecha	Olympic Dam, South Australia.
Pegmatitos	ETR Pesados	Aldan, Russia.
	ETR Leves	Five Mile, Ontario.
	Muscovita com ETR	Spruce Pine, North Carolina.
	Alanita e Monazita com ETR	South Platte, Colorado.
	Euxenita com ETR	Topsham, Maine.
	Gadolinita	Ytterby, Sweden.
	Topázio, Berílio com ETR associado	Mount Antero, Colorado
	Gadolinita e Fergusonita com ETR	Wasau complex, Wisconsin.
Molibdenio Porfirídico	Climax-type	Climax, Colorado.
Metamorfico	Gnaiss Migmatítico	Music Valley, California.
	ETR e Urânio associado a rochas tipo Skarn	Mary Kathleen, Queensland.
Fosfato Residual Estratiforme	Fosforito em Plataforma	Southeast Idaho.
	Associado a Carbonatito	Mount Weld, Western Australia.
	Associado a Granito Lateritizado	South China; Minaçu, Brasil.
	Bauxita Baddeleyita	Poços de Caldas, Brasil.
	Bauxita Karst	Montenegro.
Paleoplacer	Conglomerado Quartzo-Pirita-Uranífero	Elliot Lake, Ontario.
	Conglomerado Quartzo-Pirita-Aurífero-Uranífero	Witwatersrand, South Africa.
Placer	Minerais Pesados com Titânio em Linhas de Costa	Cooljarloo, Western Australia.
	Depósitos Aluvionares com Estanho	Malaysia.

Fonte: Adaptado de (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2010).

Figura 1 – Principais ambientes geológicos que podem dar origem a formação de depósitos de terras raras



Fonte: (CHAKHMOURADIAN ; WALL, 2012, modificado por ANTONIASSI, 2017).

2.2 IMPORTÂNCIA E PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS ELEMENTOS DE TERRAS RARAS

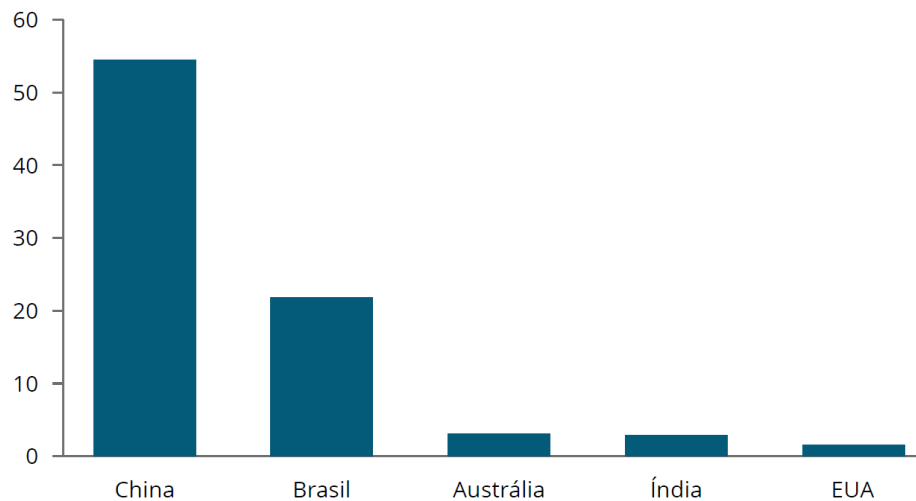
No Brasil, os ETR estão inseridos em um grupo de substâncias que são consideradas pelo governo federal como estratégicas para o país, chamadas de substâncias “portadoras de futuro”, sendo elas os ETR, o lítio e o silício. Esses elementos químicos são a base para o desenvolvimento tecnológico da indústria de alta tecnologia e, em conjunto com os chamados “agrominerais”, integram um grupo de substâncias prioritárias no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Minerais Estratégicos 2018-2022. Trata-se, pois, de um documento de orientação estratégica do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações para atuação na área temática de minerais estratégicos na Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016-2022. Tem por objetivo fomentar a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a inovação nas cadeias produtivas de minerais de importância estratégica, visando a agregação de valor, de competitividade, de redução da dependência externa e de utilização dos recursos minerais brasileiros para a solução de desafios tecnológicos para problemas estruturais da economia nacional.

Conforme definido no Plano Nacional de Mineração 2030, denomina-se “substâncias estratégicas” os recursos naturais escassos, essenciais ou críticos para um país, e no caso do Brasil, isso está relacionado a três situações: (i) recursos naturais que o país importa em larga escala, como por exemplo o potássio e o carvão metalúrgico, fundamentais para alguns setores da economia brasileira; (ii) recursos naturais com demanda crescente para as próximas décadas, em função da sua aplicação em produtos de alta tecnologia, como ETR, lítio, silício, tântalo, cobalto, grafita, metais do grupo da platina, molibdênio, tálio, tântalo, titânio, vanádio, entre

outros, denominados substâncias “portadoras de futuro”; e (iii) recursos naturais em que o Brasil apresenta vantagens comparativas naturais e liderança internacional em reservas e produção, tais como os minérios de ferro e de nióbio (BRASIL, 2011).

As mais representativas reservas mundiais conhecidas de terras raras ocorrem na China com 55 Mt, no Brasil com 22 Mt e na Austrália com 3,2 Mt (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2016). No entanto, estima-se que, em curto prazo, as reservas brasileiras deverão aumentar, tendo em vista o desenvolvimento de novos projetos de exploração mineral que estão em curso e em fase de estudos de viabilidade econômica (TAKEHARA *et. al.*, 2015).

Gráfico 1 – Distribuição das principais reservas conhecidas de terras raras no mundo em milhões de toneladas (Mt) (adaptado de CPRM, 2015)



Fonte: (BRASIL, 2011).

Os principais usos dos ETR estão relacionados à cadeia produtiva de manufaturados aplicados à indústria de ímãs de alta capacidade, de catalisadores, de ligas metálicas na metalurgia de supercondutores, de motores híbridos e elétricos de automóveis, de indústria nuclear, de fabricação de vidro, de polimento eletrônico e de tecnologia de célula de combustível, sendo esses exemplos um sumário das inúmeras aplicações dessas notáveis substâncias (BRASIL, 2013).

Com a crescente preocupação mundial pelo aumento no uso de energias limpas, pela diminuição do uso de combustíveis fósseis e pelos avanços tecnológicos que impulsionam o crescimento na produção de equipamentos eletrônicos cada vez mais desenvolvidos, torna-se evidente que a demanda por essas substâncias, que são base primárias para esses segmentos, deverá continuar em ascensão por muitos anos. Curtis (2011) já projetava aumento na demanda por ETR da ordem de 15% em aplicações relacionadas à produção de baterias, 12% para ímãs, 10% para polímeros, 8% para catalisadores, 2% para metalurgia e 8% para demais usos.

Quadro 2 – Principais usos, aplicações e funcionalidades dos elementos de terras raras

Uso industrial	Aplicação de ETR	Funcionalidade habilitadora	Elementos ETR requeridos
Veículos elétricos, híbridos, plug-in	Ímãs permanentes	Motores de tração elétrica, substituindo ou suplementando motores de combustão interna	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Motores elétricos em veículos convencionais e avançados	Ímãs permanentes	Redução do consumo de combustível pela diminuição do peso do veículo	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Geração de energia eólica e hidrelétrica	Ímãs permanentes	Geradores sem engrenagem, maior confiança e desempenho	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Ferramentas elétricas sem fio	Ímãs permanentes	Motores elétricos compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Sistema integrado automático de partida	Ímãs permanentes	Sistema integrado automático de partida, reduzindo consumo de combustível	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Unidades de discos rígidos para computadores	Ímãs permanentes	Motores elétricos compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Dispositivos pessoais móveis sem fio	Ímãs permanentes	Aparelhos compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb, Y, Eu, Sm
Equipamentos para diagnóstico por imagem (MRI)	Ímãs permanentes	Geração de campo magnético	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC)	Catalisadores	Propiciam sítios ácidos para a matriz catalítica	La, Ce, Pr e Nd
Conversores catalíticos e outras tecnologias para redução de emissões atmosféricas	Catalisadores	Capacidade de oxidação de CO e ozônio para CO ₂ e O ₂	Ce, La
Indústria automotiva	Ligas metálicas ferrosas contendo ETR	Modificação de propriedades físicas e químicas para melhoria de desempenho e ampliação do espectro de usos industriais de ligas metálicas	Todos ETR
Indústria aeroespacial, geração de energia nuclear, fabricação e operação de satélites, linhas de transmissão de energia, sistemas de refrigeração magnética, entre outros	Ligas metálicas não ferrosas contendo ETR	Modificação de propriedades físicas e químicas para melhoria de desempenho e ampliação do espectro de usos industriais de ligas metálicas	Todos ETR
Lâmpadas fluorescentes compactas e lineares, LEDs, entre outros itens de iluminação	Fósforos	Redução no consumo de energia, com melhoria das características de cor e luminescência	Y, Eu, Tb
Dispositivos pessoais móveis sem fio	Fósforos	Displays em telas planas	Y, Eu, Tb, Gd, Ce
Telas planas de TV e <i>displays</i>	Fósforos (excitados por UV em baixa pressão)	Cores brilhantes – vermelha, verde e azul – em grandes telas planas	Y, Eu, Tb, Gd, Pr, Ce
Detectores de raios X e raios gama	Fósforos	Captura de luz de cintilação e sistemas de detecção	Y, Eu, Tb, La, Ce
Pós para polimento de vidros e lentes	Pós para polimento	Melhoria das propriedades ópticas de vidros e lentes	Ce
Fabricação de vidros e lentes	Fabricação de vidros e lentes especiais (mudanças de propriedades físicoquímicas de vidros e lentes)	Descoloração de vidros, bloqueio de luz ultravioleta e composição de lentes e vidros especiais (usos em medicina e indústria aeroespacial, dentre outros)	La, Ce, Nd, Pr, Yb, Ho, Er
Fibras ópticas para telecomunicações	Fibras ópticas dopadas com ETR	Amplificação de sinal	Y, Eu, Tb, Er, Nd e Ho
Sensores de gases, incluindo CO	Cerâmicos	Monitoramento e controle de emissões gasosas Melhoria de desempenho de motores a combustão	Y
Lasers para usos diversos (medicina, defesa e outros)	Cerâmicos	Orientação de artefatos de defesa, precisão de corte e incisões	Y, Nd e outros

Continua

Continua

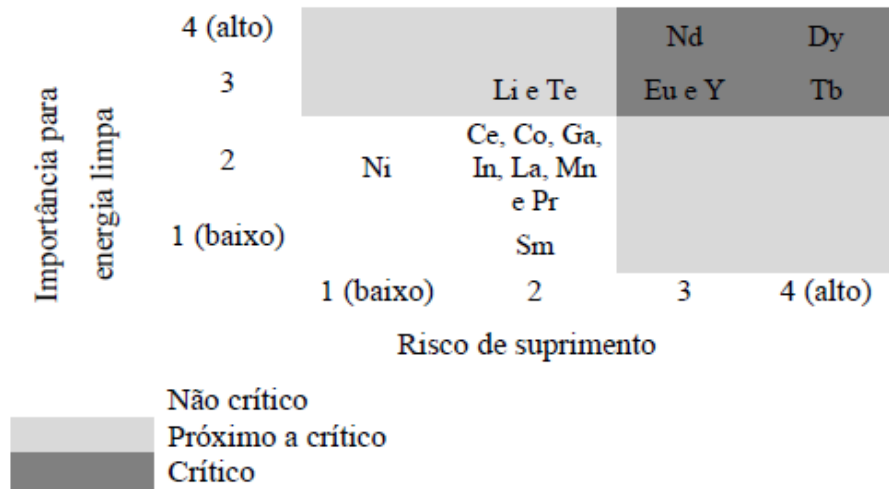
Uso industrial	Aplicação de ETR	Funcionalidade habilitadora	Elementos ETR requeridos
Dispositivos de armazenagem de energia (capacitores cerâmicos, de tântalo e de outros tipos dopados com TRs)	Cerâmicos	Alta densidade energética em comparação com capacitores convencionais	Todas ETR
Dispositivos de armazenagem de energia	Baterias de níquel - metal -hidreto - (Ni-MH)	Melhor custo-benefício dessa tecnologia, quando comparado a baterias de íons de lítio	La

Fonte: Brasil (2013).

Divergências entre o Japão e a China fizeram com que os chineses em 2010 embargassem a venda de ETR para o Japão (BRADSHER, 2010) que dependia, como ainda depende, muito de importações dessas substâncias para a geração de seus produtos de alta tecnologia. Nesse mesmo período, o governo chinês restringiu suas exportações de ETR, em relação a sua produção bruta anual, de modo a justificar a medida alegando proteção das reservas e suas indústrias de produtos de alta tecnologia. Essa medida fez com que o mundo voltasse os olhos para necessidade de fugir desse monopólio chinês e foi, então, nesse momento, em que houve uma crescente corrida por novos projetos de prospecção mineral desses elementos.

De qualquer forma, estudos realizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (USDE) demonstram que o aumento das reservas minerais dessas substâncias não tem acompanhado o crescimento da demanda mundial. Em particular, os ETRP e aqueles considerados críticos são os que apresentam ritmo ainda mais lento do que os ETRL. Através da análise crítica da matriz energética norte-americana no médio prazo, é possível evidenciar que elementos como Nd, Eu, Dy, Tb e Y apresentam perspectivas de escassez em uma projeção de 2015 a 2025 (figura 2).

Figura 2 – Matriz crítica em médio prazo (2015 a 2025) para elementos químicos de uso na produção energética



Fonte: United States Department of Education (2011).

Em 2016 foi realizado, pelo Ministério dos Recursos Naturais do Canadá, um trabalho de análise de mercado global para ETR no qual se constatou que 25,4% das empresas envolvidas na extração de ETR possuem sede na Ásia-Pacífico, 13,6% nos Estados Unidos e 8,5% na Europa (CANADÁ, 2016). As demais empresas que representam outros 52,5% estão localizadas principalmente na Austrália e no Canadá. Esse estudo relevou ainda que metade dos principais intervenientes no mercado de ETR estão concentrados na exploração e desenvolvimento, recentemente constituídos por empresas de mineração, produção, refino e comercialização de terras raras. Na segunda categoria, mais da metade estão sediadas na China. Essa mesma instituição mapeou os projetos de ETR que estão em andamento no mundo e que são considerados, por ela, os mais importantes por estarem em conformidade com normativas de qualidade e confiabilidade reconhecidas internacionalmente, tais como NI 43-101 e o Código JORC ou Código SAMREC. Na tabela abaixo, foi possível identificar 62 projetos com recursos minerais de ETR em desenvolvimento, associados a 49 empresas em 16 países (CANADÁ, 2016).

Tabela 2 – Principais projetos de ETR em desenvolvimento no mundo*.

PROJETO	COMPANHIA	PAÍS	RM (Mt)	TREO (%)	TREO (Mt)
Brockmans	Hastings Technology Metals Ltd	Austrália	36	0,21	0,08
Browns Range	Northern Minerals Ltd	Austrália	9	0,63	0,06
Charley Creek (JV)	Crossland Strategic Metals Ltd.	Austrália	805	0,03	0,24

Continua

					Continua
PROJETO	COMPANHIA	PAÍS	RM (Mt)	TREO (%)	TREO (Mt)
Charley Creek (JV)	EMMCO Mining Sdn Bhd	Austrália	805	0,03	0,24
Cummins Range	Navigator Resources Ltd	Austrália	5	1,70	0,09
Dubbo Zirconia Project	Alkane Resources Ltd.	Austrália	73	0,89	0,65
Milo	GBM Resources Ltd.	Austrália	187	0,06	0,12
Mount Weld CLD	Lynas Corporation Ltd.	Austrália	15	9,69	1,45
Mount Weld Duncan	Lynas Corporation Ltd.	Austrália	9	4,83	0,44
Nolans	Arafura Resources Ltd.	Austrália	56	2,59	1,45
Yangibana (JV)	Hastings Technology Metals Ltd	Austrália	7	1,47	0,10
Yangibana (JV)	Rare Earth Minerals PLC	Austrália	7	1,47	0,10
Total Austrália			2014		5,00
Araxá	MBAC Fertilizantes Corp.	Brasil	28	4,25	1,19
Serra Verde	Mining Ventures Brasil Ltda.	Brasil	909	0,16	1,45
Total Brasil			937		2,64
Ashram Main	Commerce Resources Corp.	Canadá	240	1,90	4,55
Ashram MHREO	Commerce Resources Corp.	Canadá	9	1,68	0,15
Buckton	DNI Metals Inc.	Canadá	3434	0,03	0,88
Buckton South	DNI Metals Inc.	Canadá	497	0,02	0,12
Clay-Howells	Canada Rare Earth Corp.	Canadá	9	0,69	0,06
Eco Ridge	Pele Mountain Resources Inc	Canadá	59	0,16	0,09
Elliott Lake Teasdale	Appia Energy Corp.	Canadá	52	0,19	0,10
Foxtrot	Search Minerals Inc.	Canadá	14	1,04	0,15
Grande-Vallée	Orbite Aluminae Inc.	Canadá	1210	0,05	0,61
Hoidas Lake	Great Western Minerals Group Ltd.	Canadá	3	2,27	0,07
Kipawa (JV)	Matamec Explorations Inc. / Ressources Québec Inc.	Canadá	27	0,40	0,11

Continua

					Continua
PROJETO	COMPANHIA	PAÍS	RM (Mt)	TREO (%)	TREO (Mt)
Lavergne-Springer	Canada Rare Earth Corp.	Canadá	17	1,16	0,20
Montviel	Geomega Resources Inc.	Canadá	267	1,45	3,88
Nechalacho Basal	Avalon Rare Metals Inc.	Canadá	126	1,43	1,80
Nechalacho Upper	Avalon Rare Metals Inc.	Canadá	178	1,32	2,35
Niobec	Magris Resources Inc.	Canadá	1059	1,73	18,36
Strange Lake Enriched	Quest Rare Minerals Ltd.	Canadá	20	1,44	0,29
Strange Lake Granite	Quest Rare Minerals Ltd.	Canadá	473	0,87	4,12
Two Tom	Canada Rare Earth Corp.	Canadá	41	1,17	0,48
Total Canadá			7735		38,36
Storkwitz	Seltenerden Storkwitz AG	Alemanha	5	0,40	0,02
Kvanefjeld	Greenland Minerals and Energy Ltd.	Groelândia	673	1,09	7,37
Sarfartoq	Hudson Resources Inc.	Groelândia	8	1,79	0,14
Sørensen	Greenland Minerals and Energy Ltd.	Groelândia	242	1,10	2,67
TANBREEZ	Rimbal Pty Ltd	Groelândia	4300	0,65	28,06
Zone 3	Greenland Minerals and Energy Ltd.	Groelândia	95	1,16	1,11
Total Groelândia			5318		39,34
Mrima Hill High Grade	Pacific Wildcat Resources Corp.	Quênia	27	7,01	1,89
Mrima Hill Main	Pacific Wildcat Resources Corp.	Quênia	133	3,20	4,25
Total Quênia Total			160		6,15
Kutessay II	Stans Energy Corp.	Cazaquistão	18	0,26	0,05
Tantalus	Tantalus Rare Earths AG	Madagascar	628	0,09	0,56
Xiluvo	Promac Ltda.	Moçambique	1	2,30	0,02
Kangankunde	Lynas Corporation Ltd.	Malawi	3	3,57	0,11
Songwe Hill	Mkango Resources Ltd.	Malawi	32	1,47	0,47
Total Malawi			35		0,58
Lofdal	Namibia Rare Earths Inc.	Namíbia	2	0,50	0,01

Continua

Continua

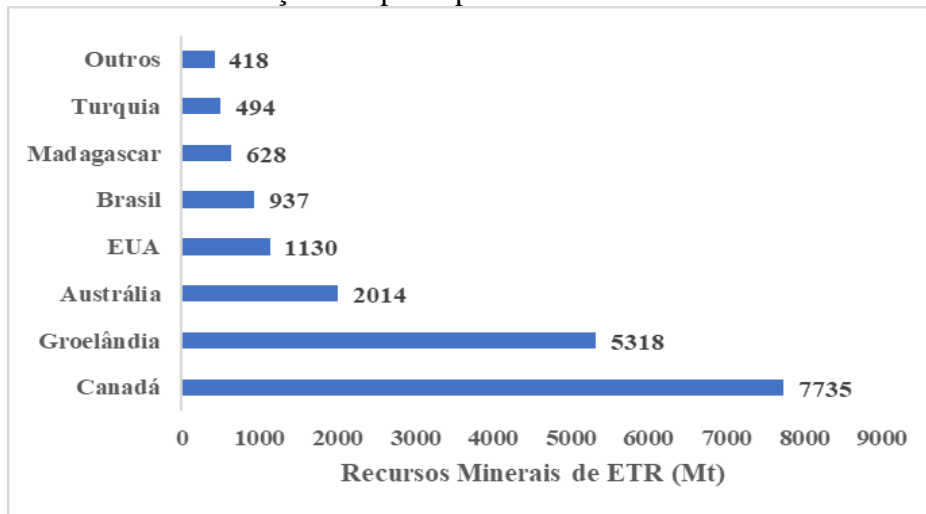
PROJETO	COMPANHIA	PAÍS	RM (Mt)	TREO (%)	TREO (Mt)
Norra Kärr	Tasman Metals Ltd.	Suécia	31	0,61	0,19
Olserum	Tasman Metals Ltd.	Suécia	8	0,60	0,05
	Total Suécia		39		0,24
Aksu Diamas	AMR Mineral Metal Inc.	Turquia	494	0,07	0,35
Ngualla	Peak Resources Ltd.	Tanzania	42	4,16	1,75
Wigu Hill Twiga	Montero Mining and Exploration Ltd.	Tanzania	1	5,00	0,03
	Total Tazania		43		1,77
Bear Lodge	Rare Element Resources Ltd. 58	EUA	58	2,68	1,55
Bokan	Ucore Rare Metals Inc.	EUA	6	0,58	0,04
La Paz	AusROC Metals Ltd.	EUA	128	0,04	0,06
Mountain Pass	Molycorp Inc.	EUA	32	6,48	2,07
Round Top	Texas Rare Earth Resources Corp.	EUA	906	0,06	0,57
	Total EUA		1130		4,29
Glenover (JV)	Galileo Resources PLC	África do Sul	10	2,21	0,22
Glenover (JV)	Fer-Min-Ore (Pty) Ltd.	África do Sul	10	2,21	0,22
Steenkampskraal	Thorium Foundation	África do Sul	1	14,00	0,09
Zandkopsdrift (JV)	Frontier Rare Earths Ltd.	África do Sul	47	1,89	0,89
Zandkopsdrift (JV)	Korea Resources Corp.	África do Sul	47	1,89	0,89
	Total África do Sul		115		2,31
TOTAL GERAL			18673		101,68

* Projetos em desenvolvimento (exploração ou avançados) nos padrões de relatórios internacionais de qualidade e confiabilidade tipo NI-43101, JORC ou SAMREC.

RM = Recurso Mineral; Mt = Milhões de Toneladas e OTR = Somatória dos Óxidos de Terras Raras + Óxido de Ítrio.

Fonte: Adaptado de Canadá (2016).

Gráfico 2 – Distribuição dos principais recursos minerais de ETR conhecidos no mundo



Fonte: Adaptado de Canadá (2016).

2.3 URÂNIO (U) E TÓRIO (Th)

Os elementos U e Th, como dito anteriormente, ocorrem em diversos minerais de terras raras em pequenas proporções (traços), mas também podem ocorrer como substâncias principais formadoras de alguns minerais, como Uraninita (UO_2) e Torita $(Th,U)SiO_4$. Essas substâncias têm uma importância muito significativa no que se refere ao caráter estratégico para o Brasil e, portanto, o seu aproveitamento econômico passa por um rigoroso controle realizado pela União, por meio da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), autarquia criada em 1956 e, atualmente, vinculada ao Ministério de Ciência e Tecnologia. De acordo com a Lei Nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, constituem monopólio da União a pesquisa e a lavra das jazidas dos minérios nucleares, o comércio e a produção de materiais com características nucleares.

Quanto aos usos do urânio, merece destaque a sua aplicação como fonte alternativa de energia limpa, podendo substituir o uso de combustíveis fósseis derivados do petróleo e do carvão na geração de energia elétrica, pois apresenta índice zero de emissão de CO_2 na atmosfera, o que não ocorre com as centrais térmicas convencionais (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2015). A energia núcleo elétrica não emite nenhum gás de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e outros), nenhum gás causador de chuva ácida (dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio), bem como não emite nenhum metal carcinogênico, teratogênico ou mutagênico (arsênio, mercúrio, chumbo, cádmio, etc.) como as alternativas que utilizam combustível fóssil o fazem. O uso do urânio como fonte de energia nuclear também não libera gases ou partículas que causam poluição nas cidades ou diminuição da camada de ozônio. O grande desafio, porém, é a armazenagem segura dos resíduos gerados pelas usinas

de energia nuclear. Além disso, o mesmo processo de enriquecimento de urânio utilizado para produzir combustível pode ser empregado para a utilização em armas atômicas, o que confere a essa substância uma preocupação com sua utilização e ressalta o seu caráter estratégico (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2015).

Além disso, o elemento tório, em breve e em escala global, poderá vir a se tornar uma grande alternativa de fonte de energia “limpa” como matriz energética. Os reatores que funcionam fazendo uso deste elemento são considerados mais eficientes em relação aos que utilizam o urânio como principal fonte de energia e são também considerados mais “limpos” por produzirem, de forma considerável, menos subprodutos. Destaca-se, ainda, dentre os principais usos desse elemento, a sua aplicabilidade como catalizador na conversão de amônia em ácido nítrico, no craqueamento do petróleo e na produção do ácido sulfúrico. O elemento, quando na forma de óxido, pode ser também utilizado na confecção de equipamentos de laboratório que são submetidos a elevadas temperaturas; na indústria de cristais como aditivos em vidros para elevação do índice de refração; e na diminuição da dispersão em que a melhora dessas propriedades garante alta performance na produção de lentes de alta qualidade para câmeras e instrumentos científicos.

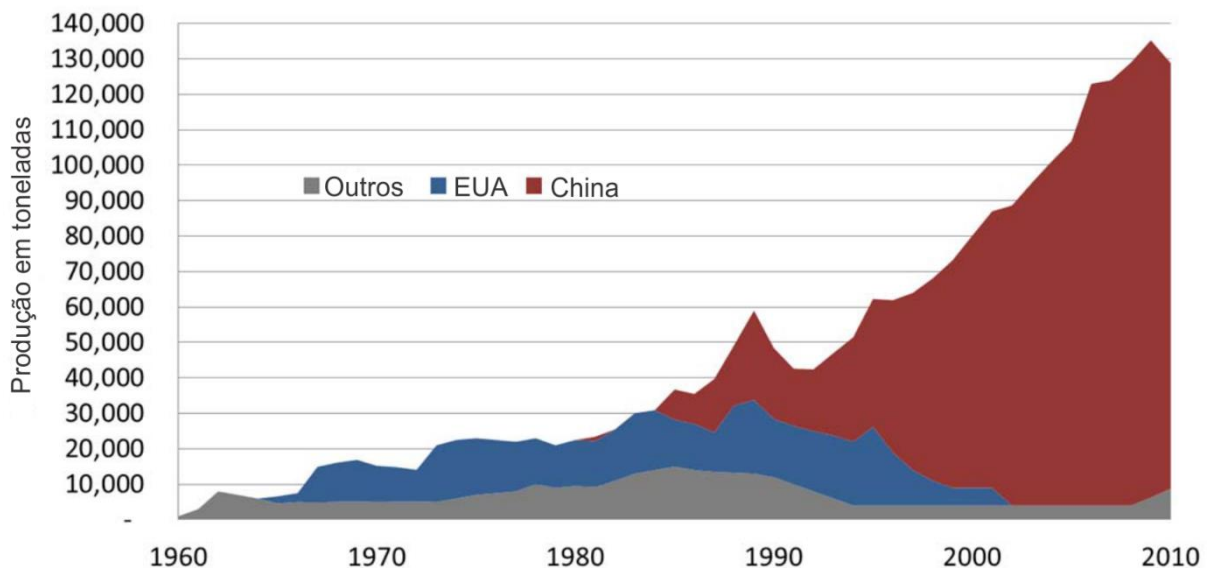
Por outro lado, o tório é comumente encontrado em quantidades pequenas na maioria das rochas, principalmente, as magmáticas e nos solos e sedimentos derivados dela. Tais litologias são significativamente abundantes na crosta onde este elemento se apresenta, aproximadamente três vezes mais abundante do que o urânio. Os solos em geral contêm em média 6 ppm de tório, porém alguns processos formadores de solos e rochas podem enriquecer uma determinada litologia, camada e/ou horizonte desse elemento e é através de processos geológicos que se formam os depósitos minerais importantes para essa substância e outras que ocorrem associadas a ela, como por exemplo os elementos de terras raras (BIONDI, 2015).

Os elementos químicos Urânio e Tório são considerados radioativos em função das suas capacidades de desintegração atômica ao longo do tempo. Esse processo faz com que as substâncias produzam variações de si que podem ser danosas aos seres humanos se ingeridas ou até mesmo quando o indivíduo é exposto a radiações elevadas por períodos longos em regiões onde as concentrações dessas substâncias estiverem acima dos limites aceitáveis à saúde humana (UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, 2000).

2.4 ETR: PRODUÇÃO, PROCESSAMENTO E QUESTÕES AMBIENTAIS DOS ETR

Os registros históricos que se tem conhecimento da produção de ETR demonstram que as atividades de exploração tiveram início no ano de 1960 e, entre os anos de 1965 e 1985, os Estados Unidos foi o principal produtor dessas substâncias (gráfico 3), perdendo esse posto para a China. Após este período, o governo chinês alavancou o controle mundial da produção desses recursos naturais, incluindo restrições internas à exportação para impulsionar-se como potência na produção e na fabricação de produtos de alto valor agregado internamente, especialmente aqueles voltados à produção de energia e à alta tecnologia (CANADA, 2016).

Gráfico 3 – Produção global de óxidos de terras raras 1960-2010



Fonte: United States Geological Survey (2010).

No quadro 3, pode ser evidenciada a produção anual de ETR de acordo com os principais países produtores no mundo no período de 2008 a 2016. Já o gráfico 4 demonstra a representatividade percentual da produção de ETR na China em relação aos demais principais países produtores. Desse modo, os dados do quadro demonstram que nos anos 2008, 2009 e 2010 a China ultrapassou a marca de 120.000 t de ETR, representando, nesse período, 95 a 96% da produção mundial, enquanto os demais países (Brasil, Índia, Malásia e Rússia), somados, tiveram sua produção oscilando entre 4 e 5% de toda produção mundial.

A partir de 2011, nota-se diminuição abrupta da produção chinesa com queda acentuada de - 35.000 t quando comparado à produção de 2009 com a de 2012 e 2013. Alguns autores atribuem o início desse declínio de produção à ruptura nas exportações para o Japão, que

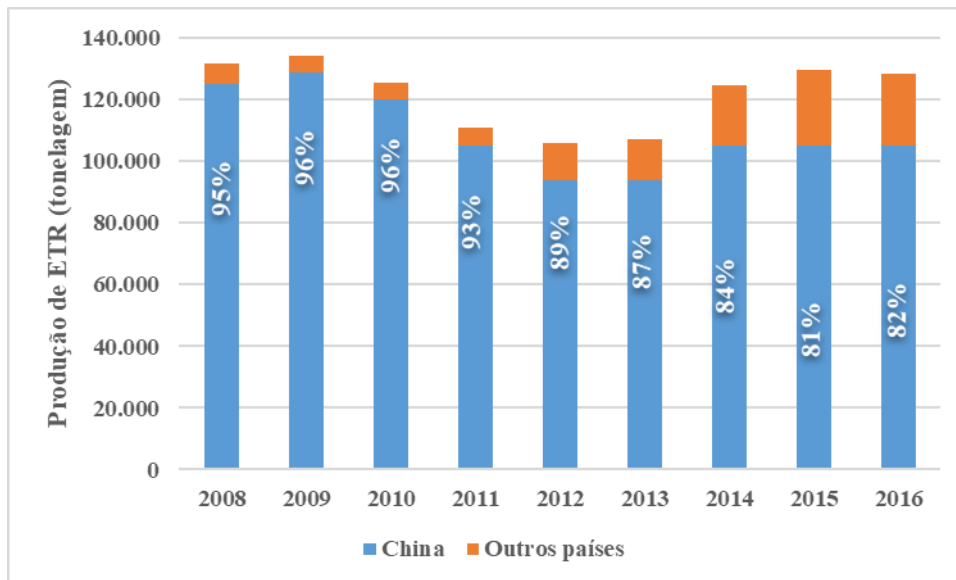
indicou o fato da China pretender embargar exportações de terras raras para colocar o resto do mundo em um "estrangulamento" (ANTHONY, 2010). Já para Gagliardi (2015), a aplicação de novas regulamentações ambientais, de fabricação e mudanças geopolíticas, teria provocado uma diminuição na produção, propositadamente, com objetivo de preservar ao máximo esses recursos naturais importantes e de reduzir a exploração ilegal e excessiva através da redução de cotas de exportações.

Quadro 3 – Principais países produtores de Elemento de Terras Raras (ETR) de 2008-2016

Produção de ETR / ano (toneladas)									
Países	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Australia	—	—	—	2.188	3.220	3.000	8.000	12.000	15.000
Brasil	460	170	140	160	1.620	330	—	880	2.200
China	125.000	129.000	120.000	105.000	93.800	93.800	105.000	105.000	105.000
India	2.700	2.700	2.800	2.800	1.700	1.700	1.700	1.700	1.500
Malásia	120	13	380	410	100	180	240	310	300
Rússia	3.400	2.600	2.300	2.500	2.200	2.500	2.600	2.800	2.800
EUA	—	—	—	—	3.000	5.500	5.400	5.900	—
Tailândia	—	—	—	—	120	130	1.900	760	1.600
Vietnam	—	—	—	—	200	100	—	250	220
Total	131.680	134.483	125.620	113.058	105.960	107.240	124.840	129.600	128.620

Fonte: Adaptado de United States Geological Survey (2019).

Gráfico 4 – Distribuição da produção de ETR em toneladas e sua representatividade percentual em relação aos demais principais produtores no mundo no período de 2008-2016



Fonte: Adaptado de United States Geological Survey (2019).

Como visto anteriormente, na figura 1, é grande a quantidade de ambientes geológicos formadores de depósitos minerais capazes de gerar concentrações de elementos de terras raras passivas de prospecção a fim de se obter a avaliação de recursos minerais e de reservas. Isso

implica em uma complexidade igualmente significativa sobre as propriedades físico-químicas que envolvem o beneficiamento e/ou processamento mineral dessas substâncias.

Porém, os projetos em atividade que se encontram lavrando e comercializando ETR no mundo se utilizam basicamente de lavra a céu aberto, em sua maioria, e tem suas fases de beneficiamento controladas por dois critérios fundamentais que são sugeridos aqui como sendo em função da forma de ocorrência dos ETR, se em cristais ou na forma iônica. A esse agrupamento em duas classes de “ocorrências” será dado o nome de Macro-ocorrências I e II.

1. Macro-ocorrência I — Quando os conteúdos de ETR estiverem associados às diferentes formas de minerais portadores, seja na forma de grãos livres, partículas mistas (agregados de minerais) ou na forma cristalina em rochas. Nesses casos, o minério *rom*, após a lavra, de modo geral e simplista, segue para as seguintes etapas: processos de tratamento de minérios tipo classificação e/ou cominuição, objetivando a liberação de grãos para posterior concentração; separação dos minerais econômicos por processos de diferenciação de densidade; separação magnética; separação eletrostática; e separação gravimétrica ou flotação.
2. Macro-ocorrência II (ETR adsorvidos em argilas (*Ion Adsorption Clays* - IAC)) — Os ETR, neste caso, ocorrem na forma de íons adsorvidos em argilas e assume-se, então, que o *rom* está na forma inconsolidada e/ou parcialmente consolidada, presentes no manto intempérico proveniente de rochas mineralizadas (saprolito), como na região Sul da China (ZHAO, 2017b) ou Minaçú, norte de Goiás, Brasil (ROCHA, 2013). Para esse tipo de minério, considera-se que o aproveitamento econômico dele poderá ser por processos do tipo: lixiviação no local (*in situ leaching*), lixiviação em pilha (*heap leaching*) ou lixiviação agitada em tanques

Os processos de recuperação dos ETR, estejam eles na forma descrita como Macro-ocorrência I ou Macro-ocorrência II, têm como produto, antes da etapa de hidrometalurgia que envolvem a separação dos ETR, a geração de concentrados. No caso dos produtos concentrados a partir do processamento dos ETR contidos na Macro-ocorrência I, serão gerados concentrados mistos de minerais de ETR. Já no caso do processo de recuperação (lixiviação) dos ETR contidos na Macro-ocorrência II, o produto será um precipitado químico de ETR. As etapas posteriores que envolvem a separação e/ou isolamento das terras raras se dão por processos

extremamente complexos que envolvem, em grande medida, processos de hidrometalurgia e/ou pirometalurgia (ANTONIASSI, 2017).

Com relação às questões ambientais que envolvem as atividades relacionadas à pesquisa, ao desenvolvimento, à lavra e ao tratamento do minério de ETR é importante frisar que são vários os impactos ambientais e riscos à saúde humana que essas atividades são capazes de produzir. Durante as etapas de pesquisa mineral, a maior preocupação está associada à não ingestão de partículas desses minerais, uma vez que boa parte dos minerais portadores de ETR mais comuns contém pequenas concentrações de elementos radioativos como Th e U, além de outros metais que também podem ser igualmente carcinogênicos (GUPTA, KRISHNAMURTHY, 2015; RIM, KOO, PARK, 2013).

A monazita, por exemplo, que é a mais comum nos depósitos minerais econômicos, pode conter de 4 a 12% de Th na sua composição e entre 0,1 a 0,5% de urânio (ANTONIASSI, 2017). Isso significa que qualquer processo de beneficiamento aplicado para a concentração de minerais portadores de terras raras, como monazita e outros que também contém quantidades de Th e U na sua composição, irá igualmente concentrar essas substâncias consideradas danosas à saúde humana (RIM, KOO, PARK, 2013). A gravidade destes riscos varia dependendo do tipo de minério ETR, da toxicidade dos contaminantes, do processamento empregado e da implementação de práticas de gestão de resíduos (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012). Portanto, nesses casos, passa a ser objeto de profunda análise de risco ambiental e econômico os empreendimentos de tal natureza, Decreto N° 51.726 (BRASIL, 1963), pois valores de U_3O_8 e ThO_2 superiores a 500 ppm e 2000 ppm, respectivamente, implicam que o produtor deverá pagar a CNEN pelo excedente produzido de U_3O_8 e ThO_2 .

O problema dos teores elevados de Th e U nos depósitos minerais de ETR se agrava nas fases de concentração de minerais, uma vez o processo faz com que a emissão de radiação seja aumentada à medida em que se concentram os minerais portadores de ETR, Th e U, dificultando o processo de tratamento químico, necessário para remoção e/ou isolamento das terras raras. Dessa forma, a viabilidade econômica e ambiental é prejudicada, haja vista o aumento no uso de ácidos fortes, como ácido sulfúrico, que ainda é, especialmente para o beneficiamento da monazita, o método mais usado no beneficiamento de concentrados de minerais de ETR (SHAW, SMUTZ, BRIDGER, 1954; LUIDOLD, AUTREKOWITSCH, 2012).

Dependendo da concentração da solução ácida, ambas as terras raras e tório podem ser dissolvidos juntos ou de forma seletiva dependendo do tipo de mineral que se queira atacar quimicamente (SHAW, SMUTZ, BRIDGER, 1954; LUIDOLD, AUTREKOWITSCH, 2012).

No processo de remoção dos ETR, muitas vezes, outros elementos que não são econômicos acabam sendo também concentrados, inclusive os elementos Th e U, potencializando seus efeitos toxicológicos.

No caso do concentrado de precipitado químico, gerado a partir do que chamamos de Macro-ocorrência II (*Ion Adsorption Clays* - IAC), os riscos com as concentrações de Th e U são praticamente desprezíveis, uma vez que os processos de remoção dos ETR, que estão, neste caso, sob a forma de íons, usam uma simples lixiviação com soluções salinas à temperatura ambiente, que são capazes de produzir um produto (concentrado químico misto de ETR) de alto teor (ROCHA, 2013) com praticamente 0% de Th e U.

Esse processo ocorre por meio de troca iônica (adsorção e dessorção), no qual os íons de terras raras são trocados por cátions como NH_4^+ e Na^+ , contidos nos reagentes (lixiviantes) NaCl e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (os mais comuns) nas plantas de lixiviação no local (*in situ leaching*), nas pilhas de lixiviação (*heap leaching*) ou nos tanques de lixiviação agitada (*agitated leaching*). Este, por sua vez, é mais comum em escalas de laboratórios e plantas piloto (QIU *et al.*, 2008; ROCHA, 2013) e, portanto, a lixiviação não envolve reações capazes de solubilizar Th e U que estão contidos nos minerais portadores de ETR.

No entanto, existem muitas discussões ambientais acerca da produção de ETR tipo IAC envolvendo as diferentes técnicas empregadas. Estudos apontam que tanto as técnicas de lixiviação no local (*in situ leaching*), quanto aquelas que necessitam de remoção do minério na frente de lavra fazem uso de produtos químicos que têm sido responsáveis por doenças e envenenamento ocupacional de moradores nos locais onde essas plantas de lixiviação são instaladas. Nesses casos, também há registros de poluição aquática e de destruição de terras agricultáveis em decorrência da acidificação de solos, das águas superficiais e subterrâneas onde as atividades de extração desses recursos estão em desacordo com as questões de sustentabilidade desde a mineração, o transporte, o processamento e a destinação dos resíduos (HILSUM, LINDSEY, 2009).

Vale ressaltar que alguns dos radionuclídeos e metais contaminantes relacionados a essas atividades são ainda classificadas por agências de saúde internacionais e federais como cancerígenas. Todavia, a recuperação de terras raras a partir de depósitos do tipo (IAC) por meio de adsorção e de dessorção iônica é mais viável economicamente e ambientalmente (se controlado) do que a recuperação a partir de outros tipos de fontes. Isso deve-se à facilidade de mineração, à ausência de etapas de beneficiamento, de desmonte com explosivo e cominuição.

Outro ponto muito relevante é que os depósitos do tipo IAC, apesar de apresentarem, de modo geral, teores de terras raras considerados baixos, as técnicas de processamento

empregadas no aproveitamento econômico dessas substâncias não carregam consigo concentrações significativas de Th e U no produto da lixiviação (precipitado químico) (ROCHA, 2013).

2.5 ÍNDICES QUÍMICOS DE INTEMPERISMO DE ROCHAS

Os índices químicos de intemperismo de rochas, muitas vezes chamados de índices de alteração de rochas, são amplamente utilizados para caracterização de perfis intempéricos de rochas. Baseiam-se na combinação entre razões percentuais dos elementos químicos maiores contidos nas rochas e são considerados mais móveis em um sistema de “lixiviação natural” ao qual as rochas (protólitos) foram submetidas ao longo do tempo geológico durante o processo pedogenético (PRICE, VELBEL, 2003).

Através desses índices, é possível estabelecer o quão evoluído está um determinado horizonte do perfil intempérico analisado, permitindo a caracterização dessa porção e a definição de parâmetros relevantes para avaliação de depósitos minerais formados por processos de enriquecimento supergênico, como o abordado aqui neste trabalho. Assim sendo, a tabela 3 demonstra, de forma resumida, os principais índices químicos de intemperismo, segundo Price e Velbel (2003), utilizados na caracterização de perfis intempéricos derivados de diferentes tipos de rochas.

Normalmente, esses parâmetros são aplicados por plotagem de algum índice específico versus a profundidade do perfil intempérico, fornecendo uma informação acerca do quão próximo aquele resultado está, em termos de profundidade, do embasamento rochoso (rocha fresca). Na maioria dos casos, os valores dos resultados obtidos com a composição dos índices apresentam uma tendência contínua de aumento ou decréscimo dos seus valores, permitindo, desse modo, a estimativa de características físico-químicas extremamente relevantes para as interpretações dos dados (MAYNARD, 1992; CIAMPONE, 1995; DUZGOREN-AYDIN *et al.*, 2002).

Tabela 3 – Sumário dos principais índices de intemperismo químico aplicados a perfis intempéricos

Índice	Fórmula	Rocha fresca	Rocha Intemperizada	Tendência aumento do intemperismo	Permite mobilidade de Al	Referência
R	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	> 10	0	Negativo	Não	Ruxton (1968)
WIP	$(100)[(2\text{Na}_2\text{O}/0.35)+(\text{MgO}/0.9) + (2\text{K}_2\text{O}/0.25)+(\text{CaO}^*/0.7)]$	> 100	0	Negativo	Sim	Parker (1970)
V	$(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O})/(\text{MgO}+\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O})$	< 1	Infinito	Positivo	Não	Vogt (1927)
CIA	$(100)[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$	≤ 50	100	Positivo	Não	Nesbitt and Young (1982)
CIW	$(100)[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O})]$	≤ 50	100	Positivo	Não	Harnois (1988)
PIA	$(100)[(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})]$	≤ 50	100	Positivo	Não	Fedo et al. (1995)
STI	$(100)[(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)/((\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)^2 + (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2))^{-1}]$	> 90	0	Negativo	Não	Jayawardena and Izawa (1994)

*Para o intemperismo de rochas de silicato, o CaO deve ser restrito àquele derivado de minerais de silicato. Fonte: Adaptado de Price e Velbel (2003).

2.5.1 Ruxton Ratio (R)

Proposto por Ruxton (1968), o *Ruxton Ratio* (R) trata-se de um índice químico considerado simples por utilizar apenas uma razão entre dois elementos químicos: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (tabela 5). Ruxton se baseou na perda de sílica em relação à alumina e considerou esta como imóvel no sistema de perfis intempéricos desenvolvidos a partir de rochas homogêneas ácidas a intermediárias, nas quais a perda da sílica com valores acima de 10 seriam indicativos de perfis intempéricos desenvolvidos (naturalmente lixiviados), enquanto valores mais próximos de 0 seriam indicativos de proximidade com a rocha fresca. Através de testes realizados em regiões úmidas ao redor do mundo, ele observou que R tem apresentado boas correlações em perfis desenvolvidos em rochas ígneas e metamórficas, com base na análise do conteúdo de sesquióxido durante o intemperismo, onde, como produtos do intemperismo, são produzidos caulim e/ou alofano (produtos que têm razões molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 2: 1).

2.5.2 Weathering Index of Parker (WIP)

Também chamado de Índice de Resistência de Parker (WIP; ESWARAN, 1973; HAMDAN, BURNHAM, 1996), o *Weathering Index of Parker* é comumente aplicado a rochas ígneas silicáticas ácidas, intermediárias e básicas. O índice de Parker (WIP, tabela 3) baseia-se nas proporções de álcalis e metais alcalino-terrosos (sódio, potássio, magnésio e cálcio) presentes nas rochas intemperizadas, considerando estes como sendo os elementos mais móveis dentre os principais elementos maiores e pressupondo não haver constância de nenhum dos sesquióxidos no sistema de desenvolvimento do perfil intempérico. Com base na força de ligações dos oxigênios presentes nas moléculas de Na_2O , K_2O , MgO e CaO , o WIP considera também a mobilidade dos elementos sódio, potássio, magnésio e cálcio, respectivamente (PARKER, 1970). Apesar de Parker (1970) ter aplicado o WIP em rochas consideradas heterogêneas e metamórficas com boa correlação, este índice depende apenas de álcalis móveis e álcalis terrosos. Além disso, a ausência da alumina na fórmula proporciona barulhos quando o índice é aplicado em materiais altamente intemperizados, por exemplo, perfis intempéricos evoluídos para laterização e/ou bauxitização, tornando impreciso o seu uso nestes casos (ESWARAN *et al.*, 1973).

2.5.3 Vogt's Residual Index (V)

Proposto por Vogt (1927), o *Vogt's Residual Index* (V) foi aplicado para investigar o quanto as argilas existentes nos Depósitos Quaternários da área Numedal na Noruega foram intemperizadas, mais precisamente, para comparar resultados da química global entre amostras de argilas moraine (de geleiras) e argilas marinhas. Ele concluiu que as argilas moraine foram mais intemperizadas do que as argilas marinhas, sugerindo que o intemperismo cessou após deposição desses sedimentos na bacia marinha (V, tabela 3).

2.5.4 Chemical Index of Alteration (CIA)

Nesbitt e Young (1982) desenvolveram o Índice Químico de Alteração (CIA) para reconstruir o paleoclima dos sedimentos do Paleoproterozóico do Supergrupo Huroniano, ao norte do Lago Huron. Para isso, eles utilizaram relações entre os óxidos maiores Al_2O_3 , CaO , Na_2O e K_2O , conforme expressos na tabela 3. Os resultados obtidos sugeriram que a bacia deposicional dos lutitos migrou através de várias zonas climáticas, de aproximadamente 32° de

latitude para aproximadamente 60° de latitude. Estas conclusões foram confirmadas com estudos paleomagnéticos, uma vez que o CIA é fortemente influenciado pela conversão de feldspatos (que dominam a crosta superior) para argilas como a caulinita (NESBITT, YOUNG, 1984, 1989; FEDO *et al.*, 1995; MAYNARD *et al.*, 1995).

O CIA tem utilização em larga escala para avaliações geoquímicas de paleossolos (por exemplo, SUTTON *et al.*, 1990; MAYNARD, 1992; SUTTON, MAYNARD, 1993) e é o principal índice químico utilizado para auxiliar em interpretações relacionadas a perfis de intemperismo de rochas mineralizadas em ETR no mundo. Sua atuação recai principalmente para depósitos do tipo ETR adsorvidos em argilas (IAC), como é o caso dos depósitos de ETR de Muzishan, Keshutang e Getengzui, no sul de Jiangxi, China (ZHAO Z *et al.*, 2017b), Minaçú, Goiás, Brasil (ROCHA, 2013) e Sudeste do Estado de São Paulo (FARIA, 2018).

Nesse sentido, Zhao *et al.* (2017a) constatou que o enriquecimento de ETR em rochas de origem graníticas envolve múltiplos estágios de evolução do magma e alteração hidrotermal, sendo este último mais importante que o primeiro, além de afirmar que a distribuição dos elementos terras raras leves (ETRL) e dos elementos terras raras pesadas (ETRP) no perfil de intemperismo pode ser resumida a dois estágios. Durante o estágio inicial de intemperismo, os ETRL são enriquecidos na parte superior da zona completamente intemperizada (horizonte B; no caso deste estudo, chamamos esta camada de *mottled zone*), enquanto os HREE migram e se enriquecem na parte inferior do perfil de intemperismo, equivalente ao nosso saprolito. Com o progresso do processo de intemperismo em direção à sua fase tardia, a concentração de ETRL na parte superior do perfil aumenta, de modo que a capacidade de migração é maior do que a da capacidade de adsorção, fazendo com que os LREE também migrem gradualmente para as porções mais inferiores do perfil (saprolito), ou seja, tanto os ETRL quanto os ETRP se tornarão enriquecidos no mesmo nível (ZHAO Z *et al.*, 2015, 2017a).

No caso dos depósitos do tipo *Ion Adsorption Clays* do Sul da China, Zhao *et al.* (2017b) resumiram a classificação desses recursos em diferentes estratos verticais utilizando como ferramenta de correlação o índice químico de alteração CIA e o conteúdo de REE da seguinte forma: CIA < 85%, o grau de intemperismo apresenta correlação positiva para o conteúdo de REE (IAC), ao passo que no caso de CIA > 85% e <100%, a correlação é negativa para o conteúdo de ETR tipo IAC. No nosso caso, para auxiliar na classificação vertical dos compartimentos mineralizados, adotamos uma classificação mais detalhada como será discutido mais adiante.

2.5.5 Chemical Index of Weathering (CIW)

O *Chemical Index of Weathering* (CIW) se assemelha ao CIA, porém elimina o K_2O da equação (tabela 5). Desenvolvido por Harnois (1988) e empregado por Maynard (1992), ele foi amplamente utilizado desconsiderando a presença do K_2O por considerar desnecessária a associação da alumina com o K-Feldspato presente em rochas intemperizadas ou não (FEDO *et al.*, 1995). Mesmo assim, da mesma forma que o CIA, ele é utilizado considerando a avaliação da conversão de feldspatos em argilas, neste caso, feldspatos mais sódicos do que potássicos (NESBITT, YOUNG, 1984, 1989; FEDO *et al.*, 1995; MAYNARD *et al.*, 1995).

2.5.6 Plagioclase Index of Alteration (PIA)

O *Plagioclase Index of Alteration* (PIA) foi proposto por Fedo *et al.* (1995) como alternativa ao CIW (tabela 3). Essa é uma proposta interessante quando o intemperismo de plagioclásio precisa ser monitorado, uma vez que este mineral é abundante em rochas silicáticas variadas e apresenta comportamento de dissolubilidade fácil no meio natural quando submetido aos processos intempéricos (FEDO *et al.*, 1995).

2.5.7 Silica–Titania Index (STI)

O *Silica-Titania Index* (STI) trata-se de um índice químico que utiliza relações entre os conteúdos de sílica, de alumina e de óxido de titânio (tabela 3), desenvolvido para correlacionar o grau de intemperismo químico de rochas silicáticas metamórficas em regiões tropicais para verificar sua relação quanto ao grau de intemperismo e de propriedades de engenharia, como, por exemplo, parâmetros de carga pontual de resistência e resistência à compressão uniaxial (JAYAWARDENA, IZAWA, 1994). Testes da aplicabilidade do STI em rochas frescas e intemperizada, em perfis desenvolvidos a partir de rochas gnáissicas e quartzitos do Sri Lanka, apresentaram boa correlação quando comparados ao Ruxton Ratio (JAYAWARDENA, IZAWA, 1994).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo baseia-se em dados de um programa de prospecção mineral realizado em rochas do Complexo Jequié, no sudeste do estado da Bahia, Brasil, onde foram realizados trabalhos de mapeamento geológico, levantamento gamaespectrométrico terrestre, sondagens com trado mecânico e estudos de caracterização mineralógica.

Um total de 450 furos de sondagem a trado mecânico foram realizados em uma área de aproximadamente 2800 hectares. Todos os furos foram verticais e realizados sobre o perfil intempérico das rochas mineralizadas em ETR da região em caráter exploratório, com coleta de amostra para análise química a cada metro perfurado. Os furos apresentaram profundidade média de 9,12 metros, com profundidade máxima de 26 metros.

Dos 450 furos realizados, 103 foram escolhidos para este estudo, correspondendo a 953 amostras, e os critérios para escolha desse montante serão melhor descritos no item 3.2. As amostras foram determinadas por meio de fusão com metaborato de lítio através de espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma acoplado (ICP-OES e ICP-MS) no laboratório da SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. Na tabela 4, encontram-se as informações acerca das substâncias submetidas à dosagem que forma objetos de investigação em cada amostra coletada.

Tabela 4 – Substâncias analisadas, método de determinação e limites de detecção (LD)

Determinação por Fusão com Metaborato de Lítio - ICP-OES					
Substância	LD (%)	Substância	LD (%)	Substância	LD (ppm)
SiO ₂	0,01 - 90	MgO	0,01 - 30	Ba	10 - 100000
Al ₂ O ₃	0,01 - 75	P ₂ O ₅	0,01 - 25	Sr	10 - 100000
Na ₂ O	0,01 - 30	TiO ₂	0,01 - 25	Zn	5 - 10000
K ₂ O	0,01 - 25	MnO	0,01 - 10	Zr	10 - 100000
CaO	0,01 - 60	Cr ₂ O ₃	0,01 - 10	V	5 - 10000
Fe ₂ O ₃	0,01 - 75				
Determinação por Fusão com Metaborato de Lítio - ICP-MS					
Substância	LD (ppm)	Substância	LD (ppm)	Substância	LD (ppm)
La	0,1 - 10000	Er	0,05 - 1000	Mo	2 - 10000
Ce	0,1 - 10000	Tm	0,05 - 1000	Nb	0,05 - 1000
Pr	0,05 - 1000	Yb	0,1 - 1000	Ni	5 - 10000
Nd	0,1 - 10000	Lu	0,05 - 1000	Rb	0,2 - 10000
Sm	0,1 - 1000	Y	0,05 - 10000	Ta	0,05 - 10000
Eu	0,05 - 1000	Co	0,5 - 10000	Th	0,1 - 10000
Gd	0,05 - 1000	Cs	0,05 - 1000	Tl	0,5 - 1000

Continua

Continua

Tb	0,05 - 1000	Cu	5 - 10000	Sn	0,3 - 1000
Determinação por Fusão com Metaborato de Lítio - ICP-MS					
Dy	0,05 - 1000	Ga	0,1 - 10000	U	0,05 - 10000
Ho	0,05 - 1000	Hf	0,05 - 500	W	0,1 - 10000

Notas: LD = limite de detecção; ppm = parte por milhão; ICP-OES = espectroscopia de plasma indutivamente acoplado de emissão óptica; ICP-MS = espectroscopia por plasma indutivamente acoplado de massa.

Fonte: Elaboração própria em 2019.

Amostras que apresentaram concentrações de ETR com valores acima do LD superior foram submetidas à reanálise ajustando-se à curva de calibração do equipamento para dosagens expressas em valores percentuais. Dessa forma, nenhuma amostra deixou de ter seu resultado devidamente dosado.

3.1 GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE ETR EM ROCHAS PERTENCENTES AO COMPLEXO JEQUIÉ (BA), BRASIL

Nesta seção faremos uma abordagem resumida sobre a geologia local da área baseada em estudos de pesquisadores com trabalhos publicados na região e também a partir de dados de campo que foram coletados a partir de um programa de pesquisa mineral realizado na região com condução do autor deste trabalho.

3.1.1 Geologia

Recentemente, Fernandes *et al.* (2019) propuseram uma nova classificação geológica e estratigráfica para as rochas do Complexo Jequié, as quais ocorrem nos municípios de Jequié, Jitaúna e Itagi no sudeste do estado da Bahia. Eles reclassificaram essas rochas como sendo um conjunto de metatonalitos, de metatrandhjemitos e de metagranodioritos associados a metabásicas, principalmente metagabronoritos, a intermediárias, a rochas metaultramáficas, a serpentinitos e a piroxenitos. Ocorrem, ainda, pequenos corpos de metassedimentos quartzíticos, formações ferríferas, xistos grafitosos, mármore, rochas calcossilicáticas e biotita-granada-cordierita-silimanita-quartzo fels (ROBERTSON, 1999). Outras unidades também importantes nesta região foram descritas e evidenciadas por estes autores. São elas a Suíte Plutônica da Volta do Rio, o Maciço Aiquara, o Ortopiroxênio-metaleucogranitos e a Granada-metaleucogranitos. Estes mesmos autores sugerem que a ocorrência de ETR nessa região está relacionada a uma sucessão de eventos geológicos ocorridos no neoarqueano 2,5 Ga e está intimamente ligada à presença de rochas máficas, intermediárias e ácidas, com características

alcalinas, e ainda associada à presença de leucogranitos monazíticos da Suíte Plutônica Volta do Rio.

Os dados que serão apresentados e discutidos neste estudo são produtos de uma campanha de prospecção mineral realizada na região entre Jequié e Jitaúna, sudeste da Bahia, trabalhos estes conduzidos pelo autor dessa dissertação com o propósito de buscar depósitos minerais de ETR com potencial econômico para avaliação de recursos e reservas. Posto isso, foram realizados trabalhos de mapeamento geológico, geoquímica de superfície (solo e rocha), sondagens exploratórias, levantamento gamaespectrométrico terrestre, ensaios de caracterização mineralógica e tecnológica, dentre outros. Embora os estudos realizados até o momento não permitam estabelecer com clareza a gênese da origem primária da mineralização de ETR presente nessa região, foi possível constatar ao menos quatro diferentes tipos de metalotectos de ETR importantes. São eles:

- i. ETR em veios de quartzo e milonitos (ETR silicatos e fosfatos);
- ii. ETR em aluvio, elúvio e colúvio (ETR fosfatos);
- iii. ETR em zonas mosqueadas (ETR óxidos, hidróxidos e Al-fosfatos);
- iv. ETR em saprolito (ETR *Ion Absorption Clays* – IAC).

Os trabalhos de campo sugerem que essas rochas foram submetidas a um extenso processo de metamorfismo predominantemente no fácies granulito. Esse evento pode ter provocado remobilização de ETR contidos nessas rochas e sua reconcentração através de recristalização de alguns minerais portadores de terras raras, dando origem a *ore shoots* (zonas de alto teor de ETR). Trata-se, ainda, de um modelo conceitual que carece de trabalhos de maior escala de detalhe que sejam atrelados a um estudo mais profundo da geocronologia complexa das rochas dessa região, com o intuito de identificar e associar, de forma mais assertiva, essa sucessão de eventos geológicos com tais ocorrências. Portanto, o modelo sugerido aqui pode ser considerado ainda de modo conceitual.

- i) ETR em veios de quartzo e milonitos (ETR em silicatos e fosfatos);

Essas rochas são encontradas frequentemente associadas a zonas de cisalhamento. Desse modo, os veios de quartzo ocorrem alongados, concordantes com o trend regional ~30N, paralelo à zona de cisalhamento, muitas vezes encaixados em milonitos, caracterizando, assim, aparente origem a partir da segregação metamórfica (metassomatismo) das rochas cisalhadas e/ou milonitizadas. Os corpos ocorrem de tamanhos variados com até 20 metros de

comprimento e 1,2 metros de largura, são descontínuos e, por vezes, apresentam-se fraturados e/ou falhados.

Os milonitos ocorrem igualmente alongados e concordantes com o trend regional, variam de extensão, mas podem chegar, de forma descontínua, a até 30m de comprimento. Geralmente são estreitos e igualmente descontínuos, porém apresentam um paralelismo que gera ocorrências em faixas que podem ultrapassar 10m de largura. Sua composição é essencialmente quartzo feldspática com altos teores de Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 e Nb_2O_5 , o que denota um fenômeno hidrotermal de enriquecimento. Por vezes é possível identificar monazita, apatita e zircão como minerais acessórios, possivelmente produtos de recristalização metassomática.

Fotografia 1 – Veio de quartzo mineralizado em ETR



Fonte: Elaboração própria em 2019.

Fotografia 2 – Milonito mineralizado em ETR



Fonte: Elaboração própria em 2019.

ii) ETR em aluvio, elúvio e colúvio (ETR em fosfatos, óxidos e hidróxidos);

Trata-se de um horizonte caracterizado por apresentar muitos fragmentos de minerais e rochas em que os grãos ocorrem na forma agregados de óxidos, hidróxidos, e quartzo preservados, com tamanhos variados desde milimétricos a centimétricos, em uma matriz predominantemente arenosa com presença de matéria orgânica. Esses horizontes normalmente não são espessos e raramente ultrapassam 0,5 m, mas podem se estender por grandes áreas, comumente associados a zonas de depressão. Podem ser confundidos com solo residual devido à presença de matéria orgânica e de fragmentos de quartzo, o que lhe confere características que permitem identificá-los como solo-coluvionar. Dados obtidos a partir de um estudo de caracterização mineralógica em amostras destes horizontes demonstram que há presença de minerais de terras raras do grupo dos fosfatos, ocorrendo na forma de agregados com óxidos e hidróxidos de ferro. Algumas amostras desse tipo de solo apresentaram concentrações de OTR acima de 1%.

Fotografia 3 – Solo do tipo coluvionar



Fonte: Elaboração própria em 2019.

iii) ETR em zonas mosqueadas (ETR óxidos, hidróxidos e Al-fosfatos)

Trata-se de horizonte do perfil intempérico que se apresenta intensamente lixiviado e corresponde a um solo maduro com predominância da cor alaranjada a avermelhada devido à forte presença de oxidação, com faixas esbranquiçadas e amareladas (tons variegados). É composto por grânulos de quartzo e, por vezes, feldspatos envoltos em matriz caulínica, porém o intenso processo de intemperismo raramente guarda nesse horizonte registros reliquiais da rocha protólito. Ocorre bem distribuído em toda região e se estende por quilômetros, apresentando espessuras variadas, podendo chegar a mais de 20 metros, com média acima de 5 metros. Nesses horizontes, é marcante a presença de faixas enriquecidas em ferro, oriundas de processo de laterização, com destacado enriquecimento abrupto de ETR. A grande maioria do total de óxido de terras raras contido nas faixas enriquecidas deve-se a grandes concentrações de Ce que, associado a um abrupto enriquecimento de Th, demonstra claramente um processo de segregação em face dos fenômenos de enriquecimento dos elementos nesse tipo de modelo de depósito mineral, associado a processos supergênicos.

Fotografia 4 – Marcação de uma coleta de amostra de canal realizada em um corte de estrada em zona mosqueada



Fonte: Elaboração própria em 2019.

Fotografia 5 – Fragmento de testemunho de sonda de uma amostra de zona mosqueada coletada. Destacam-se fragmentos milimétricos de grãos de quartzo preservados na matriz argilo-siltosa



Fonte: Elaboração própria em 2019.

iv) ETR em saprolito (ETR *Ion Adsorption Clays* – IAC)

Este horizonte localiza-se logo abaixo da zona mosqueada, quando ela ainda se encontra preservada acima dele, ou seja, quando não foi removida pelos processos erosionais ao longo do tempo. É o horizonte que mais se aproxima da rocha protólito, pois nele é possível identificar, ainda preservados e/ou parcialmente intemperizados, alguns dos minerais formadores do protólito. Apresenta frequentemente textura e/ou estruturas visíveis da rocha original, tais como orientação preferencial dos grãos, estiramento ou pequenas segregações, para o caso de saprolitos derivados de rochas que guardam na sua gênese esses registros geológicos.

Além disso, é também nessa camada que se espera maiores concentrações de ETR adsorvidos em argilas, uma vez que o processo de enriquecimento supergênico se dá de cima para baixo por lixiviação natural dos minerais portadores de terras raras, os quais, ao serem solubilizados, liberam ETR na forma catiônica, com valência positiva. Estes, por sua vez, ao serem translocados para as porções inferiores do perfil intempérico, tendem a ser adsorvidos por ilitas e caulinitas formadas a partir do intemperismo dos feldspatos (em grande parte). Sendo negativamente carregados, os argilominerais adsorvem os íons catiônicos dos ETR lixiviados das camadas superiores. Assim, os horizontes se apresentam bem espessos na região,

podendo chegar a mais de 10 metros de espessura em alguns trechos das rochas do Complexo Jequié.

Fotografia 6 – Saprolito fragmentado de coloração bege



Fonte: Elaboração própria em 2019.

Amostras de rochas foram coletadas em campo e enviadas para laboratório para análise química. Os resultados demonstraram a heterogeneidade dos diferentes tipos de metalotectos de ambiente primário que ocorrem na região e mostraram que são passíveis de serem investigados sob ponto de vista prospectivo para delimitação de alvos potencialmente econômicos.

Vale ressaltar que o foco deste trabalho é a mineralização supergênica presente na região, derivada dos processos de intemperismo ao qual essas rochas com elevado *background* em ETR foram submetidas ao longo do tempo. Porém, as concentrações de ETR presentes nestes corpos de rocha mineralizados não devem ser descartadas como um potencial econômico importante a ser mensurado em trabalhos futuros. Nesse contexto, a tabela 5 dá a composição química dos principais tipos de rocha que contêm concentrações de ETR relevantes a este estudo.

Tabela 5 – Composição química das amostras de rocha do depósito de ETR em rochas pertencentes ao Complexo Jequié, Bahia, Brasil

Substância	Milonito	Veio de quartzo	Rocha básica		Granitos
	SMI-02	SVQ-03	SBA-05	SGN-07	SGN-08
(%)					
Al ₂ O ₃	2,24	2,30	13,45	11,44	11,91
CaO	0,24	0,07	7,08	1,28	1,84
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe ₂ O ₃	8,52	6,76	11,72	3,92	4,83
K ₂ O	0,04	0,02	0,87	5,31	4,98
MgO	0,01	0,03	2,40	0,43	0,56
MnO	0,01	0,12	0,24	0,05	0,06
Na ₂ O	0,01	0,01	4,17	2,50	2,72
P ₂ O ₅	3,10	1,33	2,45	0,05	0,17
SiO ₂	66,68	75,62	51,75	75,39	74,15
TiO ₂	4,57	2,22	1,10	0,47	0,66
LOI	3,59	3,80	0,40	0,32	0,16
OTR	6,24	5,38	1,87	0,10	0,05
(ppm)					
La	15859,5	8888,4	4540,9	179,5	107,2
Ce	32481,3	36615,3	8698,8	376,8	211,2
Pr	1500,0	1458,3	832,0	43,8	23,7
Nd	8498,7	4149,5	2571,0	156,0	82,3
Sm	989,7	541,9	361,2	28,1	14,3
Eu	16,9	9,5	7,8	2,2	2,2
Gd	603,6	479,0	270,5	24,5	11,8
Tb	78,0	56,2	40,3	3,7	1,8
Dy	395,6	283,5	217,8	20,8	10,7
Ho	69,8	48,9	40,2	4,0	2,2
Er	185,6	131,0	106,0	10,5	6,4
Tm	22,9	17,8	13,8	1,4	0,7
Yb	131,3	106,2	78,8	9,3	5,7
Lu	17,5	13,4	10,4	1,2	0,8
Y	1590,4	1030,7	904,8	114,4	54,7

OTR = somatório dos óxidos de terras raras + óxido de ítrio.

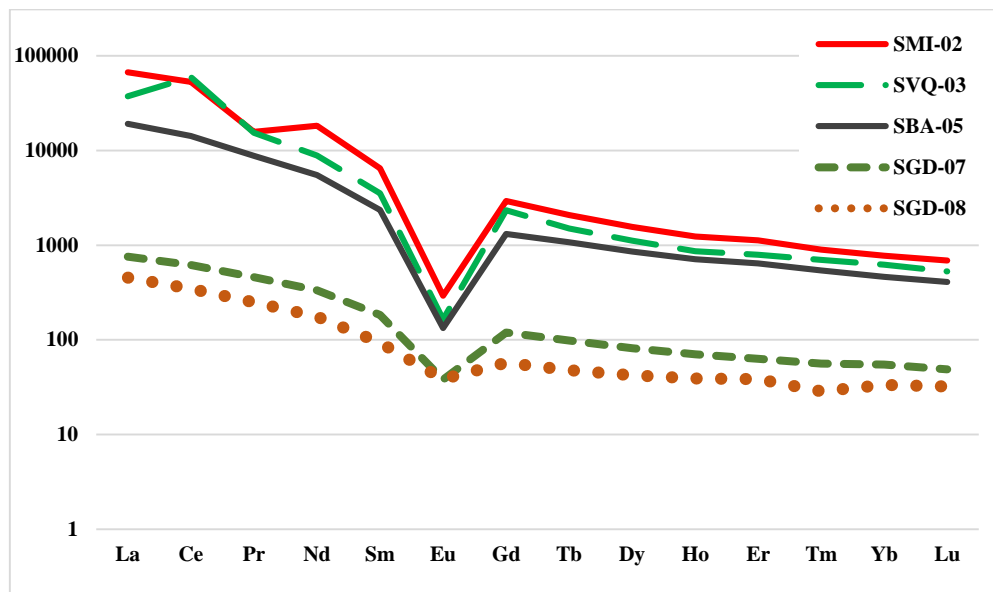
Fonte: Elaboração própria em 2019.

Os granitos observados em campo como sendo favoráveis a conter mineralizações de ETR estão representados na tabela 5 pelas amostras SGN-07 e SGN 08. Essas rochas estão inseridas no contexto geológico das rochas do Complexo Jequié e, associado a elas, ocorrem comumente milonitos e veios de quartzo com altas concentrações de ETR (respectivamente, amostras SMI-02 e SVQ-03 na tabela 5). Nesse mesmo contexto geológico, outras rochas também apresentam concentrações importantes de ETR, nomeadamente as metamórficas e

metaultramáficas da região (FERNANDES *et. al.*, 2019). Na tabela 5, elas estão representadas pela amostra SBA-05.

As rochas cuja composição química foi apresentada na tabela 5 tiveram seus conteúdos de ETR normalizados. Assim, os respectivos padrões de distribuição desses elementos podem ser comparados através do gráfico 5.

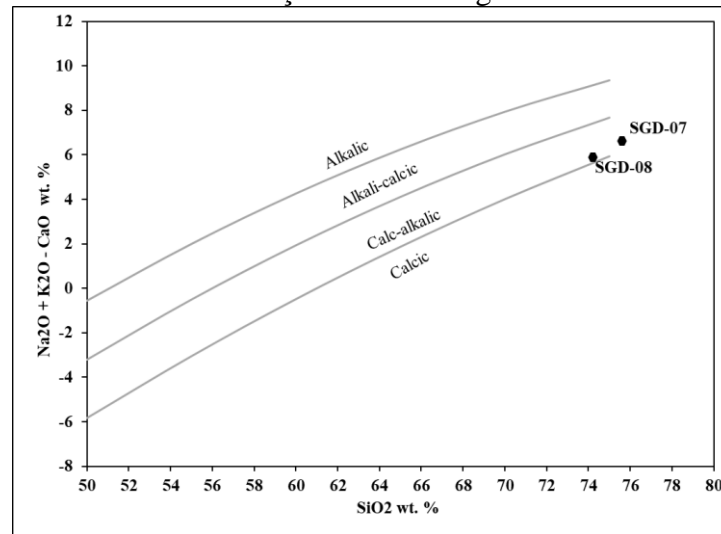
Gráfico 5 – Distribuição dos conteúdos de ETR normalizados em relação ao condrito de Sun e McDonough (1989), para os resultados obtidos com as análises químicas das rochas da tabela 5



Fonte: Elaboração própria em 2019.

O padrão de distribuição dos ETR demonstrado no gráfico 5 evidencia que as rochas apresentam, de modo geral, uniformidade quanto ao maior enriquecimento em terras raras leves em relação aos pesados. As rochas descritas como milonito, veio de quartzo e máficas são as que apresentaram teores significativamente mais elevados para todos os elementos de ETR.

Gráfico 6 – Classificação das rochas graníticas da tabela 5



Fonte: Adaptado de Frost *et al.* (2001).

O gráfico 6 classifica as rochas graníticas SGN-07 e SGN-08 como calcialcalinas de alto potássio, nas quais ocorrem concentrações de K₂O acima de 4% e de SiO₂ superiores a 74%. Rochas graníticas com essas características e também com concentrações de ETR acima de 400 ppm e baixas concentrações de P₂O₅, quando expostas a um regime intempérico intenso de clima quente e úmido, podem desenvolver saprolitos e grandes chances de conter mineralizações de ETR similares aos depósitos IAC do sul da China (BAO, ZHAO, 2008; HOSHINO, SANEMATSU, WATANABE, 2016).

3.1.2 Mineralogia

Este tópico apresenta os resultados dos estudos de caracterização mineralógica executados em seis amostras mineralizadas de terras raras, em um trabalho efetuado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da EPUSP, com a interveniência da Fundação para o Desenvolvimento Tecnológica da Engenharia (FDTE).

Os estudos efetuados tiveram por objetivo obter a composição mineralógica e avaliar a forma de ocorrência, de associação dos minerais de terras raras e a partição dos elementos químicos de interesse (notadamente dos elementos de terras raras). Nesse sentido, os trabalhos foram executados compreendendo análises granulométricas, seguidas de estudos mineralógicos por microscopia eletrônica de varredura com sistema de análise de imagens acoplado (MLA) e por difração de raios X.

As análises químicas necessárias para a realização do presente estudo foram executadas pela SGS GEOSOL Laboratórios. Portanto, os estudos foram realizados em seis amostras,

identificadas por JEQCMT001 a JEQCMT006, as quais apresentavam aspecto terroso, granulometria variada e foram encaminhadas ao LCT com massas entre 5 e 30 kg (fotografia 7). As amostras são representativas do perfil intempérico mineralizado da região de estudo.

Fotografia 7 – Amostras do perfil intempérico mineralizado em ETR submetidas a caracterização mineralógica no LTC



Fonte: Elaboração própria em 2019.

A composição química das amostras (tabela 6) foi determinada por espectroscopia de emissão de plasma (ICP; SGS Geosol), considerando os principais óxidos de interesse (elementos maiores, terras raras, ThO_2 e U_3O_8). O teor de OTR (somatória das terras raras, desde o CeO_2 ao Lu_2O_3) varia significativamente nas amostras estudadas, sendo de 699 ppm na amostra JEQCMT001, aumentando para valores entre 1.567 e 5.009 ppm nas amostras JEQCMT002, 003, 004 e 006, chegando a 46.012 ppm (4,60%) na JEQCMT005. Esse mesmo comportamento é observado para Y_2O_3 , mais elevado na amostra JEQCMT005 (1.766 ppm).

Teores de Sc_2O_3 , ThO_2 e U_3O_8 são geralmente inferiores a 100 ppm nas amostras, com exceção de ThO_2 na amostra JEQCMT004 (2.086 ppm) e de ThO_2 e U_3O_8 na JEQCMT005 (respectivamente, 6.246 e 128 ppm). Dentre os constituintes maiores, as amostras apresentam teores significativos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , em proporções variadas. O teor de SiO_2 vai de 37,1% (amostra JEQCMT005) a 71,0% (JEQCMT006), o de Al_2O_3 situa-se entre 14,9 e 17,1%, enquanto o de Fe_2O_3 varia de 4,40 (JEQCMT006) a 21,9% (JEQCMT005). Na amostra JEQCMT003, destaca-se ainda o elevado conteúdo de K_2O , de 3,24% (comparado com 0,04 a

1,86% nas demais amostras), e na JEQCMT005 destaca-se o teor de 6,15% de P_2O_5 (entre 0,09 e 0,62% nas demais).

Tabela 6 – Composição química das amostras estudadas (% ou ppm, em massa)

Amostras	JEQCMT001	JEQCMT002	JEQCMT003	JEQCMT004	JEQCMT005	JEQCMT006
Óxidos principais (%)						
SiO ₂	59,9	50	61,4	63,1	37,1	71
Al ₂ O ₃	14,9	16,5	16,1	16,7	17,1	16,7
CaO	0,06	0,04	0,06	0,07	0,46	0,03
Fe ₂ O ₃	15,7	17,4	8,2	9,66	21,9	4,4
K ₂ O	0,09	0,21	3,24	0,04	0,06	1,86
MgO	0,07	0,68	0,46	<0,01	<0,01	0,47
MnO	0,14	0,3	0,11	0,04	0,08	0,01
Na ₂ O	0,02	0,05	0,12	0,01	0,06	0,04
P ₂ O ₅	0,11	0,38	0,24	0,62	6,15	0,09
TiO ₂	0,96	2,18	1,1	1,14	1,17	0,97
PF (%)	7,49	8,96	6,26	9,27	11,1	5,72
OTR, ThO ₂ e U ₃ O ₈ (ppm)						
La ₂ O ₃	119	588	406	1.352	9.806	362
CeO ₂	476	343	300	2.527	22.604	878
Pr ₂ O ₃	20	154	121	219	2.524	59
Nd ₂ O ₃	56	567	521	654	7.429	169
Sm ₂ O ₃	9	106	116	91	1.392	25
Eu ₂ O ₃	1	15	20	6	85	1
Gd ₂ O ₃	5	84	140	69	945	20
Tb ₂ O ₃	1	13	22	9	134	3
Dy ₂ O ₃	5	71	138	47	655	19
Ho ₂ O ₃	1	13	29	7	99	4
Er ₂ O ₃	3	36	85	16	207	11
Tm ₂ O ₃	<1	5	11	2	21	2
Yb ₂ O ₃	3	33	66	9	100	12
Lu ₂ O ₃	<1	4	9	1	9	2
Y ₂ O ₃	18	294	875	145	1.766	107
Sc ₂ O ₃	28	41	22	29	78	13
ThO ₂	57	34	64	2.086	6.246	169
U ₃ O ₈	7	11	10	17	128	17
OTR	699	2.033	1.985	5.009	46.012	1.567
Y ₂ O ₃ +Sc ₂ O ₃	47	336	898	174	1.844	120
ThO ₂ +U ₃ O ₈	85	75	86	2.115	6.324	182

OTR = somatório dos óxidos de terras raras + óxido de ítrio.

Fonte: Elaboração própria em 2019.

Em termos mineralógicos, as amostras são constituídas basicamente pelos mesmos minerais, variando apenas a proporção relativa entre eles (tabela 7). O mineral típico portador de terras raras em todas amostras é a monazita e equivale a 0,1% em massa nas amostras JEQCMT002 e JEQCMT003, 0,2% nas amostras JEQCMT004 e JEQCMT006, e ao máximo

de 1,2% na amostra JEQCMT005, sendo inferior a 0,1% na amostra JEQCMT001. Cerianita e xenotima também estão presentes e não ultrapassam 0,1% nas amostras (poucos grãos identificados).

Tabela 7 – Estimativa da composição mineralógica das amostras (MEV/EDS/MLA)

Amostras	JEQCMT001	JEQCMT002	JEQCMT003	JEQCMT004	JEQCMT005	JEQCMT006
% massa do intervalo - 1,19+0,010 mm	64,8	78,7	79,3	61,5	62,6	72,5
Minerais (% em massa)						
monazita	<0,1	0,1	0,1	0,2	1,2	0,2
cerianita	<0,1	<0,1	0,1	<0,1		
xenotima	<0,1	0,1	<0,1			
Óxidos de Fe	10	1,4	1,6	1,2	0,9	0,1
goethita	6,5	16	3,9	5,4	30	1,7
ilmenita	1,7	2,4	1,8	2	1,8	0,2
quartzo	61	32	41	71	30	55
feldspatos	0,6	0,2	21	0,2	0,1	0,1
argilominerais	20	46	30	19	10	42
Al-fosfato	<0,1	0,2	<0,1	0,9	25	0,1
Th-fosfato	0,1	0,7				
outros	0,7	1,2	0,3	0,2	0,2	0,4

Nota: outros = pirocloro, apatita, anatásio, zircão, titanita, gibbsita, galena, óxi-hidróxido de Al e Mn.

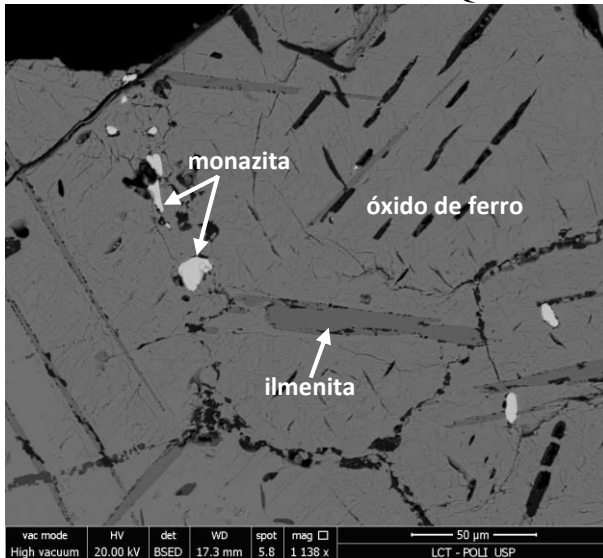
Fonte: Elaboração própria em 2019.

Quantos aos minerais constituintes mais abundantes nas amostras, o quartzo ocorre em proporções compreendidas entre 30-32% em massa nas amostras JEQCMT002 e JEQCMT005, aumenta para quantidades entre 42-61% nas amostras JEQCMT001, JEQCMT003 e JEQCMT006 e atinge 71% na amostra JEQCMT004. A proporção de óxidos de ferro chega a 10% em massa na amostra JEQCMT001 e é inferior a 2% nas demais amostras. O conteúdo de goethita, por sua vez, varia entre 1,7 e 6,5% nas amostras JEQCMT001, JEQCMT003, JEQCMT004 e JEQCMT006, chegando a 16% na amostra JEQCMT002 e a 30% na amostra JEQCMT005. A proporção de argilominerais situa-se entre 10 e 20% nas amostras JEQCMT001, JEQCMT004 e JEQCMT005, atingindo 30% na JEQCMT003 e 46% na JEQCMT002. Há predominância de caulinita em todas as amostras, exceto em JEQCMT006, que apresenta elevada proporção de mica (26%), além de caulinita (16%). Proporções significativas de feldspatos são observadas apenas na amostra JEQCMT003 (21%) e de alumino-fosfato somente na JEQCMT005 (25%).

3.1.3 Forma de ocorrência dos minerais portadores de ETR

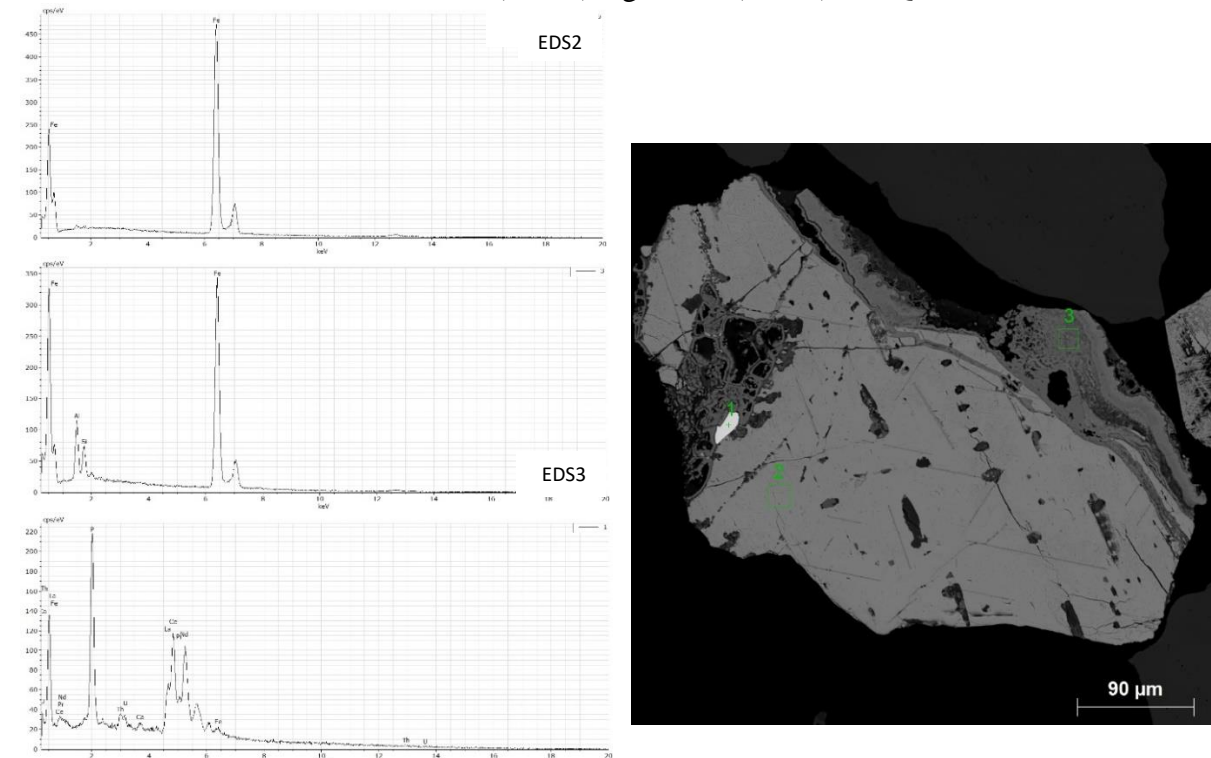
As principais características dos minerais portadores de terras raras são apresentadas nas fotografias 1 a 11 e foram obtidas por MEV/EDS.

Imagem 1 – BSE ao MEV, inclusões de monazita (dimensões inferiores a 15 μm) e ilmenita em óxido de ferro - JEQCMT001



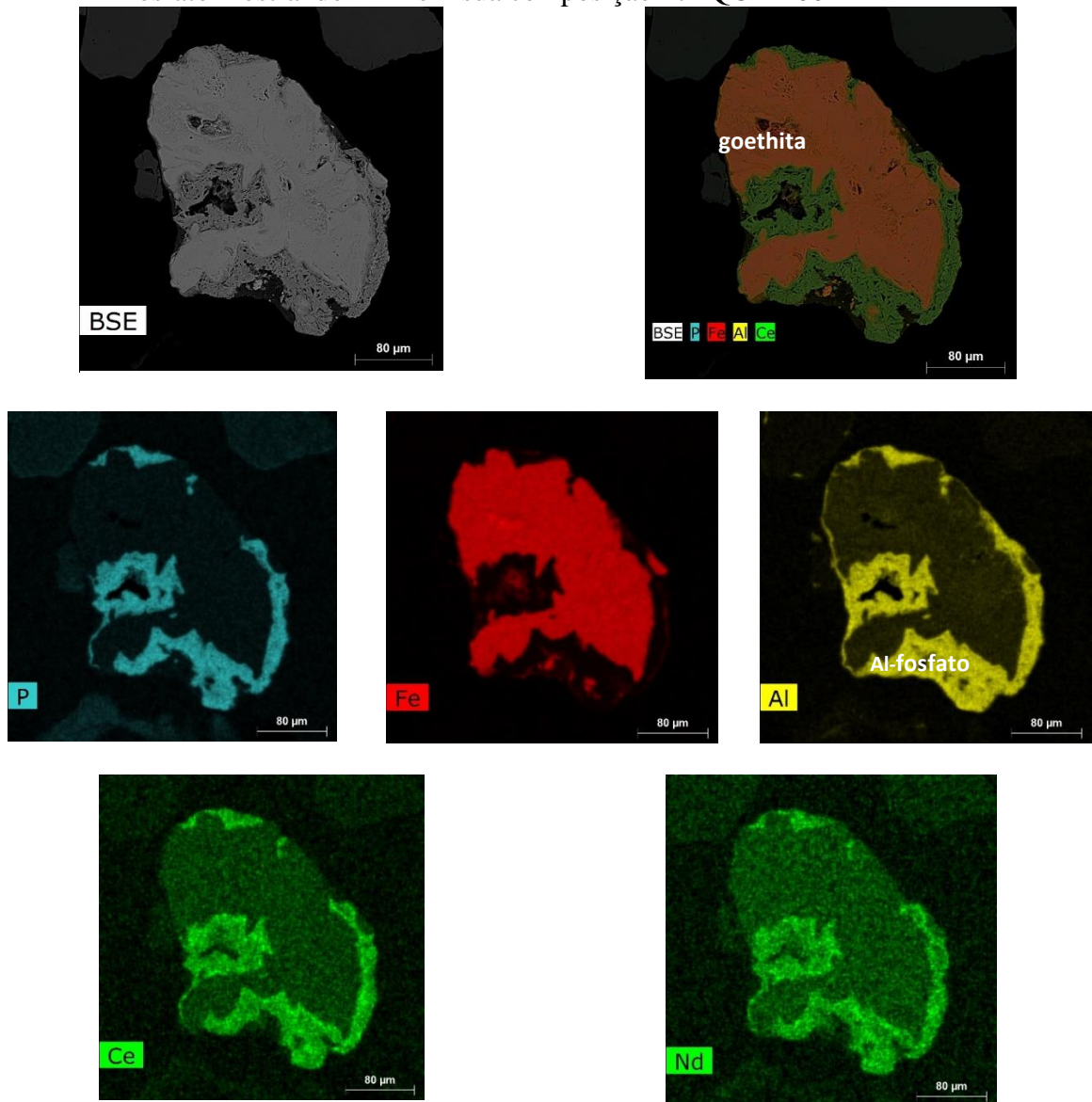
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 2 – BSE ao MEV, monazita (EDS1) mostrando tório e urânio em sua composição, mista com óxido de ferro (EDS2) e goethita (EDS3) - JEQCMT001



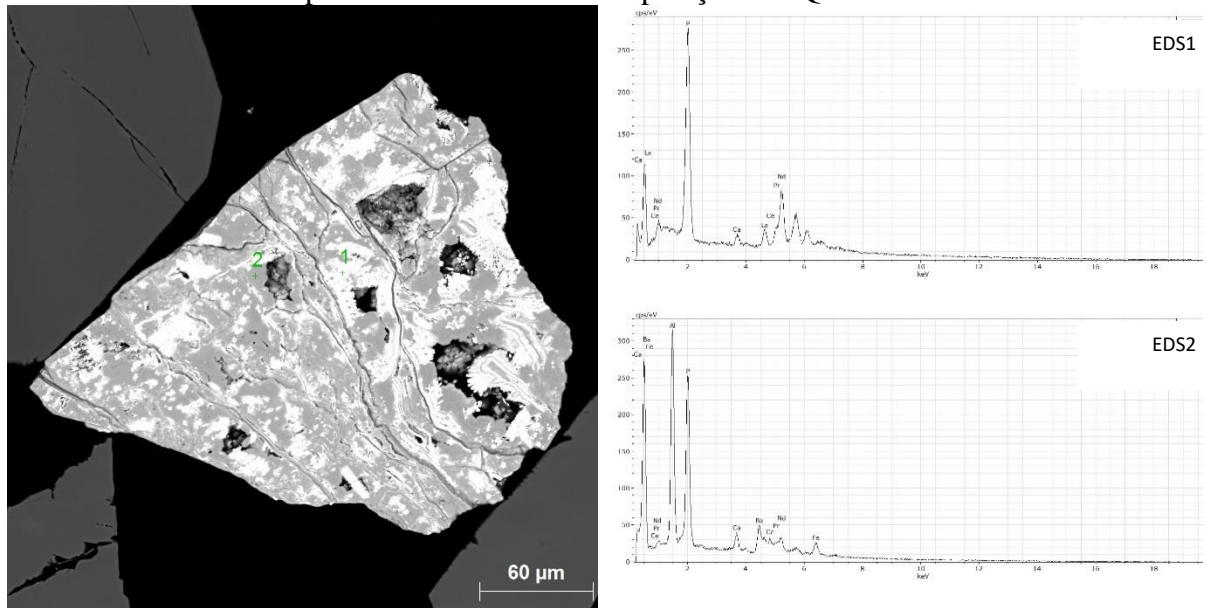
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 3 – Mapeamento químico de EDS. Partícula mista de Al-fosfato e goethita. Al-fosfato mostrando ETR em sua composição - JEQCMT001



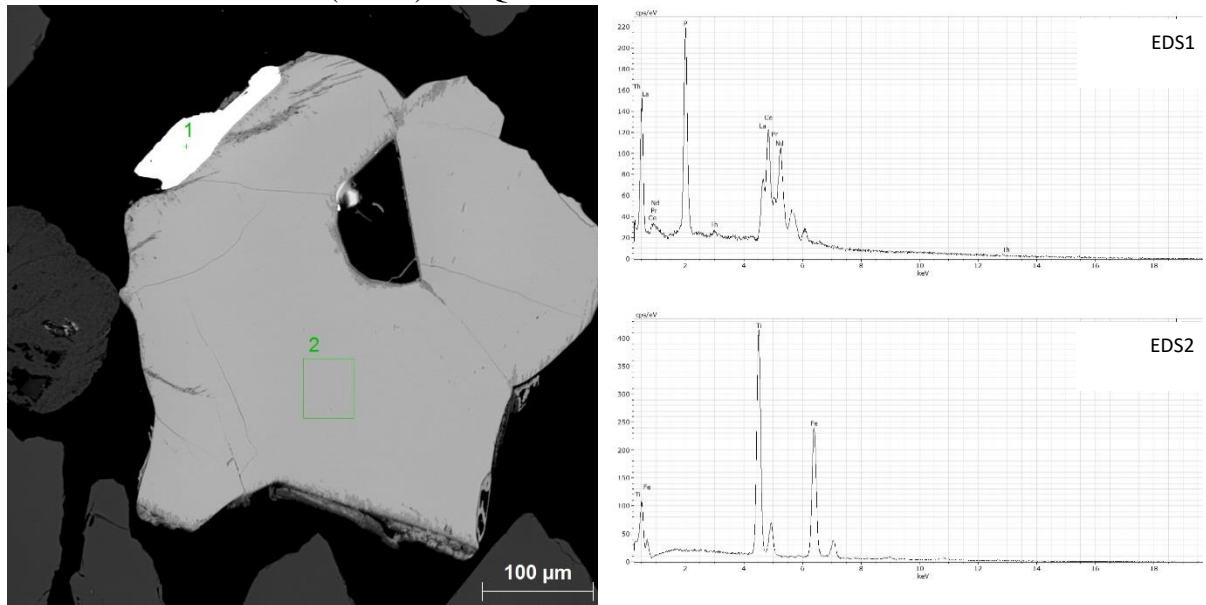
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 4 – BSE ao MEV, monazita (EDS1) intimamente associada com Al-fosfato (EDS2). Al-fosfato apresenta ETR em sua composição - JEQCMT002



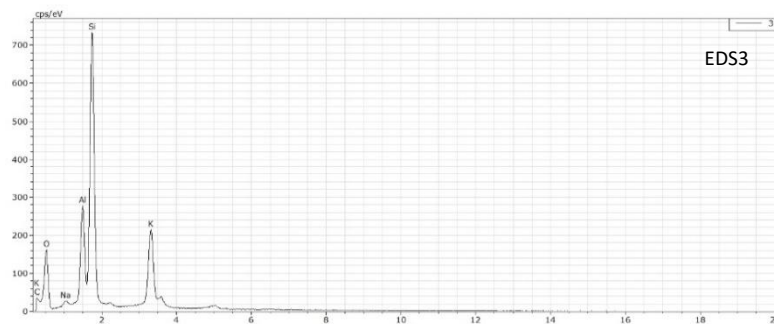
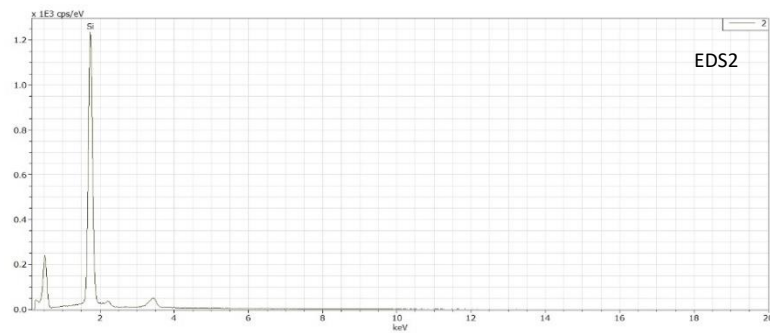
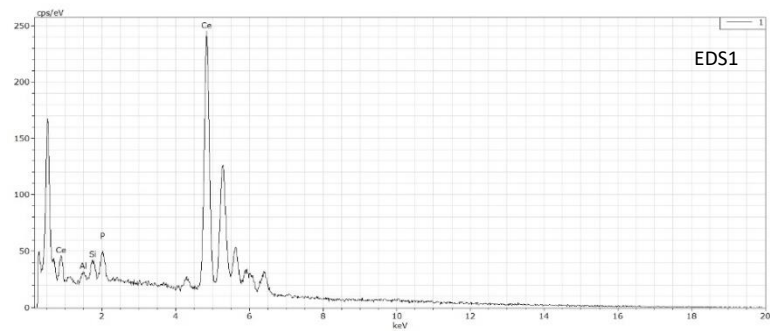
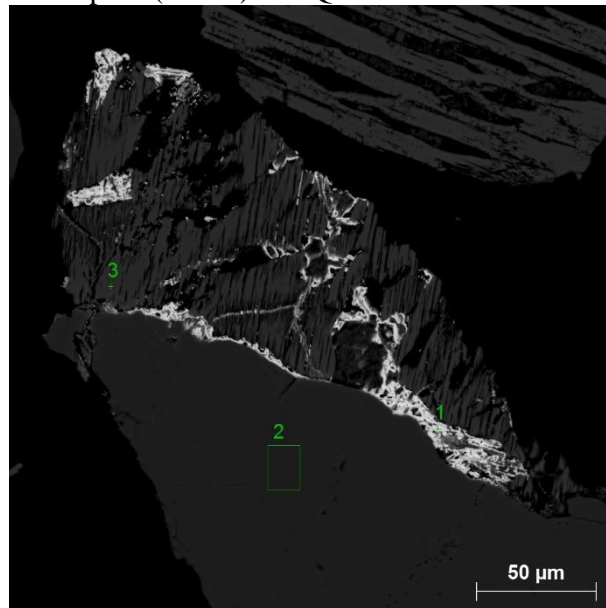
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 5 – BSE ao MEV, monazita com superfície limpa (EDS1) e tório associado, mista com ilmenita (EDS2) - JEQCMT002



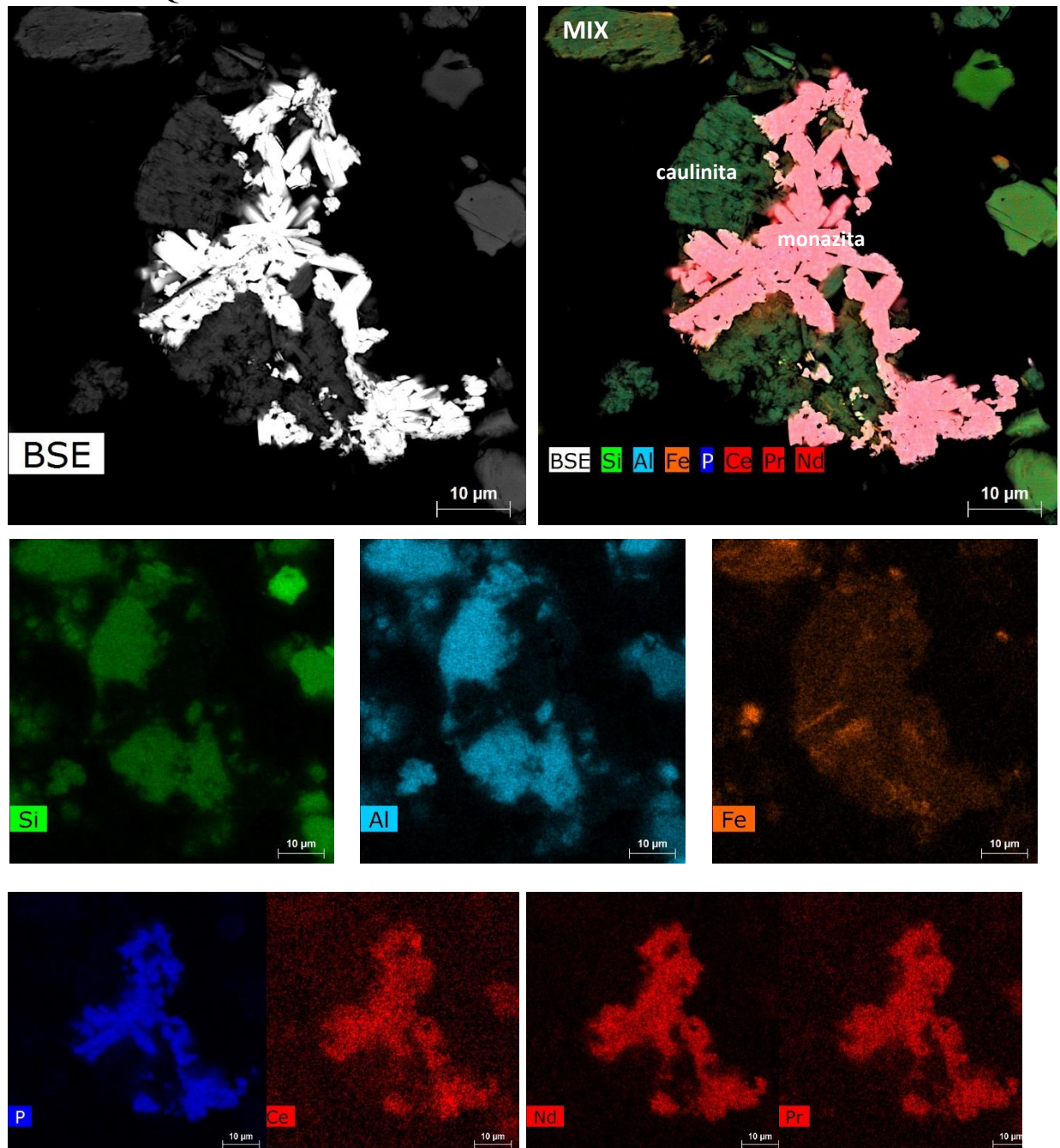
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 6 – BSE ao MEV, Cerianita (EDS1) com aspecto poroso associada com quartzo (EDS2) e K-feldspato (EDS3) - JEQCMT003



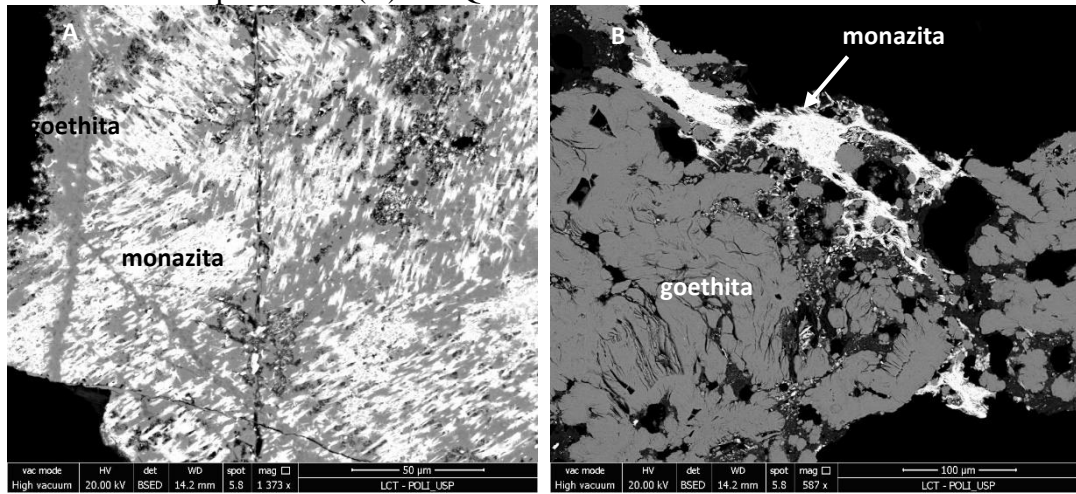
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 7 – Mapeamento químico de EDS. Partícula mista de caulinita e monazita - JEQCMT003



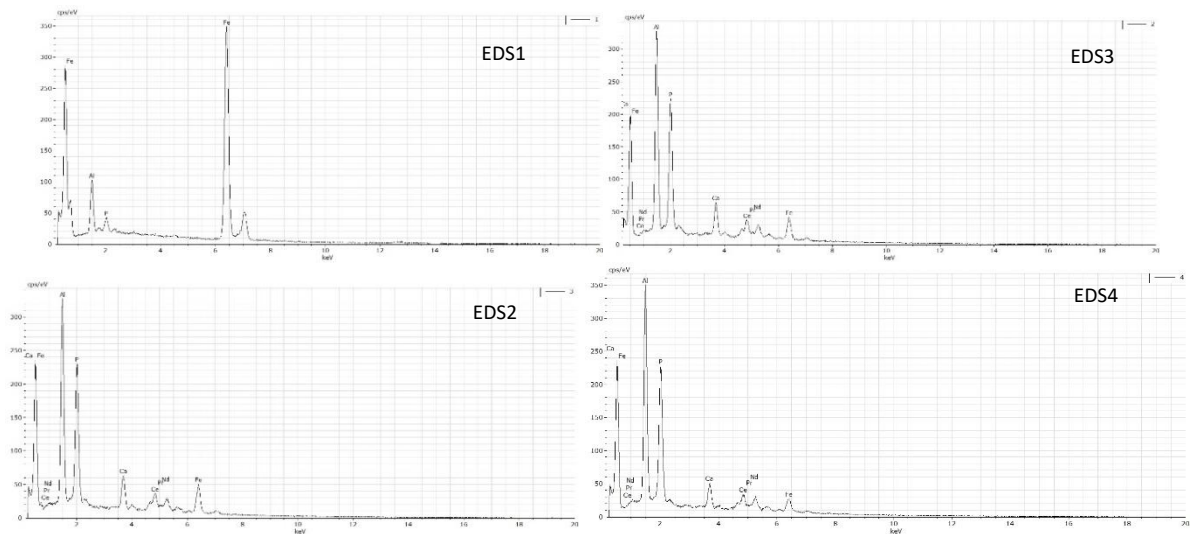
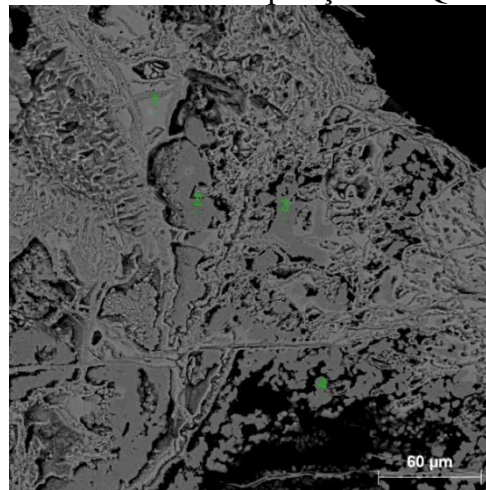
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 8 – BSE ao MEV, associações entre monazita e goethita. Intercrescimentos em (A) e monazita porosa em (B) - JEQCMT004



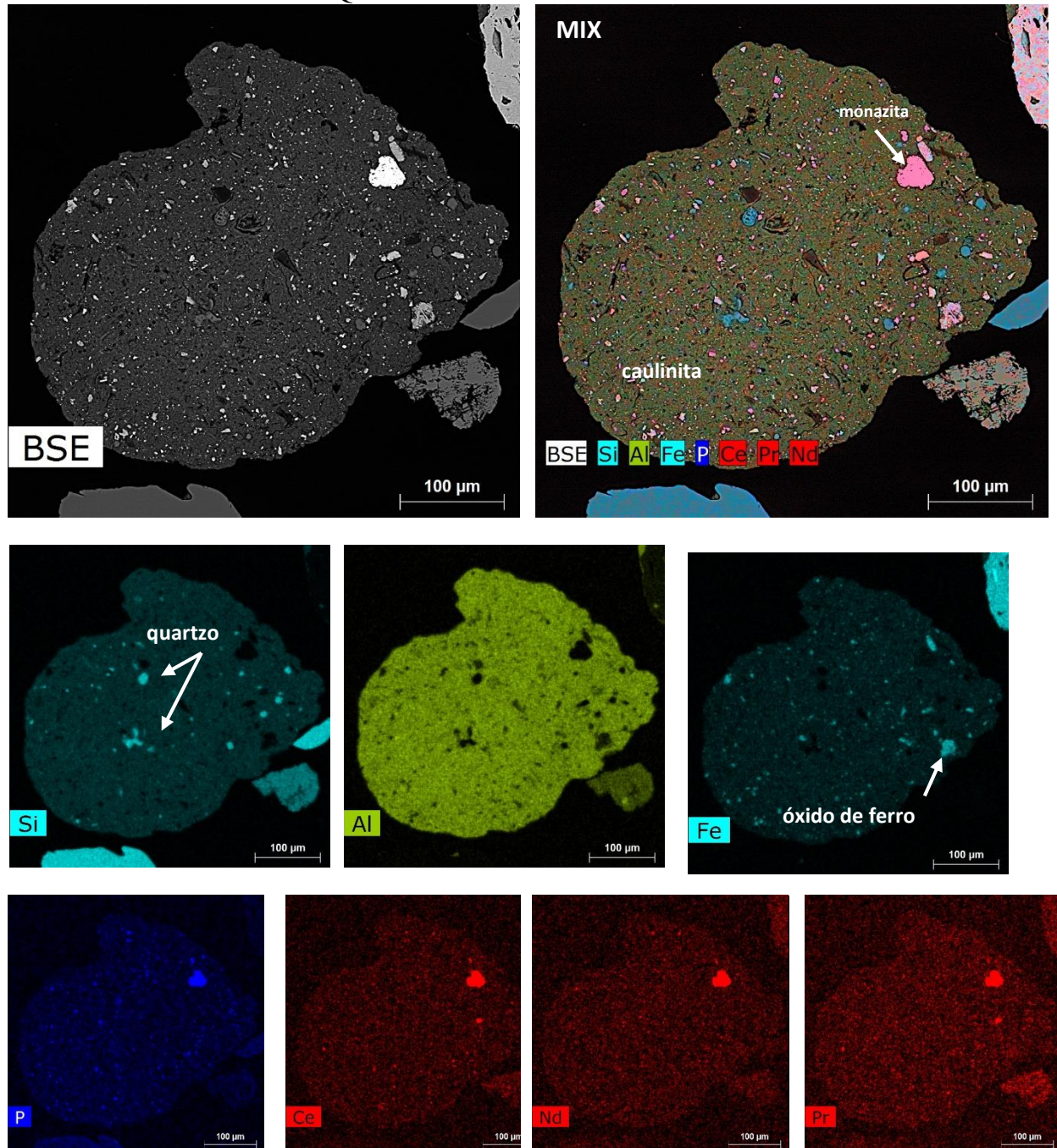
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 9 – BSE ao MEV, associação entre goethita (EDS1) e Al-fosfato (EDS 2, 3, 4). Al-fosfato mostrando ETR em sua composição - JEQCMT004



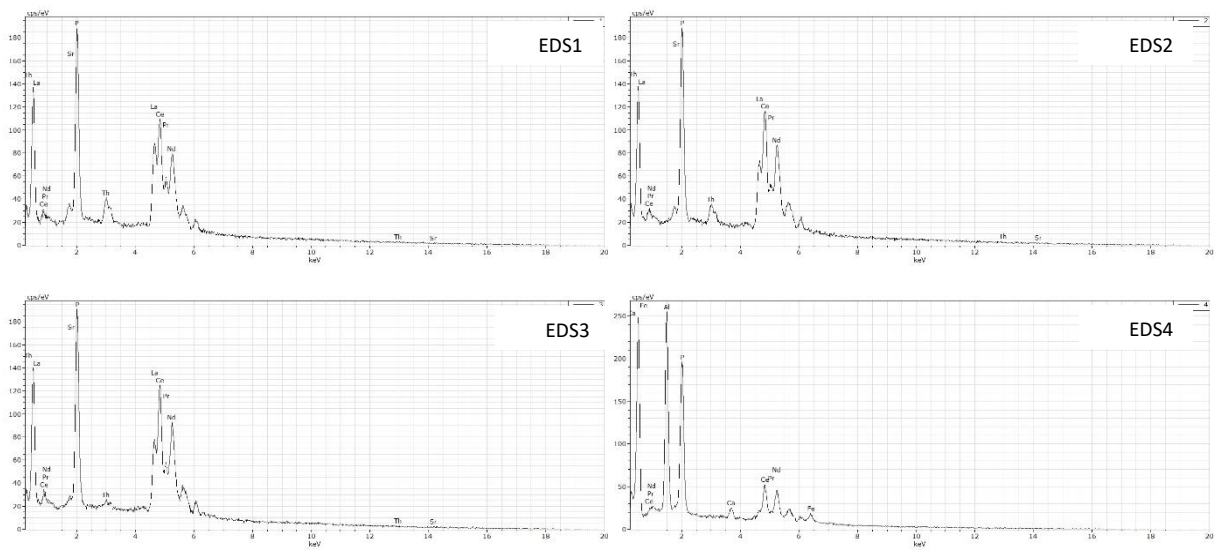
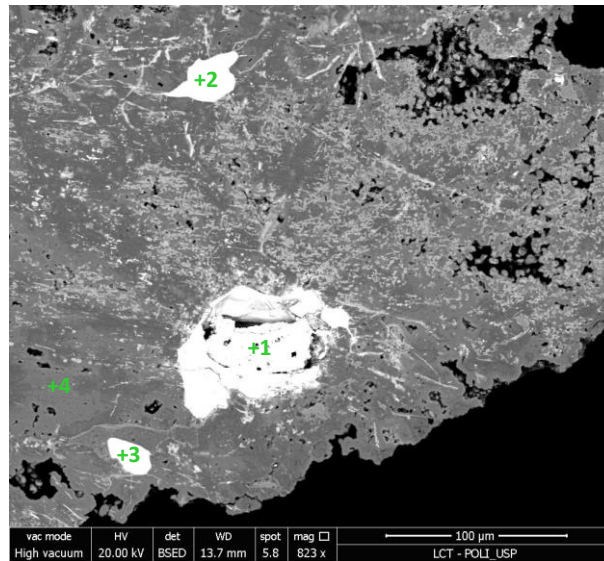
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 10 – Mapeamento químico de EDS. Agregado de caulinita, quartzo, monazita e óxido de ferro - JEQCMT004



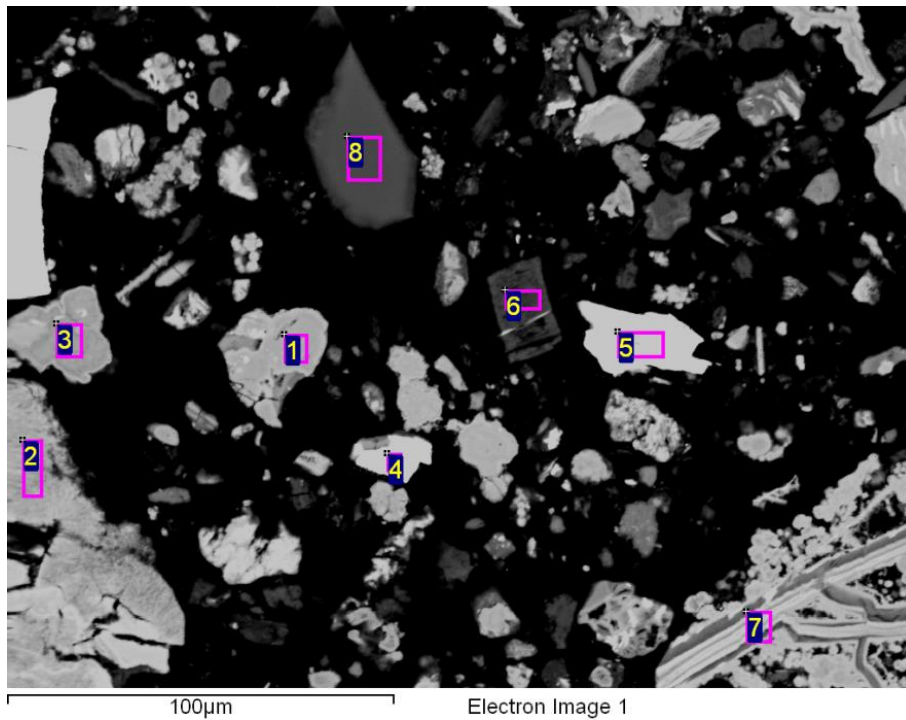
Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 11 – BSE ao MEV, inclusões de monazita em alumino-fosfato, na forma de grãos bem cristalizados (EDS 1, 2, 3), com dimensões de até 100 µm e com conteúdo de tório associado. Alumino-fosfato também enriquecido em ETR (EDS 4) - JEQCMT005



Fonte: Elaboração própria em 2018.

Imagem 12 – BSE ao MEV, microanálises químicas em alumino-fosfatos (EDS 1, 3), goethita (EDS 2, 7), monazita (EDS 4, 5), caulinita (EDS 6) e quartzo (EDS 8). Presença de tório associado à monazita e ETR aos alumino-fosfatos - JEQCMT005



Fonte: Elaboração própria em 2018.

Tabela 8 – % massa; valores não normalizados

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SrO	BaO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	ThO ₂
1	26,0		26,3	3,63	9,71	1,43	2,62		6,54	0,95	1,58	
2	5,04	1,40	1,95		66,1							
3	28,9		27,8	3,21	3,49	0,91	4,45		4,79	0,00	1,61	
4		0,85	28,8		1,14			24,5	34,6	1,83	5,14	3,12
5			26,9	0,29	1,38	0,00		22,1	31,9	2,04	6,08	7,57
6	34,2	42,7			3,02							
7	6,09	0,97	3,30		64,2							
8		100,0										

Fonte: Elaboração própria em 2018.

3.2 CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DOS FUIROS

Os furos escolhidos para avaliação de resultados foram aqueles que atravessaram no mínimo 3 horizontes do perfil intempérico, sendo eles: horizonte A (solo residual e/ou coluvionar), horizonte B (zona mosqueada) e horizonte C (saprolito + saprock). Tal escolha se deu para que em cada estação de amostra (furo) fosse possível obter informações de todos os horizontes intempéricos importantes para análise dos dados e também para que os resultados

obtidos com as investigações destes horizontes tivessem máxima representatividade possível horizontalmente.

3.3 CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DO CHEMICAL INDEX OF ALTERATION (CIA) COMO FERRAMENTA DE CLASSIFICAÇÃO

Segundo Zhao Z *et al.* (2017b), o CIA tem sido amplamente utilizado como ferramenta auxiliar na determinação de zonas mineralizadas em ETR favoráveis para conter terras raras adsorvidos em argilas (*Ion adsorption Clays* - IAC), a partir de rochas mineralizadas em ETR que foram submetidas a intenso intemperismo por longos períodos com processo de laterização e enriquecimento supergênico associados. Outros autores como Sanematsu e Watanabe (2016) também relatam o uso do CIA como ferramenta auxiliar na caracterização de depósitos do tipo IAC.

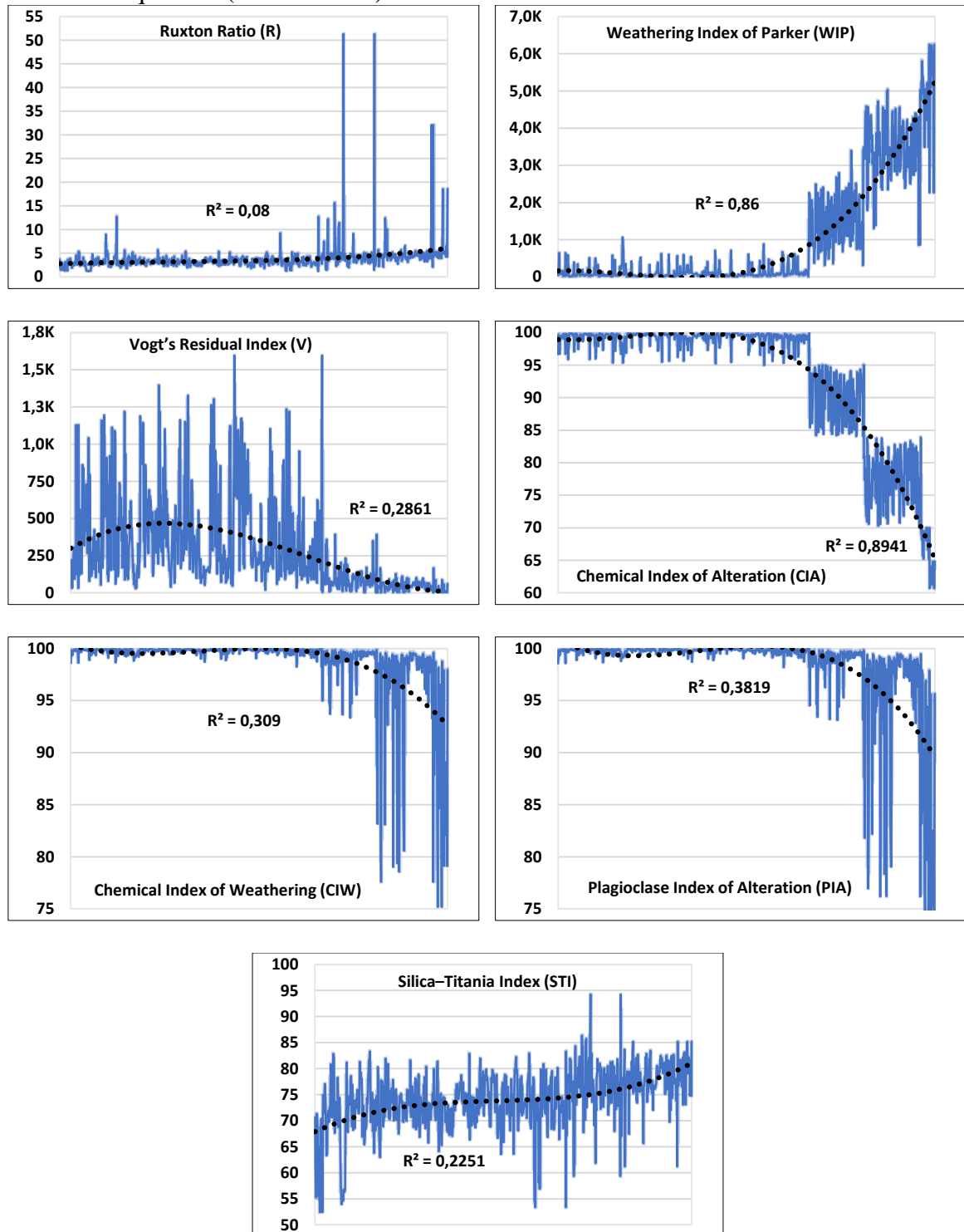
Recentemente, Wang *et al.* (2018) enfatizaram a importância do uso desse índice como parâmetro auxiliar na definição de corpos e/ou zonas mineralizadas em ETR do tipo IAC. Em sua análise, os autores revelaram que na região sul da China, onde ocorrem depósitos de ETR tipo IAC, os horizontes intempéricos que apresentam valores de CIA superiores a 85% apresentam correlação negativa para conteúdo de ETR adsorvidos em argilas, enquanto aqueles que apresentam valores de CIA abaixo de 85% apresentam correlação positiva para conter ETR sob a forma de íons adsorvidos em argilas.

Estes estudiosos enfatizaram ainda que, apesar de o CIA ser um guia prospectivo muito bom para avaliação deste tipo de mineralização, apenas o seu uso como ferramenta de identificação de zonas potenciais para IAC e a ausência de estudos que de detalhe dessa técnica empregada, bem como a falta integração com outros mecanismos avaliativos, talvez sejam a principal causa da deficiência no processo de modelamento. Tais fatores podem ser a causa para a falta de controle e de conhecimento sobre a alta variabilidade nos processos de lixiviação (recuperação) de OTR nesse tipo de ambiente, que oscilam entre 40% e 95% do total do conteúdo de ETR contido nos perfis regolítico lateritizado mineralizados.

Mesmo assim, foi feita uma avaliação do comportamento dos dados levando em consideração os principais índices de intemperismo químico comumente utilizados para avaliar perfis intempéricos de rochas no mundo, de acordo com estudos realizados por Price e Velbel (2003). Gráficos de tendência a partir dos resultados das análises dos 103 furos de sonda escolhidos e os dados das 953 amostras foram plotados em função dos 7 (sete) tipos de índices principais, definidos por Price e Velbel (2003) para se verificar a distribuição dos valores

atribuídos às composições dos índices, bem como o comportamento geoquímico de cada amostra e o agrupamento delas conforme os gráficos de tendência do gráfico 7.

Gráfico 7 – Curvas de tendência dos dados em relação aos principais índices de intemperismo químico (953 amostras)



Fonte: Elaboração própria em 2019.

Uma das principais premissas para escolha correta de um índice de intemperismo químico de rocha adequado trata da tendência positiva ou negativa à mais uniforme ou gradual possível em direção ao aumento da profundidade do perfil, conseqüentemente em direção à maior proximidade da rocha fresca (SUTTON, MAYNARD, 1992). Sendo assim, após terem sido plotadas as amostras nos gráficos acima, as curvas foram ajustadas na busca daquela que apresentasse melhor correlação R para análise de tendência dos dados. Dessa forma, percebe-se que, exceto os gráficos representados pelos índices de CIA e WIP, que apresentaram valores de R acima de 0,85, todos os demais demonstraram fatores de correlação de R abaixo de 0,4, ou seja, valores muito ruins para avaliação do comportamento de tendência da população de dados e, portanto, não estariam adequados para as nossas avaliações.

Seguindo com a análise, observando mais atentamente, o gráfico do índice de Ruxton, pode-se sugerir que, ao serem removidos alguns “poucos” valores díspares da distribuição dos dados, ele pode vir a apresentar valor de R elevado. No entanto, Aydin *et al.* (2002) constataram que índices de intemperismo que consistem em proporções simples de óxidos únicos como o de Ruxton resultam em correlações pobres quando aplicados a perfis regolítico altamente lixiviados, como é o caso do perfil analisado aqui neste estudo. Assim, por ter evoluído para processos de laterização, foi, portanto, considerado geologicamente um perfil de intemperismo bem evoluído, o que nos fez descartar o uso do Ruxton.

Sendo assim, sobraram o WIP e o CIA e, então, foi avaliada a composição das suas respectivas fórmulas, o que nos permitiu ver que no WIP não se utiliza o sesquióxido Al_2O_3 . Esse composto é fundamental para análise de perfis intempéricos de rocha em situações de lixiviação natural intensa, quando tende-se à bauxitização e/ou laterização, como é o caso do perfil intempérico analisado neste estudo. Portanto, a aplicabilidade do WIP na presente pesquisa não é recomendável (ESWARAN *et al.*, 1973).

Dessa forma, chegamos à conclusão, de fato, que o CIA é o índice químico que melhor representa os dados obtidos com as análises químicas dos materiais oriundos do depósito mineral investigado.

4 RESULTADOS

Nesta seção iremos apresentar os resultados obtidos com as pesquisas.

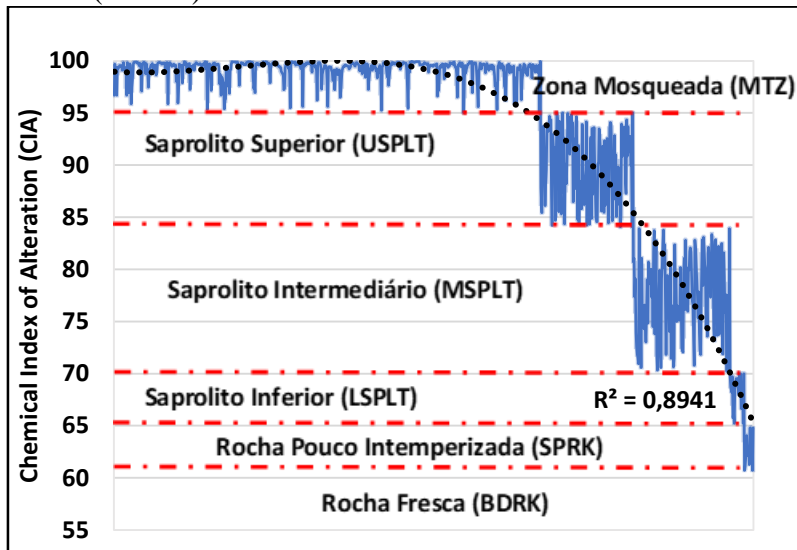
4.1 CLASSIFICAÇÃO LITOGEOQUÍMICA DO DEPÓSITO SUPERGÊNICO DE ETR EM ROCHAS DO COMPLEXO JEQUIÉ, NO SUDESTE DA BAHIA, BRASIL

A partir da interpretação do gráfico 7, foi possível compartimentar verticalmente o perfil intempérico estudado em 6 (seis) horizontes litogeoquímicos distintos que podem ser agrupados em 3 grandes grupos:

- a) grupo I — a zona mais lixiviada do perfil de intemperismo que chamamos de Zona Mosqueada, subdividida em zona mosqueada lateritizada (LMTZ), com $CIA \geq 95\%$ e $Fe_2O_3 > 15\%$; e zona mosqueada não lateritizada (MTZ), com valores de $CIA \geq 95\%$ e $Fe_2O_3 < 15\%$;
- b) grupo II — a zona de menor intemperismo em relação a “I”, que é a Zona Saprolítica, subdividida em saprolito superior (USPLT), com $CIA < 95\% \geq 84\%$; saprolito intermediário (MSPLT), com $CIA < 84\% \geq 70\%$; e saprolito inferior (LSPLT), com $CIA < 70\% \geq 65\%$;
- c) grupo III — a zona de transição entre o saprolito e a rocha fresca, onde os minerais estão apenas parcialmente intemperizados, nesse caso, o saprock (SPRK), com $CIA < 65\% \geq 61\%$.

Apesar dos furos não terem atingido materiais com CIA inferior a 61%, espera-se que a zona da rocha fresca (BDRK) seja representada por valores abaixo disso.

Gráfico 8 – Demonstra curva de tendência de CIA (%) com o aumento da proximidade a rocha fresca (BDRK)



Fonte: autoria própria (2019).

Após terem sido estabelecidos os horizontes litogeométricos representativos do depósito mineral, obedecendo a compartimentação horizontal definida pela aferição dos dados ao CIA (gráfico 8), foi montado um sumário estatístico (tabela 9) no qual estão representadas as 6 classes de horizontes litogeométricos (LMTZ, MTZ, USPLT, MSPLT, LSPLT e SPRK) e os seus respectivos valores obtidos de média, mediana, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e valores mínimos e máximos.

Tabela 9 – Sumário estatísticos dos dados de correspondentes a 103 furos de sondagem (953 amostras analisadas)

Litogeométrica	Estatística	CIA (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	OTR (%)	ThO ₂ (ppm)	U ₃ O ₈ (ppm)
LMTZ CIA ≥ 95 e Fe ₂ O ₃ ≥ 15%	Média	99	20,98	0,28	0,130	86,29	18,94
	Mediana	99	20,41	0,24	0,102	47,36	18,44
	DP	1	3,56	0,17	0,081	114,68	10,19
	CV	0	0,17	0,60	0,626	1,33	0,54
	Mínimo	97	15,97	0,07	0,023	15,82	3,54
	Máximo	100	28,53	0,63	0,301	501,79	39,37
MTZ CIA ≥ 95 e Fe ₂ O ₃ < 15%	Média	99	7,05	0,10	0,090	122,69	12,60
	Mediana	100	6,97	0,07	0,067	104,87	9,58
	DP	1	2,36	0,11	0,104	127,45	10,58
	CV	0	0,34	1,07	1,154	1,04	0,84
	Mínimo	95	1,24	0,01	0,003	6,41	2,32
	Máximo	100	14,87	0,89	1,600	1766,84	125,29

Continua

							Continua
Litogeoquímica	Estatística	CIA (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	OTR (%)	ThO ₂ (ppm)	U ₃ O ₈ (ppm)
USPLT CIA < 95 ≥ 84	Média	90	5,95	0,09	0,100	84,34	14,99
	Mediana	90	5,34	0,04	0,079	67,13	13,20
	DP	3	2,69	0,16	0,081	90,35	9,48
	CV	0	0,45	1,74	0,813	1,07	0,63
	Mínimo	84	0,90	0,01	0,013	7,70	2,51
	Máximo	95	20,00	1,21	0,593	753,97	54,40
MSPLT CIA < 84 ≥ 70	Média	77	6,71	0,11	0,136	68,26	16,85
	Mediana	78	6,09	0,09	0,123	48,64	13,02
	DP	4	3,44	0,11	0,090	65,45	12,06
	CV	0	0,51	1,07	0,662	0,96	0,72
	Mínimo	70	1,86	0,01	0,010	4,28	2,63
	Máximo	84	25,53	0,88	0,562	409,64	55,72
LSPLT CIA < 70 ≥ 65	Média	68	6,13	0,10	0,134	60,30	13,99
	Mediana	69	5,17	0,08	0,102	37,95	8,91
	DP	1	2,55	0,09	0,108	75,00	16,26
	CV	0	0,42	0,92	0,805	1,24	1,16
	Mínimo	65	3,15	0,02	0,037	3,53	3,31
	Máximo	70	10,55	0,41	0,520	325,51	74,16
SPRK CIA < 65 ≥ 61	Média	63	4,72	0,10	0,220	45,52	10,87
	Mediana	63	3,60	0,06	0,103	54,84	9,81
	DP	1	2,98	0,14	0,250	33,60	5,36
	CV	0	0,63	1,49	1,133	0,74	0,49
	Mínimo	61	1,22	0,01	0,014	6,84	4,50
	Máximo	65	9,48	0,47	0,775	92,04	21,11

Notas: OTR = somatório de todos os óxidos de terras raras + óxido de ítrio; ppm = parte por milhão; DP = Desvio padrão e CV = Coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2019).

Zhao Z. *et al.*, (2017b) resumiram as correlações entre o índice químico de alteração CIA e o conteúdo de ETR trocável em perfis intempéricos mineralizados no sul da China da seguinte maneira: no caso de CIA <85%, o grau de intemperismo é positivo para correlação com o conteúdo de ETR trocável (IAC), e no caso de CIA >85% e <100%, o grau de intemperismo apresenta correlação negativa com o conteúdo de ETR trocável.

De forma sumária, Zhao Z *et al.* (2017b) definiram, através do CIA, apenas duas zonas importantes: uma zona onde os conteúdos de ETR estariam predominantemente contidos em minerais, correlacionável com o que chamamos de Grupo I (LMTZ + MTZ), e outra zona com CIA <85%, correlacionável com o que chamamos de Grupo II (USPLT, MSPLT, LSPLT e SPRK). Segundo Wang *et al.* (2018), os desafios quanto ao uso sustentável dos recursos de

ETR do tipo IAC em perfis intempéricos mineralizados envolvem, além de outras questões, dificuldades para se avaliar racionalmente os recursos minerais contidos nesses depósitos no que tange à quantificação dos teores de ETR efetivamente disponíveis para métodos de extração com soluções eletrolíticas. Nesse caso, usa-se como lixiviante, por exemplo, o NaCl ou $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, uma vez que os ETR trocáveis tendem a variar em depósitos minerais tipo IAC, apresentando relações de teor trocável entre 40 % a 95 %.

Essa variabilidade alta de performance no processo e recuperação dos íons trocáveis de ETR pode estar ligada à necessidade de melhor detalhamento desse critério de avaliação que “corta” o minério trocável em apenas um Range de CIA 84%, para cima correlação negativa para IAC e, para baixo, correlação positiva para IAC (Zhao Z *et al.*, 2017b). Estes mesmos autores ressaltam ainda que otimizar os mecanismos de modelamento dos depósitos no sentido de mensurar o que de fato é ETR trocável pode proporcionar melhorias significativas quanto aos planos de lavra, beneficiamento e redução de impactos ambientais relacionados à exploração dessas substâncias.

Dessa forma, levando em consideração a nossa análise da disposição dos nossos dados à aferição de CIA, que demonstram, claramente, no gráfico 8, um padrão que define 6 classes distintas de dados, enxerga-se a necessidade de fragmentar esse range em seis classes que aqui serão utilizadas como parâmetros para avaliar a variabilidade do comportamento de ETR, Th e U horizontalmente. Tal ação deve-se ao fato de que essas classes, nos horizontes litogeoquímicos aqui definidos, representam camadas do depósito com diferentes graus de alteração da rocha, o que certamente proporcionará uma variabilidade em uma série de características físico-químicas importantes nesse tipo de modelo de depósito.

Tendo em vista a necessidade de evoluir nos conhecimentos que envolvem o modelamento dos depósitos do tipo IAC, como relatado por Wang *et al.* (2018), nós, através da classificação litogeoquímica aqui definida, geramos um sumário estatístico dos quantitativos das espessuras das camadas, disposto na tabela 10.

Tabela 10 – Sumário das espessuras dos horizontes litogeoquímicos

Horizontes de intemperismo químico	LMTZ	MTZ	USPLT	MSPLT	LSPLT	SPRK
Espessura Mínima (m)	1	1	1	0,52	1	0,87
Espessura Média (m)	2,5	6,88	2	2,48	1,625	1,3
Espessura Máxima (m)	8	15,21	6	10	3	3

Fonte: autoria própria (2019).

A tabela 10, como se vê, demonstra que o depósito apresenta, de acordo com a classificação definida na presente pesquisa, espessura média que varia de 1,3m no horizonte litogeoquímico mais inferior SPRK e até 6,88m no horizonte litogeoquímico mais superior no perfil de intemperismo MTZ. A tabela mostra, ainda, que em determinadas regiões é possível alcançar espessuras de até 15,21m para MTZ e 10m para MSPLT.

Os elementos Fe_2O_3 e P_2O_5 foram incluídos na tabela 11 visando discutir, mais adiante, sobre quais as implicações acerca das concentrações dessas substâncias nos diferentes compartimentos litogeoquímicos definidos por CIA. Embora Vogel (1975) e Harnois (1988) tenham mencionado que índices de intemperismo que utilizam ferro em sua composição não são adequados para análises de perfis regolítico, como é o caso por nós apresentado, os horizontes intempéricos que apresentaram $\text{CIA} > 95$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ foram denominados de zona mosqueada com laterização (MTZL).

Tais horizontes apresentaram média de P_2O_5 superior aos demais horizontes litogeoquímicos, o que pode caracterizar maior presença de minerais portadores de terras raras fosfatados. Todavia, essa relação com processo de laterização pode estar mascarada pelo caráter metamórfico do contexto que envolve as rochas do Complexo Jequié (FERNANDES *et. al.*, 2019) e o enriquecimento de Fe_2O_3 , P_2O_5 e ETR, neste caso, pode estar associado a processos de enriquecimento de origem primária e não seriam, desse modo, necessariamente atribuídos em sua totalidade a processos de supergenia (exógenos).

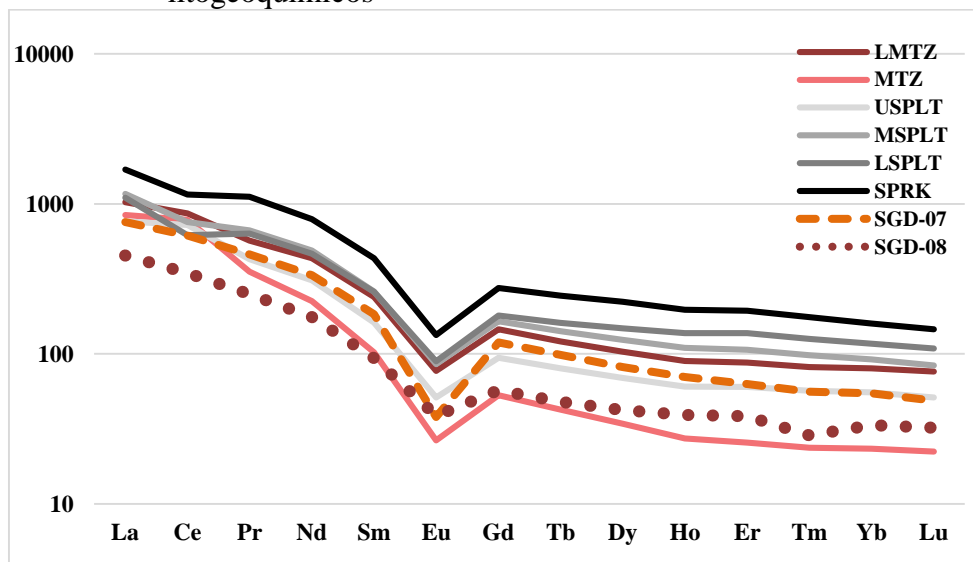
De modo geral, quando observadas as concentrações médias de todos os horizontes litogeoquímicos, verifica-se que ocorre enriquecimento do perfil intempérico na direção das camadas mais inferiores, variando de 0,09% até 0,22% de OTR no SPRK, horizonte litogeoquímico onde a rocha se encontra pouco intemperizada. O processo de migração (enriquecimento) de ETR nas porções inferiores dos perfis de intemperismo mineralizados foi descrito por Zhao Z. (2015, 2017a) em duas fases: durante o estágio inicial do intemperismo, os ETRL são enriquecidos na porção superior do perfil, zona completamente intemperizada (horizonte B), equivalente, no nosso caso, os horizontes litogeoquímicos LMTZ e MTZ, enquanto que os ETRP migram e são enriquecidos na parte inferior dele, distribuídos no saprolito.

Na fase tardia, a concentração de ETRL na parte superior do perfil aumenta constantemente, de modo que a capacidade de migração é maior que a da capacidade de adsorção e/ou fixação, fazendo com que o excedente de íons, naturalmente lixiviados por processos exógenos, migrem gradualmente também para as porções mais inferiores, torando as porções inferiores do perfil intempérico enriquecidas em ETRP e ETRL.

Observando os valores máximos de OTR, entre os horizontes litogeoquímicos, verifica-se uma variação de 0,3% até 1,6%, com espessuras médias entre 1,3 e 6,8m, mas que podem atingir 15,21m em determinadas áreas. Esse dado é extremamente relevante para o planejamento de etapas posteriores em um projeto de mina, pois a definição de horizontes litogeoquímicos mais enriquecidos, mapeáveis por mecanismo de correlação química como o CIA, atrelados a uma boa caracterização tecnológica, poderão trazer luz às questões importantes de economicidade que envolvem os processos de lavra e de beneficiamento do minério, quando houver necessidade.

Para auxílio na avaliação da variabilidade vertical e na distribuição dos teores dos elementos de terras raras contidos nos diferentes compartimentos e/ou horizontes litogeoquímicos, foi confeccionado um gráfico normalizados em função do condrito Sun e McDonough (1989), com os valores das médias de ETR de cada horizonte litogeoquímico e os valores de ETR obtidos em granitos (SGN-07 e SGN-08). Assim, as rochas representam o *background* dos valores de ETR comumente encontrados nas rochas protólito subjacentes aos perfis regolítico lateritizado, enriquecido em ETR em rochas do Complexo Jequié, na Bahia, Brasil.

Gráfico 9 – Distribuição dos conteúdos de ETR normalizados em relação ao condrito de Sun e McDonough (1989). Comparação entre as rochas protólito e os horizontes litogeoquímicos



Fonte: Elaboração própria em 2019.

No gráfico 9 podemos evidenciar, comparando a distribuição dos ETR individualizados representados pelas suas respectivas curvas, que ocorre enriquecimento de ETR em direção a horizontes litogeoquímicos que representam as porções mais próximas ao embasamento

rochoso, caracterizando, desse modo, enriquecimento supergênico descendente. A curva que representa a zona mosqueada (MTZ) apresentou, em relação às demais, significativo empobrecimento em ETRP, corroborando com o conceito estabelecido por Zhao Z. (2015, 2017a), de que os ETRP não têm afinidade com as porções superiores do perfil de intemperismo e tendem a se concentrarem nas porções mais inferiores.

Nesse caso, basta ver como as curvas de USPLT, MSPLT, LSPLT e SPRK nos ETRP estão mais espaçadas em relação aos ETRL, demonstrando maior fracionamento e enriquecimento desses elementos com o aumento da profundidade (NESBITT, 1979; WU *et al.*, 1990). Outro fenômeno que corrobora com essa tendência é o fato de a MTZ apresentar para ETRP concentrações inferiores às obtidas nas rochas protólito (SGN-07 e SGN-08).

Sendo assim, observando a distribuição dos ETR nos horizontes litogeoquímicos que representam o saprolito (superior, intermediário, inferior) e o saprock (rocha pouco intemperizada), podemos dizer que todos os ETR demonstraram tendência de aumento das concentrações com a proximidade da base do perfil. Porém, o elemento Ce apresentou, nos horizontes litogeoquímicos USPLT, MTZ e MTZL, em relação aos demais, sutil anomalia positiva, comportamento inverso aos demais ETR que, uniformemente, enriqueceram-se em direção aos horizontes mais profundos. Esse fenômeno indica que, no processo de lixiviação natural dos ETR, o Ce permaneceu nas porções mais superiores do perfil, provavelmente, junto com outros elementos como Th e Fe para formar novas assembleias de minerais secundários, principalmente a Cerianita (Ce^{4+} , Th) O_2 (tabela 8, JEQCMT002, 004 e 005). Essa é uma característica muito importante na identificação de que houve mobilidade dos ETR em função de processos exógenos, para porções inferiores dos perfis de intemperismo (BRAUN *et al.*, 1990; MARSH, 1991; GUANGZHI, 1996).

4.2 VARIABILIDADE GEOQUÍMICA À AFERIÇÃO DO CIA NO PERFIL INTEMPÉRICO DO DEPÓSITO ETR SUPERGÊNICO EM ROCHAS DO COMPLEXO JEQUIÉ

Nesta seção, elaboramos gráficos de 6 furos de sondagem a trado, dentre os 103 utilizados no estudo. De modo geral, esses furos representam diferentes situações de variabilidade química dos elementos de interesse, fundamentais ao entendimento da mobilidade dos parâmetros aqui estudados. Na ordenada de cada gráfico (10 a 14), está representada a profundidade dos furos e, na abscissa, estão representadas as concentrações em ppm e % dos parâmetros químicos OTR-Ce* (somatório de todos os óxidos de terras raras + óxido de ítrio - óxido de cério) Ce_2O_3 , ThO_2 , U_2O_8 , Fe_2O_3 e P_2O_5 .

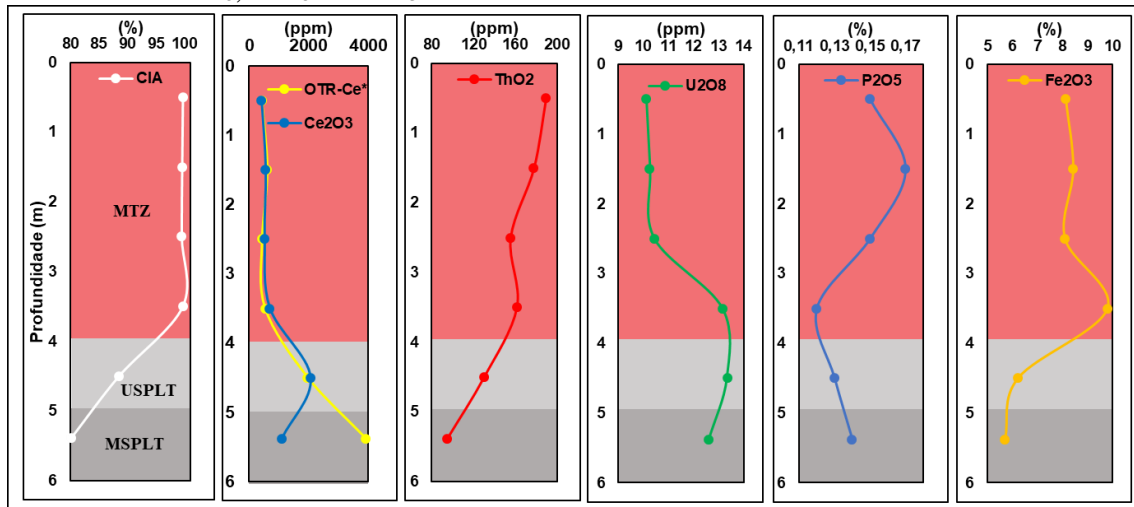
Os gráficos foram preenchidos por cores distintas que delimitam verticalmente os horizontes litogeoquimicamente mapeados à aferição do CIA. Essa visualização permitiu traçar relações entre os parâmetros estudados mais facilmente, já se pensando em uma classificação que possa ser modelável em um processo de classificação e/ou declaração de recursos e reservas em etapas posteriores ao desenvolvimento do projeto de mineração em curso na região.

As amostras foram plotadas de modo a representar a profundidade intermediária entre o *from - to*, “o de - até”, de cada intervalo perfurado. Como a amostragem se deu de metro a metro, ou seja, cada amostra representa um metro perfurado, elas foram plotadas da seguinte maneira: no intervalo perfurado de 0 a 1m, plotamos o seu resultado na profundidade 0,5m; no intervalo perfurado de 1 a 2m, plotamos seu resultado na profundidade 1,5m; e assim sucessivamente.

A curva das concentrações de OTR-Ce* e C_2O_3 são exibidas no mesmo gráfico para demonstrar, no perfil intempérico, onde ocorre a “segregação” desse elemento, uma vez que ele apresenta, assim como o Th, tendência a ir para valência +4, no processo de solubilização das rochas, permanecendo nas porções superiores do perfil de intemperismo MTZ e formando novas assembleias minerais associadas a outros óxidos e hidróxidos de ETR e Th. Nesse processo, os demais ETR e parte do Ce não acomodado nos horizontes intempéricos superiores (oxidantes) tendem a se ionizar e migrar para porções inferiores do perfil no saprolito, ambiente com condições de Eh e pH mais favoráveis aos processo de adsorção em argilas para formar os depósitos do tipo IAC (MARSH, 1991; BRAUN *et al.*, 1990; Zhao Z *et al.*, 2015, 2017b).

Desse modo, as curvas das concentrações de ThO_2 e U_2O_8 em profundidades foram plotadas nos gráficos com objetivo de avaliar a variabilidade vertical desses elementos no perfil intempérico mineralizado em ETR e para estabelecer as relações de favorabilidade ou não de um determinado horizonte litogeoquímico em detrimento às questões econômicas e ambientais que envolvem os minérios onde ocorrem estes elementos associados. Quanto aos elementos Fe_2O_3 e P_2O_5 , eles são importantes no mapeamento dos horizontes intempéricos pois a correlação de suas concentrações com os teores de ETR nos permite ter uma expectativa sobre quais fases os ETR estarão contidos no minério, se em grãos ou iônicos.

Gráfico 10 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th₂O, U₂O₈, P₂O₅ e Fe₂O₃ no furo AUG0088



Notas: MTZ = Zona mosqueada; USPLT = Saprolito superior; MSPLT = Saprolito intermediário e OTR-Ce* = somatório dos óxidos de ETR + óxido de ítrio - Ce₂O₃.

Fonte: Elaboração própria em 2019.

AUG0088

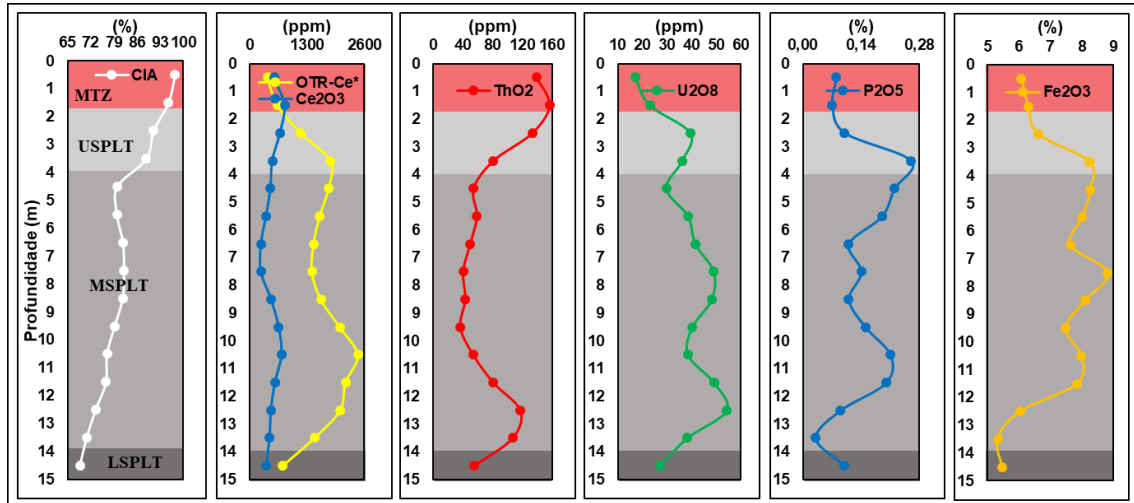
Neste furo foi possível classificar três horizontes litogeoquímicos, sendo o MTZ o mais espesso, com 4 metros de espessura, e 1 metro de espessura para USPLT e MSPLT. Os dados demonstram que CIA variou pouco nos 4 primeiros metros do perfil intempérico, mantendo-se próximo a valores de 100% e, nos metros subjacentes, apresentou tendência uniforme de diminuição com o aumento da profundidade.

Os teores de OTR-Ce e Ce₂O₃ se mantiveram constantes em MTZ, variando entre 500 e 700 ppm até o último metro de MTZ. Em seguida, os teores de ambos aumentaram significativamente ao entrar na camada de USPLT, atingindo aproximadamente 2000 ppm, em todos os parâmetros. Logo em seguida, na camada de MSPLT, o Ce₂O₃ empobreceu para um teor de 1094 ppm, enquanto todos os demais ETR continuaram aumentando, atingindo teor de OTR-Ce de 3933 ppm.

Nesse contexto, o ThO₂ apresentou teor mais elevado na porção superior do perfil de MTZ com 200 ppm, tendendo à diminuição das concentrações com o aumento da profundidade de forma gradativa. O U₂O₈ se manteve na casa dos 10 ppm nos 3 primeiros metros de MTZ, no último elevou-se para 13 ppm e teve posteriormente ligeira queda nos teores em direção às camadas USPLT e MSPLT, ficando com 12,6 ppm no último metro perfurado. O P₂O₅ se manteve com teores entre 0,15 e 0,17 % do primeiro ao terceiro metro de MTZ, depois baixou para 0,12 % no quarto metro e passou a 0,13 ao entrar na camada de USPLT e 0,14 no MSPLT. O Fe₂O₃ apresentou teores de cerca de 8 % nos três primeiros metros de MTZ, no quarto subiu

para 9,8 %, empobrecendo em seguida nos últimos dois metros, respectivamente 6,2 e 5,7% no USPLT e MSPLT.

Gráfico 11 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th₂O, U₂O₈, P₂O₅ e Fe₂O₃ no furo AUG0343



Notas: MTZ = Zona mosqueada; USPLT = Saprolito superior; MSPLT = Saprolito intermediário; LSPLT = saprolito inferior e OTR-Ce* = somatório dos óxidos de ETR + óxido de ítrio - Ce₂O₃.

Fonte: Elaboração própria em 2019.

AUG0343

O furo AUG0343 representa 15 metros de perfil intempérico perfurado, no qual o CIA variou diminuindo suas concentrações uniformemente até o metro mais profundo. Os teores de OTR-Ce* e Ce₂O₃ tiveram ligeiro enriquecimento do primeiro ao segundo metro no horizonte MTZ, respectivamente: 400 ppm (0-1m), 623 ppm (1-2m), 550 ppm (0-1m) e 789 ppm (1-2m). Observa-se que o Ce₂O₃, neste caso, foi superior ao somatório dos demais elementos na MTZ.

Nos demais horizontes saprolíticos USPLT, MSPLT e LSPLT, os teores de OTR-Ce* variaram entre 740 ppm e 2452 ppm, enquanto os teores do Ce₂O₃ tiveram variações entre 250 ppm e 719 ppm. Sendo assim, observa-se, nos horizontes saprolíticos, que o teor de Ce₂O₃ foi menor do que o menor teor de OTR-Ce*, formando, no gráfico 11, uma espécie de barriga de enriquecimento de ETR, representada pela curva do OTR-Ce*. Esse é um fenômeno típico de depósitos do tipo IAC, como no sul da China e Madagascar.

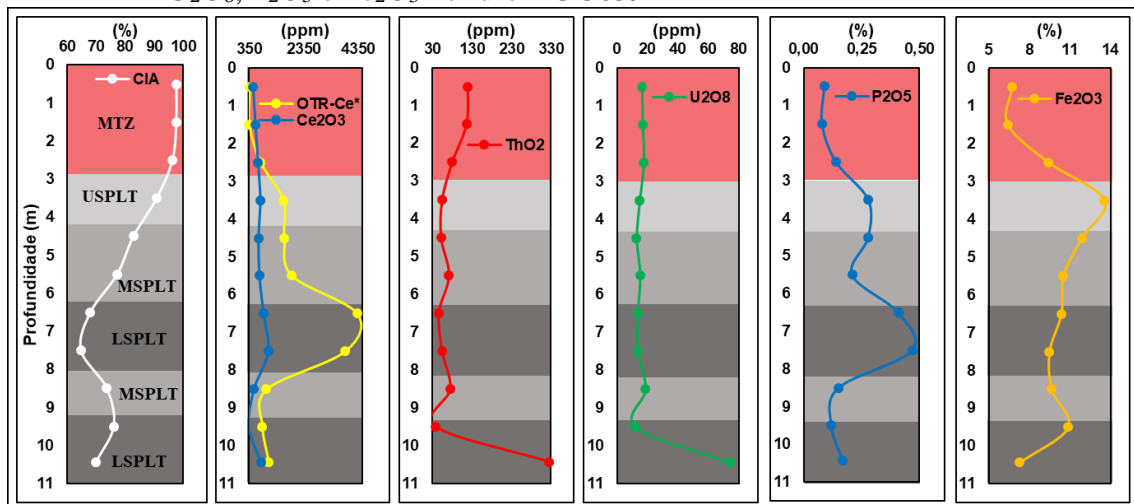
A curva de variabilidade dos teores em profundidade do ThO₂ apresenta comportamento inverso à curva do OTR-Ce*, pois esse elemento é enriquecido na MTZ, do primeiro ao segundo metro, assim como o Ce₂O₃, empobrece com o aumento da profundidade e torna a enriquecer do metro 10 ao 13, bem como, em seguida, empobrece na direção do

horizonte litogeoquímico mais profundo, neste caso, o LSPLT; assim, a variação do ThO_2 ao longo de todo o perfil intempérico é de 30 ppm a 159 ppm.

Desse modo, os teores de U_2O_8 se apresentam em menor concentração nos primeiros 2 metros na MTZ, variando entre 17 ppm e 23 ppm, tendendo a aumentar até o décimo terceiro metro, com teores entre 38 ppm e 54 ppm nos horizontes USPLT e MSPLT, diminuindo novamente na porção mais inferior do perfil LSPLT com teor de 27 ppm. O P_2O_5 apresenta comportamento, quanto à variabilidade vertical dos seus teores, bastante variado ao longo do perfil de intemperismo representado por este furo, fazendo uma espécie de “zig-zag”, com apresentação de dois picos com tores acima de 0,2%, entre 3 e 6 metros de profundidade e entre 10 e 12 metros de profundidade, respectivamente na USPLT e zona superior do MSPLT e na zona inferior do MSPLT.

Valores de P_2O_5 acima de 0,2%, sugerem que há maior participação de minerais portadores de ETR na forma de grãos associados nesses horizontes, possivelmente minerais fosfatos portadores de ETR. Nota-se ainda que, nesse intervalo entre os picos de P_2O_5 , ocorre aumento na concentração do Fe_2O_3 , apesar de não estar com concentrações próximas a 15%, valor que definimos como sendo característico de processos de laterização e/ou metamorfismo. Isso é, pois, um indicativo de que os ETR nesse intervalo podem não estar somente nas fases iônicas, mas também em fazes de óxidos e/ou hidróxidos neoformados.

Gráfico 12 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th_2O , U_2O_8 , P_2O_5 e Fe_2O_3 no furo AUG0391



Notas: MTZ = Zona mosqueada; USPLT = Saprolito superior; MSPLT = Saprolito intermediário; LSPLT = saprolito inferior e OTR-Ce* = somatório dos óxidos de ETR + óxido de ítrio - Ce_2O_3 .

Fonte: Elaboração própria em 2019.

AUG0391

No furo AUG0391 estão representadas amostras de 11 metros de sondagem. Os teores de CIA, assim como no furo AUG 0088, apresentam, nos três primeiros metros, valores pouco variáveis dentro do intervalo de 95% e 100% que se define como MTZ. Porém, quando o furo entra na camada saprolítica, a tendência de diminuição dos valores de CIA com a profundidade se acentua, isso ocorre até o oitavo metro de profundidade quando se atinge o grau de intemperismo representado pelo horizonte intempérico LSPLT. Na sequência, com o avanço da sondagem, na profundidade de nove metros, o furo atravessa uma camada mais intemperizada do que a sobrejacente a ela, nesse caso, MSPLT, e logo em seguida, nas profundidades de 10 e 11 metros, tornara a adentrar em um horizonte menos intemperizado. Esse fenômeno é explicado por se tratar de uma região onde o perfil intempérico é do tipo regolito, nesse caso, o horizonte entre 6 e 8 metros LSPLT representa uma camada menos intemperizada, inserida no horizonte MSPLT, representado no gráfico pelo intervalo entre os metros 4 e 9 de profundidade.

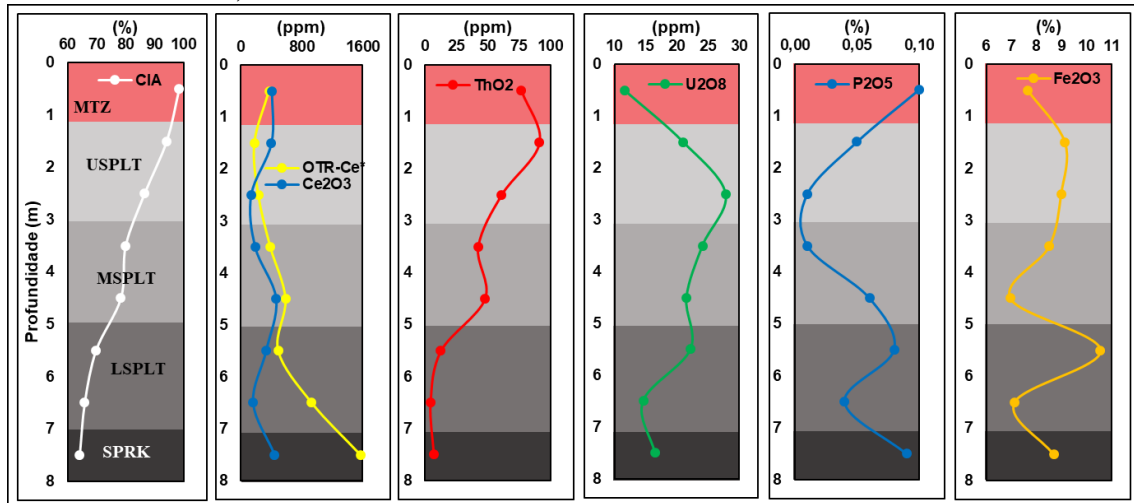
Novamente, nesse furo, os teores de OTR-Ce* e Ce₂O₃ se mantêm praticamente equivalentes no horizonte MTZ, sendo que os teores de Ce₂O₃ são relativamente superiores no primeiro e no segundo metro do furo. Ao entrarmos na camada saprolítica, o Ce₂O₃ se manteve praticamente constante até o décimo primeiro metro de profundidade, com média de teores na casa de 650 ppm, exceto no intervalo entre 7 e 8 metros, onde ele atinge 1064 ppm.

Já os demais elementos somados, representados por OTR-Ce*, que apresentaram média nos 3 primeiros metros perfurados de 503 ppm no horizonte MSPLT, enriquecem-se, atingindo média de teores de 1721 ppm, entre o quarto e quinto metro. Na sequência, entre o sexto e o oitavo metro, ocorre um enriquecimento abrupto de OTR-Ce* que atinge com teores de 4307 ppm e 3865 ppm, respectivamente no horizonte LSPLT no intervalo de 6 a 7 e 7 a 8 metros. É possível que esse enriquecimento de OTR-Ce*, de forma abrupta, esteja relacionado com o fato desse horizonte menos intemperizado LSPLT estar inserido no MSPLT e, portanto, possa ter funcionado como uma espécie de *trapping* para os íons de ETR lixiviados das camadas superiores. Além disso, é importante verificar que nesse mesmo intervalo o P₂O₅ apresentou teores variáveis entre 0,41% e 0,47%, sugerindo que essa anomalia de ETR, nesse horizonte, possa, em parte, estar relacionada a fases minerais fosfatadas e não somente a fases iônicas adsorvidas nas argilas.

Por fim, os elementos ThO₂ e U₂O₈ se mantiveram constantes com valores baixos e relativo empobrecimento de ThO₂ até o décimo metro perfurado, porém ambos apresentaram abrupto enriquecimento no último intervalo do furo, entre 10 e 11 metros de profundidade.

Ainda assim, os teores de 325 ppm para ThO_2 e 75 ppm para U_2O_8 , nesse intervalo, são considerados baixos quanto às questões que envolvem a CNEN. A substância Fe_2O_3 se manteve com teores variando entre 6,39% e 13,55% e, aparentemente, não se observou nenhuma relação direta com as concentrações de ETR, Th, U e/ou P_2O_5 .

Gráfico 13 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th_2O , U_2O_8 , P_2O_5 e Fe_2O_3 no furo AUG0057



Notas: MTZ = Zona mosqueada; USPLT = Saprolito superior; MSPLT = Saprolito intermediário; LSPLT = Saprolito inferior; SPRK = Rocha pouco intemperizada e OTR-Ce* = somatório dos óxidos de ETR + óxido de ítrio - Ce_2O_3 .

Fonte: Elaboração própria em 2019.

AUG0057

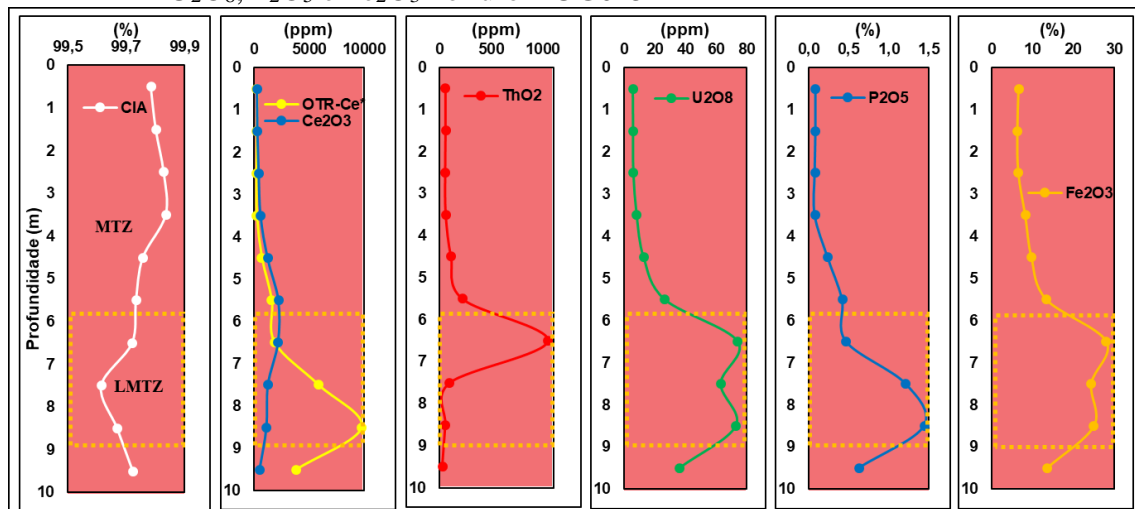
No furo AUG0057, assim como nos anteriormente descritos, o CIA apresenta-se com a tendência de diminuição uniforme em direção aos horizontes litogeoquímicos que representam as poções mais proximais da rocha fresca. O perfil de intemperismo nesse furo é composto por 1 metro de MTZ, dois metros dos horizontes USPLT, MSPLT e LSPLT, seguido de 1 metro de espessura de SPRK.

Os teores de OTR-Ce* e Ce_2O_3 são equivalentes no primeiro metro perfurado na MTZ, com cerca de 400 ppm cada. Já no segundo metro perfurado, ocorre enriquecimento de Ce_2O_3 em relação a OTR-Ce* que empobrece no terceiro metro e ambos continuam a empobrecer ainda na camada de USPLT no intervalo de 2 a 3 metros de profundidade. O Ce_2O_3 do terceiro ao sexto metro de profundidade se matem entre 189 ppm e 332 ppm e o OTR-Ce* varia entre 389 ppm e 483 ppm. No sétimo e oitavo metro de profundidade, o Ce_2O_3 oscila entre 164 ppm e 440 ppm, respectivamente, enquanto o OTR-Ce* enriquece no sétimo metro no LSPLT com

teor de 931 ppm e, mais ainda, no último metro perfurado, equivalente ao SPRK com teor de 1570 ppm.

O elemento ThO_2 na MTZ, equivalente ao no intervalo perfurado de 0 a 1 m, apresenta teor de 76 ppm. Em seguida, no intervalo de 1 a 2m, no USPLT, enriquece para 91 ppm e, na sequência, apresenta empobrecimento gradativo até a porção mais inferior do perfil intempérico no SPRK, com teor de 6,8 ppm. Quanto aos teores de P_2O_5 e Fe_2O_3 nesse furo, eles não apresentaram tendência correlacionável com os demais e tiveram sua variação ocorrendo dentro dos padrões normais até aqui observados, sendo os teores de P_2O_5 variáveis entre 0,01 % e 0,1% e, para o Fe_2O_3 , os teores oscilaram entre 6,97 % e 10,55 %. Nesse mesmo contexto, o teor de U_2O_8 na MTZ se iniciou com 11 ppm, enriqueceu no USPLT entre 1 e 3 metros de profundidade, respectivamente teores de 21 ppm e 28 ppm, e em seguida tendeu ao empobrecimento gradativo na direção das porções mais inferiores do perfil intempérico até o SPRK, onde apresentou teor de 16, 5%.

Gráfico 14 – Distribuição em profundidade das concentrações de CIA, OTR-Ce*, Th_2O , U_2O_8 , P_2O_5 e Fe_2O_3 no furo AUG0251



Notas: MTZ = Zona mosqueada; LMTZ = Zona mosqueada lateritizada; OTR-Ce* = somatório dos óxidos de ETR + óxido de ítrio - Ce_2O_3 .

Fonte: Elaboração própria em 2019.

AUG0251

O furo AUG0251 representa 10 metros perfurados somente na MTZ. Como vimos anteriormente, o CIA varia pouco, nesse horizonte, com o avanço da profundidade. Nesse caso, variou de 99,8% no primeiro metro perfurado, finalizando no décimo metro com 99,7%. Observamos, entre o sexto e o nono metro perfurado, teores de Fe_2O_3 acima de 15%, o que

caracteriza, segundo critérios de classificação litogeoquímica utilizados neste trabalho, tal intervalo do furo como horizonte mosqueado com processo de laterização associado e/ou enriquecimento de Fe_2O_3 por processo metamórfico/hidrotermal ocorrido rocha protólito (LMTZ).

Os teores de OTR-Ce* e Ce_2O_3 novamente apresentaram curvas de variação de teores com a profundidade muito similares ao longo dos 4 primeiros metros, com enriquecimento uniforme desses parâmetros, saindo de teores de 260 ppm no primeiro metro para 590 no quarto metro. A partir dessa profundidade, nota-se enriquecimento mais acentuado de ambas as substâncias, chegando a teores de 2200 ppm no intervalo perfurado entre 6 e 7 metros de profundidade, ao passo que, no oitavo, nono e décimo metro, o Ce_2O_3 empobrece para concentrações de 1267 ppm, 1136 ppm e 505 ppm, enquanto os demais ETR representados pelo OTR-Ce* nesses mesmos intervalos apresentam teores, respectivamente, de 5847 ppm, 9762 ppm e 3788 ppm.

Notadamente, no horizonte LMTZ, os ETR e, especialmente, os U_2O_8 e P_2O_5 são enriquecidos. A partir da profundidade de 4 metros, o perfil intempérico apresenta enriquecimento considerável de P_2O_5 , ultrapassando teores de 0,2% com picos de 1,21% e 1,44%, respectivamente entre 7 e 8m e 8 e 9m. Observa-se ainda neste mesmo horizonte LMTZ na profundidade entre 6 e 7 metros, que ocorre uma anomalia de ThO_2 com teor de 1047 ppm. Nesse contexto de relações de OTR elevado, com P_2O_5 acima de 0,2% e com Fe_2O_3 acima de 15%, é muito provável que os ETR estejam sob no particulado, ou seja, incorporados a minerais primários e/ou neoformados.

4.3 MATRIZES DE CORRELAÇÕES POR HORIZONTES LITOGEOQUÍMICOS DE CIA

Para dar auxílio ao entendimento da variabilidade dos teores dos elementos químicos demonstrados nos gráficos de 10 a 14, confeccionamos matrizes de correlação para os horizontes litogeoquímicos LMTZ, MTZ, MSPLT, LSPLT e SPRK. Todos os resultados dos 103 furos foram utilizados nesta análise, totalizando 953 amostras.

Os elementos químicos utilizados foram: Al, Ba, Fe, P, Ti, Nb, Ta, Th, U, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu e Y. Assim, a inserção de outros elementos, além dos ETR, Th e U, neste tipo de avaliação, tem por objetivo verificar com quais outros elementos químicos essas substâncias de interesse estão se correlacionando em cada horizonte litogeoquímico no perfil de intemperismo, para que, através dessas correlações, possamos entender melhor e/ou inferir características mineralógicas e geológicas importantes para o

Nesse contexto, o elemento Al_2O_3 apresentou boa correlação com Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Fe_2O_3 , Ba e ótima com P_2O_5 . Já o Fe_2O_3 tem boa correlação com P_2O_5 e Sm e ótima correlação com TiO_2 . Além disso, o P_2O_5 tem boa correlação com Ba, Fe_2O_3 , TiO_2 , Zr, Pr, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu e ótima correlação com Al_2O_3 , Nd e Eu. Por outro lado, o TiO_2 tem ótima correlação com Fe_2O_3 e Zr e boa correlação com P_2O_5 . O Zr apresentou boa correlação com P_2O_5 , U e La e ótima correlação com TiO_2 . Os demais elementos, Nb, Ta, Th e U, apresentam correlações ótimas e boas entre si.

A matriz de correlação demonstra, de modo geral, que os ETR contidos nesse horizonte lateritizado e/ou metamorfozido/hidrotermalizado estão intimamente ligados aos elementos Ba e P_2O_5 e Al_2O_3 , enquanto os elementos de Th e U, deletérios, estão intimamente associados ao Nb, Ta e ao La. Isso implica dizer que, em um provável processo de lavra e/ou beneficiamento desse horizonte, deve ser levado em consideração a necessidade de desassociar os ETR dos demais elementos, pois eles devem estar na forma de grãos minerais, formando agregados com Ba e Alumino fosfatos (Al-fosfatos), como descrito nas amostras JEQCMT005 e JEQCMT002 na tabela 6. Essas amostras apresentaram teores de Fe_2O_3 acima de 15% e elevadas concentrações de P_2O_5 e, portanto, são representativas do horizonte litogeoquímico LMTZ, evidenciado no furo AUG0251 (gráfico 14). Na tabela 7, essas amostras foram as que apresentaram maiores concentrações de Al-Fosfatos, corroborando com os dados apresentados na matriz de correlação de LMTZ.

Assim, é possível perceber no gráfico 14, do furo AUG0251, que o pico do Th não tem relação com o enriquecimento de ETR e de P_2O_5 , fenômeno mapeado também na matriz de correlação de LMTZ, sugerindo, portanto, que o Th está associado a outro mineral que contém Nb-Ta, fundamentalmente, U e La, de forma mais incipiente. Nesse caso, havendo potencialidade econômica em termos de volume e teor no horizonte LMTZ, é possível que através de fases que envolvam o tratamento do minério seja possível separar o Th e parte do U associado a este horizonte dos ETR sem a adição de ácidos, pois, neste caso, espera-se que não haja necessidade de dissociação química de minerais, apenas processo físicos.

Porém, é importante mencionar que, muitas vezes, o processo de concentração de uma determinada substância leva também à concentração de outras não importantes economicamente, como por exemplo Th e U. Deve-se, portanto, checar os impactos econômicos e ambientais relacionados a um processo como esse para avaliar se ele pode ser viável economicamente diante da possibilidade de se gerar, com isso, concentrados de Th e U.

e os óxidos de ETR Cerianita ($\text{Ce}^{4+}, \text{Th})\text{O}_2$ e Fergusonita $(\text{ETR})\text{NbO}_4$, este último uma hipótese não evidenciada nos testes de mineralogia realizados neste estudo.

Destaca-se, nesse horizonte, a ótima correlação de U com todos os ETR, exceto o Eu, além de boa correlação com P_2O_5 e Th. O urânio provavelmente estará associado a minerais de fosfato de ETR com Th, na forma de monazita $(\text{ETR}, \text{Th})\text{PO}_4$ que pode abrigar entorno de 0,1 a 0,5% de U (ANTONIASSI, 2017). Como o teor médio dessa substância é de 12,6 ppm, não apresentando concentrações significativas sugestivas da ocorrência de um mineral de urânio, provavelmente a grande maioria do conteúdo desse elemento, presente na MTZ, está de fato associado a um mineral de fosfato com ETR, portanto, a monazita, corroborando com as análises de mineralogia, é a melhor opção para ocorrência do U na MTZ desse depósito.

A matriz de correlação de MTZ aponta para um horizonte litogeoquímico composto, no que tange às concentrações de ETR, predominantemente por minerais do tipo fosfatos de ETR com Th e U, assim, seriam predominantemente os minerais Monazita (mineral muito frequente em todas as amostras que foram submetidas a mineralogia no LCT) e a Cerianita, como evidenciado na amostra JEQCMT003.

Dessa forma, assim como em LMTZ, sugerimos que os conteúdos de ETR na MTZ estão relacionados, em grande medida, a minerais na forma de grãos (ver item 2.4, Macro-ocorrência I), só que, diferentemente de LMTZ, os elementos Th e U estariam na MTZ como constituintes dos minerais portadores de ETR e não formando minerais associados predominantemente a outros elementos, como Nb, Ta Zr e La apenas. Portanto, ao contrário do sugerido para LMTZ, somente processos de tratamento de minérios (físicos) não podem ser sugeridos como meios de separação dos ETR dos elementos deletérios Th e U. Neste caso, provavelmente será necessário processos de extração por solventes para separar o Th e o U constituinte dos minerais de Monazita e Cerianita, minerais mais frequentes no horizonte, de acordo com as interpretações aqui observadas.

nesse horizonte com os ETR, o mesmo ocorreu com o Fe e o Ti. Isso demonstra que o estudo ainda carece de mais elementos para melhor aferir a relação entre os dados apresentados nas matrizes de correlação e na mineralogia presente nos horizontes litogeoquímicos.

Figura 6 – Matriz de correlação do horizonte litogeoquímico MSPLT (144 amostras)

	Al2O3	Ba	Fe2O3	P2O5	TiO2	Nb	Ta	Th	U	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Al2O3	1	0,22	0,37	0,30	0,11	0,02	0,01	0,08	0,05	-0,21	0,15	0,18	0,15	0,15	0,15	0,18	0,17	0,17	0,17	0,18	0,19	0,18	0,18	0,19	0,19
Ba	0,22	1	0,28	0,38	0,45	0,60	0,35	0,10	0,04	0,58	0,52	0,34	0,45	0,44	0,41	0,44	0,47	0,47	0,50	0,51	0,52	0,52	0,52	0,55	0,53
Fe2O3	0,37	0,28	1	0,81	0,86	0,24	0,13	0,05	-0,05	0,08	0,24	0,26	0,23	0,24	0,26	0,27	0,35	0,35	0,36	0,38	0,38	0,37	0,36	0,39	0,37
P2O5	0,30	0,38	0,81	1	0,77	0,29	0,15	0,13	-0,07	0,10	0,38	0,38	0,37	0,37	0,38	0,38	0,44	0,43	0,42	0,43	0,43	0,42	0,41	0,43	0,41
TiO2	0,11	0,45	0,86	0,77	1	0,54	0,33	0,11	-0,03	0,45	0,32	0,33	0,30	0,29	0,30	0,30	0,37	0,37	0,37	0,39	0,39	0,38	0,38	0,41	0,39
Nb	0,02	0,60	0,24	0,29	0,54	1	0,59	0,42	0,38	0,71	0,49	0,45	0,40	0,35	0,30	0,24	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,29
Ta	0,01	0,35	0,13	0,15	0,33	0,59	1	0,36	0,25	0,49	0,34	0,27	0,26	0,22	0,18	0,15	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,17
Th	0,08	0,10	0,05	0,13	0,11	0,42	0,36	1	0,48	0,15	0,29	0,45	0,22	0,18	0,14	0,06	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09
U	0,05	0,04	-0,05	-0,07	-0,03	0,38	0,25	0,48	1	0,23	0,39	0,22	0,26	0,21	0,14	0,01	0,17	0,15	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,11
Zr	-0,21	0,58	0,08	0,10	0,45	0,71	0,49	0,15	0,23	1	0,38	0,24	0,31	0,29	0,26	0,23	0,28	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,29	0,28
La	0,15	0,52	0,24	0,38	0,32	0,49	0,34	0,29	0,39	0,38	1	0,61	0,92	0,88	0,81	0,71	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,73	0,72	0,71	0,71
Ce	0,18	0,34	0,26	0,38	0,33	0,45	0,27	0,45	0,22	0,24	0,61	1	0,69	0,67	0,67	0,64	0,61	0,61	0,61	0,58	0,58	0,59	0,61	0,59	0,53
Pr	0,15	0,45	0,23	0,37	0,30	0,40	0,26	0,22	0,26	0,31	0,92	0,69	1	0,99	0,97	0,90	0,92	0,92	0,89	0,85	0,83	0,83	0,83	0,81	0,77
Nd	0,15	0,44	0,24	0,37	0,29	0,35	0,22	0,18	0,21	0,29	0,88	0,67	0,99	1	0,99	0,94	0,95	0,95	0,92	0,88	0,86	0,86	0,87	0,84	0,80
Sm	0,15	0,41	0,26	0,38	0,30	0,30	0,18	0,14	0,14	0,26	0,81	0,67	0,97	0,99	1	0,97	0,96	0,96	0,94	0,90	0,88	0,89	0,90	0,87	0,82
Eu	0,18	0,44	0,27	0,38	0,30	0,24	0,15	0,06	0,01	0,23	0,71	0,64	0,90	0,94	0,97	1	0,93	0,94	0,92	0,89	0,88	0,89	0,90	0,88	0,81
Gd	0,17	0,47	0,35	0,44	0,37	0,31	0,18	0,12	0,17	0,28	0,82	0,61	0,92	0,95	0,96	0,93	1	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,92
Tb	0,17	0,47	0,35	0,43	0,37	0,31	0,18	0,11	0,15	0,27	0,80	0,61	0,92	0,95	0,96	0,94	1,00	1	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,93
Dy	0,17	0,50	0,36	0,42	0,37	0,30	0,18	0,11	0,12	0,28	0,78	0,61	0,89	0,92	0,94	0,92	0,99	0,99	1	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,95
Ho	0,18	0,51	0,38	0,43	0,39	0,31	0,18	0,10	0,11	0,28	0,76	0,58	0,85	0,88	0,90	0,89	0,97	0,98	0,99	1	1,00	0,99	0,98	0,98	0,98
Er	0,19	0,52	0,38	0,43	0,39	0,31	0,18	0,09	0,10	0,28	0,74	0,58	0,83	0,86	0,88	0,88	0,96	0,97	0,99	1,00	1	1,00	0,99	0,99	0,98
Tm	0,18	0,52	0,37	0,42	0,38	0,32	0,19	0,10	0,09	0,28	0,73	0,59	0,83	0,86	0,89	0,89	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1	1,00	1,00	0,97
Yb	0,18	0,52	0,36	0,41	0,38	0,32	0,19	0,10	0,07	0,27	0,72	0,61	0,83	0,87	0,90	0,90	0,95	0,96	0,98	0,98	0,99	1,00	1	1,00	0,95
Lu	0,19	0,55	0,39	0,43	0,41	0,33	0,19	0,10	0,06	0,29	0,71	0,59	0,81	0,84	0,87	0,88	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1	0,96
Y	0,19	0,53	0,37	0,41	0,39	0,29	0,17	0,09	0,11	0,28	0,71	0,53	0,77	0,80	0,82	0,81	0,92	0,93	0,95	0,98	0,98	0,97	0,95	0,96	1

Fonte: Elaboração própria em 2019.

A matriz de correlação do horizonte litogeoquímico MSPLT demonstra claramente que, exceto o Ba, já não existe nenhum elemento, dentre os utilizados na avaliação, que apresente boa correlação com os ETR, ao passo que, entre si, a correlação de ETR com ETR é elevadíssima acima de 0,88 de média, podendo chegar a 0,94 quando removido da análise os elementos La e Ce, que são os mais “permissíveis” a estarem presentes na forma de minerais diversos associados a outros elementos químicos.

A avaliação sugere que esse seja o horizonte litogeoquímico com melhores perspectivas exploratórias para conter ETR trocável para ser explorado como minério potencialmente econômico do tipo IAC no depósito supergênico em rochas do Complexo Jequié, Bahia, Brasil. Todavia, existem outras diversas questões que envolvem o desenvolvimento de uma mineração de tal porte para podermos afirmar, somente com os dados aqui apresentados, que se trata se uma reserva mineral do tipo IAC.

apresentaram boa correlação também com Fe_2O_3 , são eles: Er, Tm, Yb, Lu, além do Y. De acordo com os dados apresentados, este foi o único horizonte litogeoquímico onde o Fe_2O_3 apresentou boa correlação entre ETR e Fe_2O_3 , com exceção do horizonte LMTZ, que apresentou correlação boa de Fe_2O_3 apenas para o elemento. Isso pode estar relacionado a questões de pH no ambiente, uma vez que, na base do perfil de intemperismo, o ambiente tende a ser mais alcalino e menos oxidante, fazendo com que o ferro permaneça na forma livre antes de se associar a um óxido ou hidróxido.

Desse modo, o e TiO_2 também apresentou boa correlação ETRP: Er, Tm, Yb, Lu, Y e mais Ho, semelhante à correlação de ETR com o Fe_2O_3 . Assim sendo, a boa correlação de ETRP com elementos como P_2O_5 , Ba, Fe_2O_3 , TiO_2 e U sugere que, nesse horizonte, os ETRP devem ocorrer, em grade medida, ainda associados aos minerais portadores de ETR formadores e/ou acessórios da rocha fonte, uma vez que ele é o horizonte litogeoquímico que mais se aproxima em termos de grau de intemperismo da composição original da rocha original, apresentando os minerais ainda parcialmente preservados.

No caso dos ETRL, a correlação com os demais elementos submetidos à análise foi praticamente nula, exceto com o U que apresentou ótima correlação com os ETRL. Como no processo de intemperismo os ETRL são os primeiros a serem postos em solubilidade e sabendo que, na base do perfil intempérico, o ambiente é predominantemente alcalino, é possível que estes elementos estejam em fases iônicas adsorvidos nas argilas ou tenham sido carreados em parte pelo fluxo lateral das águas meteóricas com o embasamento rochoso, esta última, ainda uma hipótese a ser comprovada.

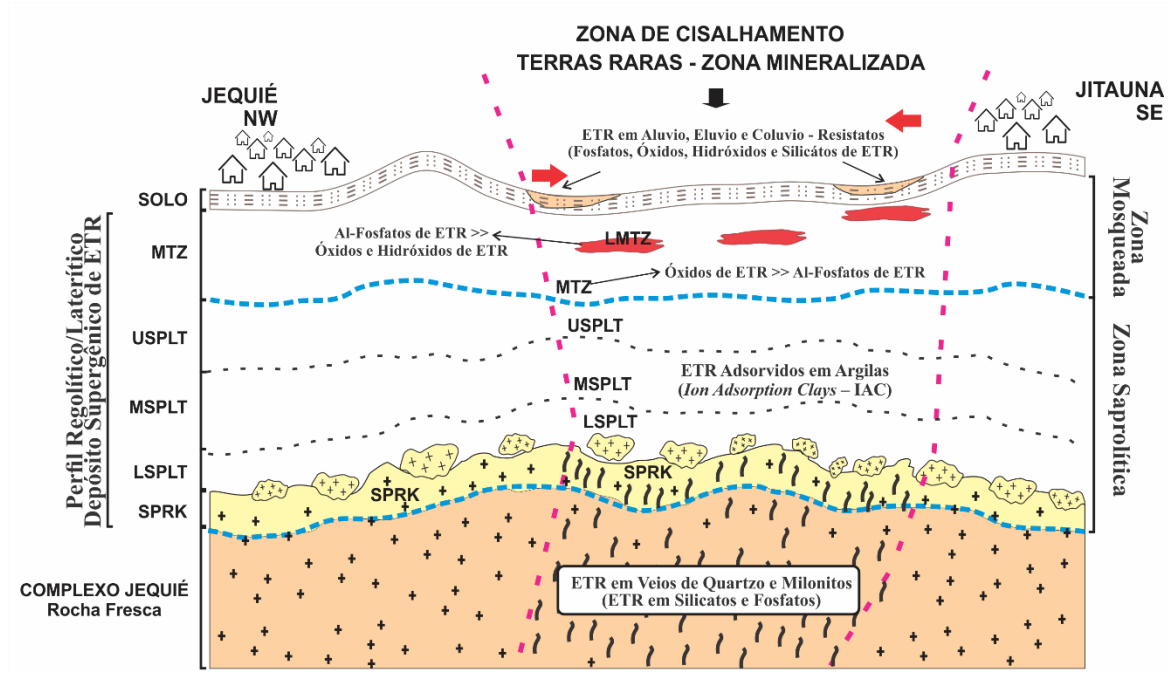
Portanto, o aproveitamento de recursos de ETR nesse horizonte também deve levar em consideração parâmetros de tratamento e beneficiamento do minério para os conteúdos de ETR contidos em minerais de fosfatos e óxidos de ETR e ainda uma parcela poderá ser recuperada por processos associados a extração de ETR adsorvidos em argilas (IAC). Vale lembrar que em ambos os casos, deve-se ater as concentrações de U contidas nas duas fases em que estarão os presentes os ETR, pois este elemento apresentou ótima correlação com todos os ETR do La ao Ho e boa correlação com os demais ETRP do Er ao Lu, além do Y.

4.4 INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, MINERALOGIA E LITOGEOQUÍMICA

A partir da integração dos dados geológicos de campo com mineralogia, da classificação litogeoquímica apresentada e do estudo da variabilidade geoquímica horizontal dos elementos

estudados, elaboramos uma seção típica do depósito supergênico de ETR de rochas pertencentes ao Complexo Jequié, no sudeste da Bahia (figura 9).

Figura 9 – Seção típica do depósito de ETR supergênico em rochas do Complexo Jequié, sudeste da Bahia, Brasil



Fonte: Elaboração própria em 2019.

5 DISCUSSÃO

Os registros de produção mundial de óxidos de terras raras (OTR), como são comercializáveis, entre os anos de 1960 a 2010, demonstraram crescimento exponencial do consumo dessas substâncias, como foi descrito acima (gráfico 3). A partir de 2010, houve uma mudança de estratégia comercial e política do maior produtor mundial (China), para muitos, um sinal também de mudanças em face de novas regulamentações ambientais impostas para comercialização desses produtos (GAGLIARDI, 2015). Isso fez com que a produção de OTR caísse entre 2010 e 2013 (gráfico 4) e, a partir de 2013, houvesse uma retomada na produção chinesa que se mantém na casa de 105.000 t/ano desde então. Na tabela abaixo podemos verificar os dados mais recentes de produção mundial de OTR.

Tabela 11 – Produção de OTR no mundo e na China, e exportações da China 2011 a 2017 (t)

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Produção Total no Mundo*	111.000	110.000	110.000	123.000	130.000	129.000	130.000
Produção na China*	105.000	100.000	100.000	105.000	105.000	105.000	105.000
Exportação da China**	16.900	17.343	22.493	27.769	34.832	46.749	51.199

Notas: * (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2019); ** Dados da rede de informações aduaneira da China

De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração de 2015, as principais reservas minerais de ETR estão na China com 55 Mt, Brasil com 32 Mt e Austrália, terceira maior reserva, com 3,2 Mt. Em seguida, a Índia e os EUA completam a lista das 5 maiores reservas conhecidas no mundo (gráfico 1).

Estima-se, assim, que grande parte da produção chinesa de ETRP venha de depósitos minerais com origem granítica supergênicos em perfil lateritizado tipo IAC da região sul da China, distribuídos principalmente em sete províncias, incluindo Yunnan, Guangxi, Hunan, Jiangxi, Guangdong, Fujian e Zhejiang (YUAN, 2012). Esse contexto geológico é semelhante ao que deu origem ao depósito supergênico do Complexo Jequié, como demonstrado aqui neste trabalho.

Dessa forma, o teor médio explorado nesses depósitos na China é de 0,035% de OTR (COCKER, 2012), enquanto que o teor médio do depósito supergênico do Complexo Jequié é de 0,15% (quatro vezes maior), podendo apresentar teores máximos variando entre os horizontes litogeoquímicos mapeados entre 0,52% a 0,77%, ou seja, em alguns horizontes mapeados, podemos ter depósitos com teor mais de 20 vezes superior aos depósitos chineses.

Nos últimos anos, a corrida por descobertas de novos depósitos minerais de ETR tem sido intensa e muitos projetos com recursos minerais mensurados com padrão de avaliação de recursos e reservas nos moldes internacionais tipo NI-43101, JORC e SAMREC já são conhecidos (tabela 2). Esse aumento na procura é, em grande medida, impulsionado pela necessidade global dos países desenvolvidos de fugirem do monopólio chinês que comanda o mercado mundial desses insumos desde a década de 90 (gráfico 1). Essas substâncias são, atualmente, consideradas em muitos países como bens minerais estratégicos, haja vista a grande importância desses elementos no desenvolvimento de tecnologias e produtos de ponta, como descrito no item 2.2.

Dentre os projetos em desenvolvimento no mundo, dois se destacam com características similares as do depósito supergênico do Complexo Jequié, são eles: o projeto Serra Verde do Grupo Mining Ventures Brasil, na cidade de Minaçú, no norte do estado de Goiás, Brasil (ROCHA *et. al.*, 2013), com 909 Mt de recursos quantificados que apresentam teor médio de 0,16% de OTR; e o projeto da Tantalus Rare Earths AG ao norte de Madagascar, com recursos quantificados de 628 Mt e teor médio de 0,09% (CANADÁ, 2016).

Tabela 12 – Projetos do tipo IAC em desenvolvimento, recursos minerais e teores

Projetos	Companhias	País	RM (Mt)	OTR (%/t)	OTR (Mt)
Serra Verde	Mining Ventures Brasil Ltda.	Brasil	909	0,16	1,454
Tantalus	Tantalus Rare Earths AG	Madagascar	628	0,09	0,562
Jequié	Minasnorte Mineração Ltda.	Brasil	*	0,14	*

Notas: * Ainda em processo de avaliação; Mt = milhões de toneladas; RM = recursos minerais; OTR = somatório dos óxidos de terras raras + óxido de ítro.

Fonte: Elaboração própria em 2019.

A partir disso, espera-se que ocorra um aumento na demanda global de OTR com os constantes avanços da indústria de alta tecnologia, o que pode provocar aumento nos preços dessas substâncias caso os projetos que estão sendo desenvolvidos não entrem em processo de produção. A estabilidade de preços das terras raras depende de quão bem esses novos produtores poderão cumprir suas metas de previsibilidade para entrar em produção (CANADÁ, 2016).

A descoberta de um novo *player* com potencial exploratório para terras raras do tipo IAC no Brasil demonstra que o país tem grande potencial geológico para conter jazidas minerais com essas características e pode, se adotada políticas que fomentem o desenvolvimento desses *players*, despontar no cenário mundial como um dos maiores produtores de ETR IAC no mundo. O quanto essa riqueza poderá contribuir para o desenvolvimento econômico da região passa por questões que envolvem processos de recuperação de ETR de forma sustentável

(grande desafio) e políticas voltadas para o desenvolvimento de tecnologias capazes de isolar essas substâncias com o grau de pureza que o mercado exige, de modo a agregar substancialmente o valor desses produtos, além de abrir um vasto leque de opções para produção de ligas e outros produtos industrializados de alto valor agregado (quadro 2).

A busca constante pela descoberta de novas jazidas minerais de ETR tem impulsionado países que dependem dessa fonte de recurso natural, mas que não têm potencial geológico, a desenvolver alternativas além das atividades de prospecção mineral. Um dos caminhos adotados por alguns países tem sido a reciclagem a partir de recursos secundários. Esses recursos potenciais variam entre resíduos de alta tecnologia (eletrônicos, como telefones celulares e computadores), fósforos de lâmpadas e ímãs. No presente, no entanto, apenas uma pequena porcentagem de terras raras é reciclada e, portanto, todo o potencial de muitos desses recursos não está sendo explorado (DODSON *et. al.*, 2012; MASSARI, RUBERTI, 2013).

Apesar dos depósitos de ETR do tipo IAC estarem sendo explorados há mais de 30 anos, os métodos de exploração, o delineamento de corpos de minério e o cálculo de reservas ainda não acompanham a velocidade do desenvolvimento crescente da indústria de alta tecnologia (WANG, 2018). Isso, por sua vez, tem causado dúvidas sobre a disponibilidade e a garantia de que haverá reservas exploráveis para o abastecimento do mercado no futuro. Esses aspectos fizeram com que alguns países voltassem seus estudos para pesquisar sobre formas de substituição desses elementos, principalmente os ETR considerados críticos (figura 2). A exemplo disso, esforços conjuntos entre a universidade de Delaware, Hitachi Metals e a GE estão explorando nanocompósitos capazes de produzir ímãs fortes e alternativos que não precisam de conteúdos de ETR na sua construção (MASSARI, RUBERTI, 2013).

O grande desafio dos países potencialmente consumidores de ETR, quanto aos métodos de reciclagem que visam resolver a questão da ausência de jazidas de ETR e também os impactos ambientais que envolvem a lavra e o processamento dessas substâncias, é a aplicação desses métodos em escala industrial.

Nesse sentido, vimos que, de modo geral, os recursos de ETR existentes no depósito supergênico de Jequié podem estar na forma de minerais constituindo óxidos, hidróxidos, Al-fosfatos e silicatos de ETR, os quais chamamos de Macro-ocorrência I. Além disso, pode se apresentar na forma de íons adsorvidos em argilas e minério do tipo IAC, conclusão realizada em decorrência de fatores geológicos muito similares a outros depósitos de contexto geológico semelhante, os quais chamamos de Macro-ocorrência II.

Como se pode ver, a atividade de mineração nesse tipo de ambiente geológico tem causado sérios problemas ambientais no sul da China (fotografia 8).

Fotografia 8 – Ambiente de um depósito de ETR do tipo IAC, no sul de Jiangxi, China, após mineração por lixiviação em pilha



Fonte: Wang *et. al.* (2018).

Tanto a técnica de lixiviação em tanque quanto a técnica de lixiviação em pilha (*heap leaching*) envolvem a remoção de grandes massas, haja vista que, nesse tipo de depósitos minerais, o teor médio, em geral, é baixo no *ROM* (minério bruto vindo da mina).

Outro fator que contribui para o crescimento dos impactos ambientais relacionados à “devastação” de grandes áreas, considerando os métodos de lixiviação em tanques e em pilha, está relacionado aos métodos exploratórios empregados para avaliação dos recursos minerais exploráveis nos depósitos supergênicos. Isso ocorre pois geralmente eles não investigam toda a coluna intempérica, haja vista que, de modo geral, são utilizados, para isso, trado mecânico e manual, poços e trincheiras. Esses métodos investigativos possuem baixa eficiência de operação e de resultados em profundidades superiores a 10 metros, além de oferecer riscos na atividade de prospecção por serem considerados rudimentares e não serem eficientes quando atingem horizontes saturados pelo lençol freático.

Sabemos que esses perfis laterítico podem ultrapassar 50 metros de espessura, uma forma de mitigar a necessidade de movimentação de grandes massas por grandes áreas seria otimizar os métodos de investigação em profundidade, a fim de aprimorar o processo de modelamento geológico e metalúrgico na classificação e declaração de reservas. Desse modo, seria possível proporcionar a identificação de áreas com melhor extractabilidade e

lixiviabilidade de ETR iônico, ainda nas fases de avaliação e de modelamento dos recursos minerais, otimizando, assim, o processo de recuperação de ETR efetivamente trocável. Isso ocorreria pelo fato das extrações desses metais, nesse tipo de depósito, apresentarem variabilidade muito elevada, entre 40% a 95%, quando observados os modelos econômicos empregados nos depósitos chineses (WANG *et. al.*, 2018).

A ferramenta de classificação de horizontes litogeoquímicos apresentada aqui neste trabalho, integrada com os estudos de correlações por matrizes, nesses horizontes litogeoquimicamente definidos, pode surgir como alternativa para definir melhor quais os horizontes de minério apresentam melhores condições de extractibilidade e lixiviabilidade por mecanismos de troca iônica. Esse será o próximo passo no desenvolvimento das pesquisas exploratórias em curso nessa região. Será proposta, portanto, a realização de testes de lixiviação específicos por horizonte litogeoquímico, com o objetivo de se estabelecer correlações importantes para o modelamento econômico do depósito, visando ao aproveitamento desses recursos de forma mais sustentável, movimentando, também, menos massa e recuperando mais produto.

A técnica de lixiviação mineral *in-situ* (*in situ leaching*) já está sendo empregada na China desde o ano de 1996 e se encontra na terceira fase de aprimoramento. Embora essa técnica ajude a reduzir os danos ambientais visíveis, o método de mineração ainda causa a poluição ambiental invisível, durante o processo de extração de ETR iônico com uso de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ na lixiviação e NH_4HCO_3 no processo de precipitação. Yu *et al.* (2017) realizaram estudos de avaliação geoquímica ambiental em áreas de minas onde o método de lixiviação *in situ* vinha sendo empregado e no seu entorno. O estabelecimento de relações entre a poluição da água e as atividades de produção das minas de ETR foi revelado com base em dados de monitoramento hidroquímico ao longo de rios e por meio de poços. Um modelo de avaliação quantitativa dos efeitos ambientais das minas ETR com base na máquina de vetores de apoio pode fornecer, assim, informações importantes para o desenvolvimento sustentável desse método exploratório através da formulação de uma base científica que favoreça o processo de reabilitação de ambientes previamente danificados.

As abordagens de mineração devem ser melhoradas, concentrando-se nos parâmetros das técnicas de lixiviação *in situ* e criando um sistema de índices para atender aos requisitos de proteção ambiental. Para utilizar plenamente os recursos e considerar as questões ambientais e os desastres geológicos, novos métodos devem ser adotados. Embora a técnica de lixiviação *in situ* pareça ser fácil, ela mudará seriamente o meio ambiente se não for bem compreendida e aplicada adequadamente (WANG *et al.*, 2018, p. 422).

Como descrito acima, novamente, os desafios são grandes na busca de soluções para os problemas decorrentes das atividades de extração dos ETR do tipo IAC. No caso da aplicabilidade das ferramentas aqui apresentadas para o caso de processos de lixiviação *in situ*, a ferramenta pode auxiliar na otimização dos horizontes de maior interesse e melhor resposta aos reagentes lixiviantes no meio, por exemplo, guiando melhor posicionando dos filtros que captam o lixiviante (solução) com ETR.

Os dados apresentados na presente pesquisa demonstraram que o Th apresentou tendência a se fixar nas camadas superiores do perfil intempérico, em grande medida, junto com o U, comumente associado a Ce e a La. Com base nisso, e avaliando os dados de mineralogia apresentados, integrando-os com as interpretações das matrizes de correlação de cada horizonte litogeoquímicos, constatamos que a presença desses elementos está associada a minerais portadores de ETR do tipo óxidos de ETR como Cerianita e fosfato e monazita. Tais minerais estariam, por sua vez, preferencialmente localizados nos horizontes LMTZ e MTZ, horizontes estes que, pensando em um modelo econômico viável para o depósito do tipo IAC, não seriam removidos no processo de lixiviação, pois o processo de interação eletrolítica não possui capacidade de remover essas substâncias, portanto, o produto final não concentra esses elementos e, com isso, não há danos ambientais relacionados às substâncias no processo de extração dos ETR do tipo IAC (ROCHA, 2013).

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que, inseridas no contexto geológico das rochas do Complexo Jequié, sudeste da Bahia, ocorre um grupo de rochas ainda não muito bem definidas pela literatura, que apresentam concentrações de ETR compatíveis com as de outros depósitos conhecidos mundialmente, como potencialmente econômicos em ETR, revelando um potencial econômico exploratório na região, ainda desconhecido neste tipo de modelo de jazida. Embora os estudos realizados até o momento não permitam estabelecer com clareza a gênese da origem primária da mineralização de ETR presente na região, foi possível constatar ao menos quatro diferentes tipos de metalotectos de ETR importantes. São eles:

- i. ETR em veios de quartzo e milonitos (ETR silicatos e fosfatos);
- ii. ETR em aluvio, elúvio e colúvio (ETR fosfatos);
- iii. ETR em zonas mosqueadas (ETR óxidos, hidróxidos e Al-fosfatos);
- iv. ETR em saprolito (ETR Ion Adsorbed Clays – IAC).

O estudo focou na mineralização de origem supergênica e demonstrou que os teores médios observados no perfil intempérico nos diferentes horizontes litogeoquímicos definidos oscilam entre 0,09 % e 0,22%, e apresentam picos que chegam a 1,6% de OTR. Essas concentrações são bem superiores ao teor médio do depósito de origem granítica em perfil lateritizado tipo IAC em Jianghua, sul da China, que apresenta teor médio de 0,035% (MARK D. COCKER, 2012).

O índice de alteração de rocha CIA se mostrou eficiente para classificar horizontalmente o depósito de ETR supergênico das rochas do Complexo Jequié, proporcionando uma análise eficiente da variabilidade geoquímica dos elementos terras raras no perfil de intemperismo mineralizado. Além disso, o estudo de correlações entre os elementos de terras raras e outros parâmetros químicos por meio de matrizes de correlação em cada horizonte litogeoquímico, atrelado aos dados de mineralogia, permitiu estabelecer relações importantes sobre as diferentes fases que representam os conteúdos de ETR presentes no depósito.

Vimos, também, que o elemento Th (deletério no modelo econômico) tende a permanecer nas porções superiores do perfil intempérico, principalmente no horizonte litogeoquímico MTZ. No caso do urânio, quando ele não permaneceu nas porções superiores

do perfil intempérico junto com o tório, apresentou tendência ao enriquecimento nas poções mais profundas do perfil de intemperismo.

Portanto, conclui-se que as ferramentas aqui apresentadas foram capazes de mapear horizontes de maior ou menor interesse no que tange às concentrações de ETR economicamente importantes e quanto às concentrações de elementos de Th e U que podem causar impactos negativos nos processos subsequentes ao desenvolvimento de um projeto de mineração.

Com o uso das ferramentas geoquímicas e estatísticas apresentadas neste estudo, foi possível não só classificar, mas também mensurar as espessuras dos diferentes tipos litogeoquímicos, inclusive inferindo as fases minerais possivelmente dominantes e os respectivos mecanismos mais adequados ao seu aproveitamento econômico. Espera-se que, com isso, seja possível auxiliar no processo de modelamento dos recursos minerais contidos no depósito, melhorando o processo de classificação e declaração de recursos e reservas mais adiante.

7 RECOMENDAÇÕES

O modelo de depósito proposto baseia-se em dados exploratórios que carecem de ensaios de rotas tecnológicas para confirmação da real potencialidade do depósito, principalmente no que tange à caracterização dela como um depósito típico IAC, embora haja elementos prospectivos suficientes para afirmar com boas chances de acerto de que o modelo de depósito do tipo IAC nas rochas do Complexo Jequié é uma realidade.

Os dados representam uma área que foi sondada somente com trado, conseqüentemente, apenas cerca de 10% dos furos chegaram ao SPRK, seja por deficiência do equipamento, pelo horizonte mosqueado muito espesso ou pela presença de água e outros fatores que fazem com que esse método exploratório, muitas vezes, pare um furo de forma precoce. Recomenda-se, nesse caso, realizar novos estudos com furos de sondagem diamantada, aproveitando toda a coluna intempérica para uma avaliação mais precisa, principalmente sobre a real potencialidade do depósito.

Os dados apresentados no sumário estatístico demonstraram, na maioria dos horizontes litogeoquímicos, valores de coeficiente de variação (CV) elevados, o que sugere uma variabilidade grande dos dados agrupados. Isso ocorre em função dos dados representarem uma área extensa de mais de 2000 hectares que fatalmente sofre, nesse caso, influências relacionadas à variabilidade lateral proporcionada pelos aspectos geológicos que envolvem possível heterogeneidade entre as rochas fontes. Uma forma de mitigar isso é ajustar a aplicação do método em áreas menores e com furos menos espaçados, preferencialmente sobre a mesma unidade geológica e/ou litotipo.

REFERÊNCIAS

- ANTONIASSI, Juliana Lívi. **Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos do Brasil**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ANTHONY, D. **China's stranglehold on world's rare earth supply**. Critical strategic minerals, 2010.
- AROGUNJO, A. M. *et. al.* Uranium and thorium in Soils, Mineral Sands, water and food samples in a tin mining area in Nigeria with elevated activity. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 100, n. 3, p. 232–240, mar. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X0800221X>. Acesso em: 20 jun. 2018.
- BAO, Z.; ZHAO, Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in south China. **Ore Geology Reviews**, v. 33, n. 3, p. 519–535, jun. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136807000741>. Acesso em: 23 mai. 2019.
- BARKER, D. S. Field Relations of Carbonatites. *In*: **Carbonatites, Genesis and Evolution**, Unwin Hyman Ltd. London, p. 38–63, 1989.
- BIONDI, João Carlos. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- BRADSHER, K. **Amid tension, China blocks crucial exports to Japan**. The New York Times, Global Business, 2010. Disponível em: <http://www.nytimes.com/2010/09/24/business/global/24rare.html?pagewanted=all>. Acesso em: 11 mar. 2019.
- BRASIL. Decreto nº 51.726, de 19 de fevereiro de 1963. Aprova o regulamento para execução da **Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962**: Política Nacional de Energia Nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN e dá outras providenciais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, abril, 1963. Seção 1.
- BRASIL. **Sumário mineral 2015**. Brasília. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2016. 135 p.
- BRASIL. **Usos e aplicações de terras raras no Brasil: 2012-2030**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2013. 254 p.
- BRAUN, J. J. *et al.* Cerium Anomalies in Lateritic Profiles. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 54, n. 3, p. 781–795, mar. 1990. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001670379090373S>. Acesso em: 19 dez. 2018.
- CANADÁ. The state of global rare earths industry: A review of market, production, processing and associated environmental issues. Canadian Rare Earth Element R&D Initiative. **Natural Resources Canadá**, may 25, 2016.

CIAMPONE, M.A. **Non-systematic weathering profile on metamorphic rock in the southern blue ridge mountains, North Carolina: Petrography, bulk chemistry, and mineral chemistry of biotite.** Thesis (Master's degree) – University of Cincinnati, Cincinnati, OH, 1995.

COCKER, Mark. D. Lateritic, supergene rare earth element (REE) deposits. **48th Annual forum on the geology of industrial minerals.** Scottsdale: Arizona. May 4, 2012. Disponível em: http://repository.azgs.gov/sites/default/files/dlio/files/nid1570/ree_cocker_chp4.pdf. Acesso em: 12 fev. 2019.

CURTIS, N., 2011. **Rare earths, we touch them everyday.** Investor Presentation, March 2011. Lynas Corporation Limited. Disponível em: http://www.lynascorp.com/content/upload/files/Presentations/Investor_Presentation_March_2011_950850.pdf (unpublished PowerPoint presentation). Acesso em: 14 jun. 2018.

DUZGOREN-AYDIN, N.S.; AYDIN, A.; MALPAS, J. Re-assessment of chemical weathering indices: Case study of pyroclastic rocks of hong kong. **Engineering Geology** v. 63, n. 1, p. 99-119, jan. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795201000734>. Acesso em: 11 jun. 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues**, 2012.

ESWARAN, H.; STOOPS, G.; DE PAEPE, R. A Contribution to the Study of Soil Formation on Isla Santa Cruz, Galapagos. **Pedologie** v. 23, p. 100-122, 1973.

FARIA, Ilio Rodarte Júnior. **Enriquecimento de terras raras e ítrio adsorvidos em argilas (Ion-Adsorption Clay) em perfis de intemperismo de granitos (sudeste do estado de São Paulo).** 2018. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

FEDO, C.M.; NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance, Ontario. **Geology** v. 23, p. 921-924, 1995. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/23/10/921/206193/Unraveling-the-effects-of-potassium-metasomatism?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 10 ago. 2018.

FERNANDES, Paulo Cesar Dávila. *et al.* The Jequié Complex revisited: a U-Pb geochronological reappraisal of the geology and stratigraphy of the Jequié-Itagi area (Bahia, Brazil). **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 42, p. 166-178, 2019. Disponível em: http://www.anuario.igeo.ufrj.br/2019_01/2019_1_166_178.pdf. Acesso em: 30 mar. 2019.

GAGLIARDI, M. Rare earths: worldwide markets, applications, technologies. **BCC Research**, Wellesley, 2015.

GUANGZHI, T. Low temperature geochemistry. Pequim, **China Science Press**, 1996.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. Extractive metallurgy of rare earth. **CRC PRESS**, 2005.

HAMDAN, J.; BURNHAM, C.P. The contribution of nutrients from parent material in three deeply weathered soils of peninsular Malaysia, Malaysia. **Geoderma** v. 74, p. 219– 233, 1996.

HARNOIS, L. The CIW index: a new chemical Index of weathering, Ottawa. **Sedimentary Geology** v. 55, n. 3, p. 319– 322, mar. 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0037073888901376>. Acesso em: 03 nov. 2018.

HILSUM, L. **Are rare earth minerals too costly for the environment?** Online: MacNiel/Lehrer Productions. News Report Transcript, 2009.

HOATSON, D.M.; JAIRETH, S; MIEZITIS, Y. The major rare-earth-element deposits of Australia: geological setting, exploration, and resources. **Geoscience Australia**, 204 p, 2011. Disponível em: https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/71820/Complete_Report.pdf. Acesso em: 10 set. 2018.

HOSHINO, M.; SANEMATSU, K.; WATANABE, Y. REE mineralogy and resources. **Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earth**, V. 49, p. 129-291, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168127316300010>. Acesso em: 03 dez. 2018.

JAYAWARDENA, U. S.; IZAWA, E. A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a Study from Sri Lanka. **Engineering Geology**, v. 36, n. 3, p. 303– 310, abr. 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0013795294900116?via%3Dihub>. Acesso em: 05 dez. 2018.

KLINGER, J. M. Rare Earth Elements: Development, sustainability and policy issues. **The Extractive Industries and Society**, 2018.

LUIDOLD, S., AUTREKOWITSCH, H. **European patent office patent**. EP 2444507 A1, 2012.

MASSARI, S., RUBERTI, M. Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. **Resources Policy**, v. 38, n. 1, p.36–43, mar. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420712000530>. Acesso em: 17 fev. 2019.

MARIANO, A. N.; MARIANO, A. Rare Earth Mining and Exploration in North America. **Elements**, v. 8, n. 5, p. 369–376, 2012.

MARSH, J. S. REE Fractionation and Ce Anomalies in Weathered Karoo Dolerite. **Chemical Geology**, v. 90, n. 3, p. 189–194, jun. 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/000925419190099D>. Acesso em: 13 jan. 2019.

MAYNARD, J.B. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting precambrian paleosols. **Journal of Geology**, Chicago, v. 100, n. 3, p. 279–289, mai. 1992. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/629632>. Acesso em: 04 ago. 2018.

MAYNARD, J.B., SUTTON, S.J., ROBB, L.J., FERRAZ, M.F., MEYER, F.M. A paleosol developed on hydrothermally altered granite from the hinterland of the witwatersrand basin: characteristics of a source of basin fill. **Journal of Geology**, v. 103, n. 4, p. 357–377, jul. 1995. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/629757>. Acesso em: 04 ago. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Mineração 2030**, Brasília, 2010.

NESBITT, H. W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. **Nature**, London, v. 279, p. 206-210, mai. 1979. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/279206a0>. Acesso em: 18 jun. 2018.

NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, London, v. 299, p. 715-717, out. 1982. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/299715a0>. Acesso em: 18 jun. 2018.

NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. Ontario, v. 48, n. 7, p. 1523-1534, jul. 1984. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016703784904083>. Acesso em: 19 jun. 2018.

NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M. Formation and diagenesis of weathering profiles. **Journal of Geology**. London, v. 97, n. 2, p. 129-147, mar. 1989. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdfplus/10.1086/629290>. Acesso em: 22 jun. 2018.

PARKER, A. An index of weathering for silicate rocks. **Geological Magazine**, v. 107, p. 501–504, 1970.

PRICE, J. R.; VELBEL, M. A. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. **Chemical Geology**, v. 202, n. 3, p. 397-416, dez. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009254103002547>. Acesso em: 21 jan. 2018.

QIU, T. *et al.* Behavior of leaching and precipitation of weathering crust ion-absorbed type by magnetic Field. **J. Rare Earths**, v. 26, p. 274-278, 2008.

RIM K.; KOO, K.; PARK, J. Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: A literature review. **Journal of Safety and Health at Work**. Deajeon, v. 4, n. 1, p. 12-26, mar. 2013. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2093791113410028?token=EAF132DD39C4049E7937DE8E09C8659CE8790F4DD9A54457DF4AD09D3D55405B32EF2B2BE1B33F6BAA2D02D6303387DF>. Acesso em: 14 set. 2018.

ROBERTSON, S. BGS Rock Classification Scheme. Classification of metamorphic rocks. London, **British Geological Survey Research Report**, v. 2, 1999.

ROCHA, Alexandre Magno Rocha da., *et al.* Process development for the Serra Verde weathered crust elution-deposited rare earth deposit in Brazil. *In: PROCEEDINGS OF THE 52nd CONFERENCE OF METALLURGISTS*, 08, 2013, Montreal: **Materials Science Technology Conference**. 2013. p. 277. Disponível em: http://web.cim.org/COM2014/conference/Rare_Earth_Elements_PROCEEDINGS_2013.pdf. Acesso em: 04 jan. 2019.

RUXTON, B.P. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. **Journal of Geology**. Chicago, v. 76, n. 5, p. 518–527 set. 1968. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/627357>. Acesso em: 08 mai. 2018.

SANEMATSU, K.; WATANABE, Y. Characteristics and genesis of Ion adsorption-type rare earth Element deposits. **Reviews in Economic Geology**, v. 18, p. 55–79, 2016.

SHAW, K.; SMUTZ, M.; BRIDGER, G. A. Process for separating thorium compounds from monazite sands, U.S. Atomic Energy Commission Report ISC-407. **National Technical Information Service**, Springfield, VA, 1954. Disponível em: https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1184&context=ameslab_iscreports. Acesso em: 12 fev. 2019.

SUTTON, S.J.; MAYNARD, J.B. Multiple Alteration Events in the History of a Sub-Huronian Regolith at Lauzon Bay. **Canadian Journal of Earth Science**, Ontario, v. 29, p. 432-445, 1992. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237174211>. Acesso em: 19 mar. 2018.

SUTTON, S.J.; MAYNARD, J.B. Sediment- and Basalt-Hosted Regoliths in the Huronian Supergroup: Role of Parent Lithology in Middle Precambrian weathering profiles. **Canadian Journal of Earth Science**, Austin, v. 30, p. 60-76, fev. 1993. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237174376>. Acesso em: 19 mar. 2018.

SUTTON, S.J.; RITGER, S.D.; MAYNARD, J.B. Stratigraphic Control of Chemistry and Mineralogy in Metamorphosed Witwatersrand quartzites. **Journal of Geology**, Chicago, v. 98, n. 3, p. 329-341, mai. 1990. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/30065777?seq=1>. Acesso em: 13 mar. 2018.

TAKEHARA, L. *et al.* **Avaliação do potencial de terras raras no Brasil**. Brasília: CPRM, 2015.

UNSCEAR. **Sources and effects of ionizing radiation**. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 2000.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Rare Earths. **Mineral Commodity Summaries**, 2017.

VOGEL, D.E. Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, South–Central Quebec. **Canadian Journal of Earth Sciences**,

v 12, n. 12, p. 2080–2085, 1975. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/237171080>. Acesso em: 04 jun. 2018.

VOGT, T. Sulitjelmefeltets Geologi og Petrografi. **Norges Geologiske Undersokels**, v. 121, p. 1-560, 1927.

WANG D. *et al.* Exploration and Research Progress on Ion-Adsorption Type REE Deposit in South China. **China Geology**, Jiangxi, v. 1, n. 3, p. 415-424, set. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096519219300552#bib28>. Acesso em: 04 mar. 2019.

WU, C.; HUANG, D.; GUO, Z. REE Geochemistry in the Weathered Crust of Granites, Longnan Area, Jiangxi Province. **Acta Geologica Sinica**, v. 3, n. 2, p. 193–209, jun. 1990. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1755-6724.1990.mp3002006.x>. Acesso em: 04 mar. 2019.

WOOLEY, A.R; KJARSGAARD, B.A. Paragenetic Types of Carbonatite as Indicated by the Diversity and Relative Abundances of Associated Silicate Rocks—Evidence from a global database. **Canadian Mineralogist**, v. 46, n. 4, p. 741–752, ago. 2008. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/46/4/741/126922>. Acesso em: 13 mar. 2019.

YUAN *et al.* **Mineralization pattern of REE ore deposits in China**. Geological Publishing House, Beijing, v. 57, p. 98-116, mai. 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84857875563&origin=inward&txGid=2cce73449da8484391e964aaaa2136f7>. Acesso em: 14 mar. 2019.

YU *et al.* Establishment and application of SMAIMA working method system and environment evaluation model for rare earth elements mine: A case study of ion-absorption type REE mines in Southern Jiangxi Province. **Acta Geoscientica Sinica**, v. 38, n. 3, p. 335-344, mai. 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85026349490&origin=inward&txGid=03c3d988bc079497fcfa2eb873f2b236>. Acesso em: 16 mar. 2019.

ZHAO Z, *et al.* Metallogenic Specialization of Rare Earth Mineralized Igneous Rocks in the Eastern Nanling Region. **Geotectonica et Metallogenia**, Nanling, v. 38, n. 2, p. 255-263, jan. 2014. Disponível em: <http://caod.oriprobe.com/articles/41860171>. Acesso em: 17 mar. 2019.

ZHAO Z, *et al.* Geochemical Features of Rare Earth Elements in Different Weathering Stage of the Guangxi Huashan Granite and its Influence Factors. **Chinese Rare Earths**, Guangxi, v. 36, p. 14-20, ago. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285826279>. Acesso em: 08 mar. 2019.

ZHAO Z, *et al.* Progress of Research on Metallogenic Regularity of Ion-Adsorption Type REE Deposit in the Nanling Range. **Acta Geologica Sinica**, v. 91, n. 12, p. 2814-2827, 2017a. Disponível em: http://www.geojournals.cn/dzxbe/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016316. Acessado em: 03 mar. 2019.

ZHAO Z, *et al.* REE Geochemistry of a Weathering Profile in Guangxi, Southern China, and Genesis of Ion-adsorption Type REE Deposit. **Earth Science**, v. 42, n. 10, p. 1697-1706, out. 2017b. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320879191>. Acesso em: 01 fev. 2019.

APÊNDICE – PADRÕES INOVADORES INERENTES AO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Impacto do produto

Esse trabalho foi criado com base em uma carência detectada sobre os mecanismos geológicos e recursos existentes para se avaliar geologicamente depósitos minerais de terras raras no Brasil e no mundo, que apresentam características geológicas similares às jazidas de terras raras adsorvidos em argilas da região Sul da China, de onde sai boa parte do que o mercado mundial consome dessas substâncias.

Diversos autores mencionados no trabalho reforçam a necessidade de otimizar os processos de avaliação geológica de depósitos minerais de terras raras do tipo adsorvidos em argilas com propósito de melhorar o modelamento de corpos mineralizados dessa natureza e, por consequência, evoluir nos processos de prospecção, de lavra e de beneficiamento para que o seu aproveitamento econômico ocorra de forma mais sustentável possível.

Desenvolvimento

A pesquisa foi desenvolvida com base em dados de trabalhos de campo executados em uma região com potencial geológico para conter mineralizações de terras raras. Ela se encontra inserida no contexto geológico das rochas do Complexo Jequié, no sudeste da Bahia.

Os dados utilizados são oriundos do processo de avaliação dos recursos minerais existentes na área estudada, obtidos por meio de um programa de sondagem. Através desses dados, geramos uma classificação litogeoquímica à aferição de um índice químico de alteração de rocha chamado de CIA, que nos permitiu modelar verticalmente os dados de perfuração para auxiliar no processo de caracterização e classificação dos recursos minerais encontrados.

Além do uso do CIA, integramos ao estudo ferramentas estatísticas, como matrizes de correlação, gráficos de teores, gráficos de tendência, estudos de mineralogia e análises químicas.

Objetivos e Finalidade do Produto

Através da implementação e aprimoramento no uso do índice de CIA como método auxiliar no processo de caracterização e classificação de depósitos minerais de ETR do tipo IAC, espera-se evoluir nos trabalhos geológicos prospectivos que envolvem a busca por novas jazidas desses recursos minerais tão importantes, bem como otimizar os trabalhos de pesquisa

que envolvem fases mais avançadas de um projeto de mineração, como modelamento geológico, modelamento de recursos e reservas minerais, lavra e processamento. Dessa forma, caminhar para estudos avaliações de impactos ambientais mais robustas e mais assertivas quanto aos riscos que envolvem o aproveitamento econômico dessas substâncias.

Aplicabilidade

O produto desse trabalho pode ser aplicado na prospecção mineral, na caracterização de depósitos minerais de terras raras de origem supergênica ou até mesmo para outras substâncias contidas em depósitos minerais formados por igual contexto geológico, na classificação de recursos e reservas minerais, no aprimoramento de estudos relacionados aos processos modelamento geológico para otimizar a lavra e o beneficiamento do minério de terras raras do tipo IAC e na otimização dos estudos ambientais necessários ao aproveitamento econômico dessas substâncias.