

AVALIAÇÃO DA POTENCIAL OCORRÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS ADSORVIDAS EM ARGILAS IÔNICAS NO COMPLEXO ALCALINO DE TANGUÁ-RJ

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OCCURRENCE OF RARE EARTH ELEMENTS ADSORBED ON IONIC CLAYS IN THE TANGUÁ ALKALINE COMPLEX, RIO DE JANEIRO.

Maria Luiza Alves de Mattos Reis

Aluno de Graduação de Geologia, 4º período
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Período PIBIC: agosto de 2024 a agosto de 2025
reis.marialuizaa@gmail.com

Luiz Carlos Bertolino

Orientador, geólogo, D.Sc.
lcbertolino@cetem.gov.br

RESUMO

Os Elementos Terras Raras (ETR) são matérias-primas críticas para a transição energética e tecnologias de alto desempenho, sendo utilizados em ímãs permanentes, turbinas eólicas, veículos elétricos e equipamentos eletrônicos. Entre os diferentes tipos de depósitos, as argilas de adsorção iônica (Ion-Adsorption Clay Deposits – IACDs) destacam-se pela extração por lixiviação de baixa complexidade e menor impacto ambiental. Este trabalho teve como objetivo compreender a gênese dos IACDs, os argilominerais envolvidos na adsorção e avaliar o potencial do Complexo Alcalino de Tanguá (RJ) para a ocorrência de ETR adsorvidos em argilas iônicas. A metodologia incluiu beneficiamento das amostras, Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX) e Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Os resultados indicam que os nefelina sienitos são favoráveis ao fornecimento de ETR leves devido à presença de minerais acessórios como titanita, apatita e zircão. O intemperismo químico promoveu a formação de caulinita/halloysita, associada ao enriquecimento relativo de ETR leves e ítrio no regolito e à depleção de Na, Ca e

P. As evidências mineralógicas e geoquímicas sugerem retenção parcial dos ETR nas superfícies dos argilominerais. Embora os resultados ainda não permitam classificar a área como um depósito de adsorção iônica, o estudo estabelece uma base para futuras investigações sobre o potencial brasileiro para esse tipo de mineralização.

Palavras-chave: Elementos Terras Raras; argilas de adsorção iônica; Complexo Alcalino de Tanguá; intemperismo químico.

ABSTRACT

Rare Earth Elements (REE) are critical raw materials for the energy transition and high-performance technologies, being widely used in permanent magnets, wind turbines, electric vehicles, and electronic devices. Among REE deposits, ion-adsorption clay deposits (IACDs) are attractive due to their low-complexity leaching processes and reduced environmental impacts compared to primary deposits. This study investigated the genesis of Tecnológico e Inovação IACDs, the clay minerals involved in REE adsorption, and evaluated the potential of the Tanguá Alkaline Complex (Rio de Janeiro, Brazil) for hosting REE adsorbed on ionic clays. The methodology included beneficiation of source rock and weathered material, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Results indicate that nepheline syenites are favorable source rocks for light REE due to accessory minerals such as titanite, apatite, and zircon. Chemical weathering promoted the formation of kaolinite/halloysite, associated with the relative enrichment of light

REE and yttrium in the regolith and the depletion of Na, Ca, and P. Mineralogical and geochemical evidence suggests partial REE retention on clay mineral surfaces. Although the area cannot yet be classified as an ion-adsorption deposit, this study provides a basis for future investigations into the Brazilian potential for this type of mineralization.

Keywords: Rare Earth Elements; ion-adsorption clays; Tanguá Alkaline Complex; chemical weathering

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por tecnologias de baixo carbono e pela transição energética tem ampliado a importância dos Elementos Terras Raras (ETR), grupo de 17 elementos essenciais para a produção de ímãs permanentes, turbinas eólicas, veículos elétricos e equipamentos eletrônicos. Embora relativamente abundantes na crosta terrestre, depósitos economicamente viáveis são escassos devido à complexidade da separação química entre os ETR. Entre os principais tipos de depósitos, destacam-se as argilas de adsorção iônica (Ion-Adsorption Clay Deposits – IACDs), nas quais os ETR encontram-se adsorvidos às superfícies de argilominerais secundários e podem ser extraídos por lixiviação com soluções salinas de baixa concentração, resultando em menores custos e impactos ambientais quando comparados aos depósitos primários (Bao & Zhao, 2008; Sanematsu & Watanabe, 2016).

A formação dos IACDs está associada ao intemperismo químico de rochas enriquecidas em minerais portadores de ETR. Durante esse processo, minerais como apatita, titanita, zircão e allanita liberam ETR para as soluções percolantes, que podem ser retidos por adsorção em argilominerais, principalmente caulinita, halloysita e illita, favorecendo o enriquecimento ao longo do perfil regolítico. Embora a maioria dos IACDs conhecidos ocorra no sul da China, regiões tropicais desenvolvidas sobre rochas alcalinas também apresentam elevado potencial. No Brasil, destaca-se o Alinhamento Alcalino Poços de Caldas–Cabo Frio (AAPCCF), que reúne complexos enriquecidos em minerais portadores de ETR (Teodoro et al., 2025). Entre eles, o Complexo Alcalino de Tanguá (RJ), composto principalmente por nefelina sienitos, sienitos e fonólitos, apresenta minerais acessórios como titanita, apatita e zircão, porém ainda carece de estudos sobre a evolução geoquímica do perfil de intemperismo e o comportamento dos ETR durante a formação do regolito. Assim, este trabalho busca contribuir para a compreensão dos processos de mobilização, retenção e enriquecimento de ETR no Complexo Alcalino de Tanguá, ampliando o conhecimento sobre a formação de depósitos de argilas de adsorção iônica em ambientes tropicais e sobre o potencial brasileiro para esse tipo de mineralização.

2. OBJETIVO

Avaliar o potencial de ocorrência de Elementos Terras Raras adsorvidos em argilas iônicas no Complexo Alcalino de Tanguá (RJ), por meio da integração de dados mineralógicos e geoquímicos, visando compreender a relação entre a mineralogia da rocha fonte, os processos de intemperismo e a concentração de ETR no perfil regolítico.

3. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido por meio da caracterização integrada de amostras de rocha sã (nefelina sienito) e material alterado do Complexo Alcalino de Tanguá (RJ). As amostras foram beneficiadas por secagem em estufa a 60 °C, cominuição, peneiramento e separação granulométrica para obtenção da fração de interesse. A caracterização mineralógica foi realizada por Difração de Raios X (DRX), com ênfase nos argilominerais secundários formados durante o intemperismo. A composição química foi determinada por Fluorescência de Raios X (FRX), enquanto as concentrações de elementos-traço, incluindo os Elementos Terras Raras (ETR) e o ítrio (Y), foram obtidas por Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises por ICP-MS evidenciaram a presença de Elementos Terras Raras leves (La, Ce, Pr, Nd e Sm) e ítrio (Y) tanto na rocha sã quanto no material alterado. Observa-se aumento sistemático das concentrações desses elementos na amostra alterada, com baixo enriquecimento relativo variando entre aproximadamente 5 e 27%, sendo mais expressivo para Sm, Pr e Y. Esse comportamento sugere que os processos intempéricos promoveram a concentração residual desses elementos ao longo da evolução do perfil de alteração.

Tabela 1: Concentração de elementos-traço determinados por ICP-MS nas amostras de rocha sã e rocha alterada.

Elemento	Rocha sã (mg kg ⁻¹)	Rocha alterada (mg kg ⁻¹)	Variação (%)
La	122,0	138,0	+13,1
Ce	245,0	258,0	+5,3
Pr	25,4	29,5	+16,1
Nd	103,0	119,0	+15,5
Sm	14,6	17,1	+17,1
Y	39,6	50,1	+26,5
Zr	431	489	+13,5
Rb	146	158	+8,2
Zn	94,3	126	+33,6
P	594	371	-37,5

A redução do teor de P observada nas análises por ICP-MS sugere alteração parcial de minerais fosfatados, como apatita, importante hospedeira primária de Elementos Terras Raras em rochas alcalinas. A dissolução desses minerais representa uma das principais fontes de liberação de ETR para os fluidos intempéricos, etapa essencial para o desenvolvimento de depósitos de adsorção iônica). A análise química por FRX evidencia modificações composicionais compatíveis com o avanço do intemperismo químico. Os teores de Na₂O diminuem de 4,0 para 2,4%, enquanto CaO reduz-se de 2,0 para 0,85%, indicando intensa lixiviação dos minerais mais susceptíveis à alteração, especialmente feldspatos alcalinos e plagioclásios presentes no nefelina sienito. Em contrapartida, observa-se aumento relativo dos teores de Al₂O₃ (19,3 para 21,0%), Fe₂O₃ (4,1 para 4,8%) e da perda ao fogo (PPC).

Tabela 2: Resultado da análise química, Fluorescência de Raios X (FRX).

Óxido	Rocha sã (%)	Rocha alterada (%)	Elemento	Rocha sã (%)	Rocha alterada (%)
Al ₂ O ₃	19,30	21,00	Al	10,2	11,1
CaO	2,00	0,85	Ca	1,4	0,61
Cr ₂ O ₃	0,27	0,27	Cr	0,20	0,20
Fe ₂ O ₃	4,10	4,80	Fe	2,90	3,40
K ₂ O	9,50	9,20	K	7,90	7,60
MgO	0,63	0,51	Mg	0,40	0,30
MnO	0,12	0,20	Mn	0,10	0,20
MoO ₃	<0,10	<0,10	Mo	<0,10	<0,10
Na ₂ O	4,00	2,40	Na	3,00	1,80
Nb ₂ O ₅	<0,10	<0,10	Nb	<0,10	<0,10
NiO	0,19	0,16	Ni	0,10	0,10
P ₂ O ₅	0,16	0,13	P	0,10	0,10

Tabela 2: Resultado da análise química, Fluorescência de Raios X (FRX). (Continuação).

Óxido	Rocha sã (%)	Rocha alterada (%)	Elemento	Rocha sã (%)	Rocha alterada (%)
Rb ₂ O	<0,10	<0,10	Rb	<0,10	<0,10
SO ₃	0,32	0,11	S	0,10	<0,10
SiO ₂	56,40	56,70	Si	26,40	26,50
SrO	0,16	0,12	Sr	0,10	0,10
TiO ₂	1,10	1,20	Ti	0,70	0,70
Y ₂ O ₃	<0,10	<0,10	Y	<0,10	<0,10
ZnO	<0,10	<0,10	Zn	<0,10	<0,10
ZrO ₂	<0,10	<0,10	Zr	<0,10	<0,10
PPC	1,60	2,20	—	—	—

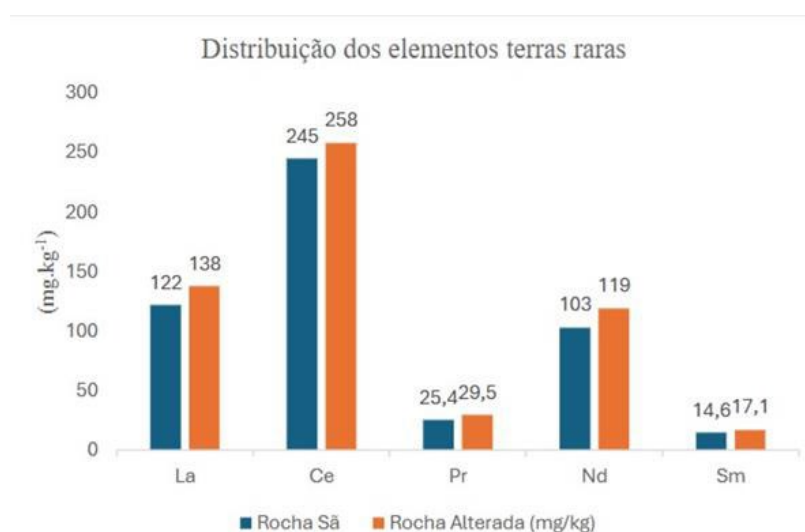


Figura 1: Distribuição dos elementos terras raras leves nas amostras analisadas.

O difratograma de raios X da amostra de rocha alterada (Figura 1), após o beneficiamento do material, evidenciou a predominância de três grupos de argilominerais. Os principais reflexos basais identificados correspondem à caulinita (7,15Å), à illita (10,0 Å) e ao grupo das esmectitas (≈15 Å), indicando que o perfil de alteração apresenta minerais secundários formados durante o processo de intemperismo da rocha alcalina.

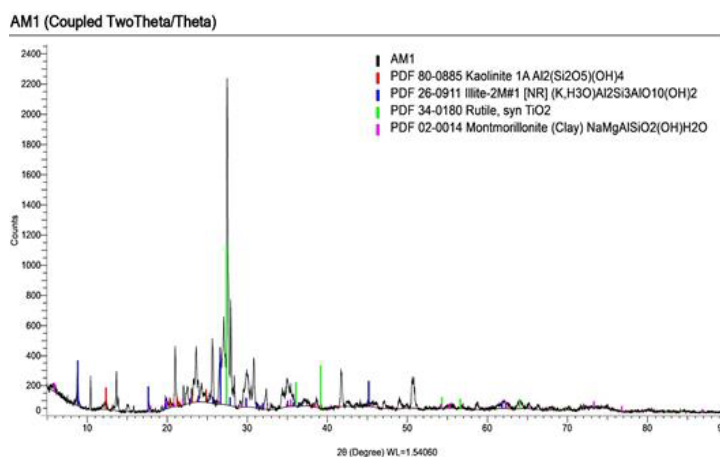


Figura 2: Difratograma de raios X.

5. CONCLUSÕES

A integração dos resultados químicos e mineralógicos evidenciou processos compatíveis com a formação de depósitos de argilas de adsorção iônica. As análises por FRX indicaram depleção de elementos móveis (Na, Ca e P), enquanto os dados de ICP-MS revelaram enriquecimento relativo de Elementos Terras Raras leves (ETRL) e ítrio (Y) no material alterado. A Difração de Raios X (DRX) mostrou predominância de argilominerais secundários, principalmente caulinita, illita e esmectita, indicando intensa alteração intempérica. Em conjunto, os resultados sugerem que o intemperismo favoreceu a formação de minerais secundários e o enriquecimento relativo dos ETR, embora ainda não seja possível confirmar sua adsorção nas superfícies dos argilominerais. Para avançar nessa interpretação, são necessárias análises complementares, como DRX em amostras orientadas com ativação por formamida, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e ensaios de lixiviação com sulfato de amônio, visando caracterizar os mecanismos de retenção e quantificar a fração adsorvida dos ETR. Este estudo estabelece uma base para a compreensão da evolução intempérica do Complexo Alcalino de Tanguá e para futuras investigações sobre o potencial brasileiro para depósitos de adsorção iônica de ETR.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de iniciação científica, ao Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino pela orientação, à equipe do Laboratório de Argilas Aplicadas (LAA) e ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pelo suporte técnico e infraestrutura fornecida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS]

BAO, Zhigang; ZHAO, Zhenhua. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. *Ore Geology Reviews*, Amsterdam, v. 33, n. 4, p. 519-535, 2008.

CHI, Ru'an; TIAN, Jiansheng. *Weathered Crust Elution-Deposited Rare Earth Ores*. New York: Nova Science Publishers, 2008.

HUMPHRIES, Marc. *Rare Earth Elements: The Global Supply Chain*. Washington, DC: Congressional Research Service, 2013.

RIBEIRO, Marcos S. *Caracterização mineralógica e geoquímica de depósitos de elementos terras raras em argilas de adsorção iônica associados ao complexo alcalino de Poços de Caldas*. Tese (Doutorado), [s.l.], [s.d.].

SANEMATSU, K.; WATANABE, Y. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits. In: VERPLANCK, P. L.; HITZMAN, M. W. (org.). *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*. Littleton: Society of Economic Geologists, 2016. p. 55-79.

SPARKS, Donald L. *Environmental Soil Chemistry*. 2. ed. Amsterdam: Academic Press, 2003.
TOLEDO, Maria Cristina Motta de; OLIVEIRA, Sonia Maria Barros de; FERRARI, Viviane C. Rare earth element migration associated with tropical weathering processes in Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam.

YUAN, Pei et al. Rare earth element adsorption onto kaolinite and halloysite: implications for ion-adsorption deposits. *Applied Clay Science*, Amsterdam, v. 146, p. 232-241, 2017.

ZHOU, Panpan et al. Transformative discovery of rare-earth functional materials for energy and electronics via machine learning. *eScience Energy*, p. 100061, 2026.