

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

JORGE HENRIQUE DE SOUZA SANTANA

LUAN HENRIQUE ONOFRE

RODRIGO VILARA VALERIANO

**AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE LAVRA APLICADOS À
EXPLORAÇÃO DE DEPÓSITOS DE TERRAS RARAS EM ARGILAS IÔNICAS**

POÇOS DE CALDAS/MG

2026

**JORGE HENRIQUE DE SOUZA SANTANA
LUAN HENRIQUE ONOFRE
RODRIGO VILARA VALERIANO**

**AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE LAVRA APLICADOS À
EXPLORAÇÃO DE DEPÓSITOS DE TERRAS RARAS EM ARGILAS IÔNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela
Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Vilson Carlesso dos Reis

POÇOS DE CALDAS/MG

2026

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Santana, Jorge Henrique de Souza.

Avaliação dos Principais Métodos de Lavra Aplicados à Exploração de Depósitos de Terras Raras em Argila Iônicas / Jorge Henrique de Souza Santana, Luan Henrique Onofre, Rodrigo Vilara Valeriano. - Poços de Caldas, MG, 2026.

31 f. : il. -

Orientador(a): Vilson Carlesso dos Reis.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2026.

Bibliografia.

1. Terras Raras. 2. Argilas Iônicas. 3. Métodos de Lavra. 4. Lixiviação. 5. Sustentabilidade ESG. I. Onofre, Luan Henrique. II. Valeriano, Rodrigo Vilara. III. Reis, Vilson Carlesso dos, orient. IV. Título.

JORGE HENRIQUE DE SOUZA SANTANA

LUAN HENRIQUE ONOFRE

RODRIGO VILARA VALERIANO

**AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE LAVRA APLICADOS À
EXPLORAÇÃO DE DEPÓSITOS DE TERRAS RARAS EM ARGILAS IÔNICAS**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo
assina a aprovação do(a) Trabalho de
Conclusão de Curso apresentado como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia pela
Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 14 de julho de 2026

Prof. Dr. Matheus Fernando Ancelmi
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.^a Dr. Maria de Fátima Rodrigues Sarkis
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Vilson Carlesso dos Reis
Universidade Federal de Alfenas

Documento assinado digitalmente
 **VILSON CARLESSO DOS REIS**
Data: 20/07/2026 10:03:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Expressamos nossa sincera gratidão ao nosso professor orientador, Vilson Carlesso dos Reis, cuja dedicação, paciência e condução cirúrgica foram pilares fundamentais ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua competência técnica, disponibilidade constante e incentivo contínuo não apenas permitiram superar os desafios acadêmicos, mas também impulsionaram o aprimoramento dos nossos conhecimentos, tornando possível a conclusão desta importante etapa da nossa formação.

Somos profundamente gratos por suas contribuições precisas, rigor técnico e pelo comprometimento demonstrado em cada mentoria. Seu apoio foi indispensável para o amadurecimento e a qualidade final desta pesquisa.

RESUMO

Os elementos terras raras (ETRs) são minerais estratégicos para a transição energética e o desenvolvimento de tecnologias de alta complexidade, despertando crescente interesse na exploração de depósitos de argilas iônicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar os métodos de lavra aplicados à extração de elementos terras raras nesses depósitos, considerando aspectos técnicos, operacionais, econômicos e ambientais. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e análise comparativa dos principais métodos empregados na exploração de argilas iônicas, com ênfase na lixiviação *in situ*, na lixiviação em pilha e na lavra convencional. Os resultados demonstraram que a lixiviação *in situ* apresenta elevada eficiência de recuperação e baixos custos operacionais, embora requeira rigoroso controle ambiental devido aos riscos de contaminação hidrogeoquímica. A lixiviação em pilha mostrou desempenho intermediário, conciliando maior controle operacional e ambiental com custos moderados, enquanto a lavra convencional destacou-se pelo maior controle das operações de extração e processamento, porém com maiores custos e movimentação de material. Conclui-se que não existe um método de lavra universalmente superior para todos os depósitos de argilas iônicas, sendo sua seleção dependente das características geológicas, hidrogeológicas, operacionais e ambientais de cada empreendimento. Com base na literatura analisada, foram sistematizadas diretrizes técnicas relacionadas ao controle da lixiviação, à drenagem monitorada e ao fechamento progressivo de mina, visando contribuir para uma exploração mais eficiente e sustentável desses depósitos.

Palavras-chave: Terras Raras; Argilas Iônicas; Métodos de Lavra; Lixiviação; Sustentabilidade ESG.

ABSTRACT

Rare earth elements (REEs) are strategic minerals for the global energy transition and the development of advanced technologies, increasing the interest in the exploitation of ion-adsorption clay deposits. This study aimed to evaluate the mining methods applied to the extraction of rare earth elements from ion-adsorption clay deposits, considering technical, operational, economic, and environmental aspects. The research was conducted through a literature review and a comparative analysis of the main mining methods employed in these deposits, with emphasis on in situ leaching, heap leaching, and conventional mining. The results showed that in situ leaching provides high recovery efficiency and low operating costs, although it requires rigorous environmental control due to the risk of hydrogeochemical contamination. Heap leaching presented intermediate performance, combining improved operational and environmental control with moderate operating costs, whereas conventional mining offered greater control over mining and processing operations but involved higher costs and greater material movement. The findings indicate that there is no universally superior mining method for ion-adsorption clay deposits, as the selection depends on the geological, hydrogeological, operational, and environmental characteristics of each project. Based on the literature reviewed, technical guidelines related to leaching control, monitored drainage, and progressive mine closure were systematized to support a more efficient and sustainable exploitation of these deposits.

Keywords: Rare Earths; Ion-Adsorption Clays; Mining Methods; Leaching; ESG Sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Comparação qualitativa dos métodos de lavra aplicados a depósitos de terras raras em argilas iônicas.....	24
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETRs	Elementos Terras Raras
LREE	<i>Light Rare Earth Elements</i> (terras raras leves)
HREE	<i>High Rare Earth Elements</i> (terras raras pesadas)
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i> (Ambiental, Social e Governança)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 ELEMENTOS TERRAS RARAS	13
3.2 DEPÓSITOS DE ARGILAS IÔNICAS	14
3.3 MÉTODOS DE LAVRA APLICADOS AOS DEPÓSITOS DE ARGILAS IÔNICAS.....	15
3.4 PROCESSAMENTO HIDROMETALÚRGICO	17
3.5 IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À EXPLORAÇÃO	18
3.6 SUSTENTABILIDADE E FECHAMENTO DE MINA	20
4. METODOLOGIA	21
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	21
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	22
4.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	23
4.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE LAVRA	24
Fonte: Elaboração própria.....	24
6. PROPOSTA TÉCNICA	26
6.1 CONTROLE DE LIXIVIAÇÃO	26
6.2 DRENAGEM MONITORADA.....	26
6.3 FECHAMENTO PROGRESSIVO.....	26
7. CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

Os elementos terras raras (ETRs) constituem um grupo de minerais estratégicos que desempenham papel fundamental no desenvolvimento tecnológico e na transição energética mundial. Suas propriedades magnéticas, ópticas, catalíticas e eletroquímicas tornam esses elementos indispensáveis para a fabricação de ímãs permanentes, baterias recarregáveis, turbinas eólicas, catalisadores, fibras ópticas, equipamentos eletrônicos, veículos elétricos e sistemas militares avançados. O avanço das tecnologias voltadas à descarbonização da economia e à digitalização dos processos produtivos tem ampliado significativamente a demanda global por esses elementos, tornando-os essenciais para o desenvolvimento econômico e tecnológico contemporâneo (SOUSA FILHO; ARAKI, 2014).

Além de sua importância tecnológica, os elementos terras raras possuem elevada relevância econômica e geopolítica, especialmente devido à concentração da produção mundial em poucos países, com destaque para a China. A crescente expansão da mobilidade elétrica, da geração de energia renovável e dos sistemas de armazenamento de energia intensificou a necessidade de suprimento desses minerais, considerados fundamentais para a fabricação de equipamentos de alta eficiência energética e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, os elementos terras raras passaram a ser classificados como minerais críticos para diversas economias, em razão de sua importância estratégica para o desenvolvimento industrial e tecnológico (MASSARI; RUBERTI, 2013; HOLANDA, 2022).

Entre as diferentes fontes de elementos terras raras, destacam-se os depósitos de argilas iônicas, caracterizados pela ocorrência dos elementos adsorvidos à superfície dos argilominerais por mecanismos de troca iônica, diferentemente dos depósitos convencionais, nos quais os ETRs encontram-se incorporados à estrutura cristalina de minerais específicos. Essa característica influencia diretamente os métodos de lavra e de processamento mineral empregados, permitindo a utilização de processos de lixiviação relativamente simples quando comparados aos métodos convencionais de beneficiamento (CHI; TIAN, 2008).

A exploração desses depósitos tornou-se uma alternativa de grande interesse para o suprimento mundial de elementos terras raras, principalmente em razão da

elevada demanda por minerais críticos e da predominância da produção chinesa. Nos últimos anos, o Brasil passou a despertar crescente interesse nesse segmento mineral devido à ocorrência de depósitos associados a complexos alcalinos e perfis lateríticos, especialmente na região do Planalto de Poços de Caldas. Entretanto, apesar do elevado potencial geológico nacional, a exploração de depósitos de argilas iônicas ainda representa um desafio relativamente recente, existindo limitada disponibilidade de estudos técnicos voltados aos métodos de lavra aplicáveis a esse tipo de depósito (RIBEIRO, 2024).

Embora o conhecimento relacionado aos processos hidrometalúrgicos tenha avançado significativamente nas últimas décadas, ainda existe escassez de estudos voltados à adaptação dos métodos de extração às condições geológicas brasileiras. Aspectos relacionados à viabilidade técnica, custos operacionais, controle ambiental, estabilidade geotécnica e eficiência de recuperação ainda necessitam de maior aprofundamento, dificultando o desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional voltada aos elementos terras raras. Essa limitação evidencia a necessidade de pesquisas capazes de integrar aspectos geológicos, operacionais, econômicos e ambientais na avaliação dos diferentes métodos de lavra empregados nesses depósitos (LONG *et al.*, 2010).

Entre os principais desafios associados à exploração de depósitos de argilas iônicas destaca-se o controle dos impactos ambientais decorrentes dos processos de lixiviação. A utilização de reagentes químicos, como sulfato de amônio e outros sais, pode provocar alterações nas características físicas e químicas do solo, contaminação de águas superficiais e subterrâneas, além de comprometer a estabilidade geotécnica das áreas mineradas quando conduzida sem adequado controle operacional (CHI; TIAN, 2008). Paralelamente, o aumento da demanda mundial por minerais críticos reforça a necessidade do desenvolvimento de processos de extração cada vez mais eficientes e ambientalmente seguros, capazes de reduzir o consumo de reagentes químicos, minimizar a geração de resíduos e aumentar a sustentabilidade das operações minerais (BORRA *et al.*, 2016; GOODENOUGH *et al.*, 2018).

Apesar da importância crescente dos depósitos de argilas iônicas, observa-se que grande parte da literatura concentra seus esforços na recuperação metalúrgica dos elementos terras raras e na otimização dos processos hidrometalúrgicos. Em contrapartida, estudos comparativos envolvendo os diferentes métodos de lavra permanecem relativamente limitados, principalmente quando considerados aspectos

como eficiência operacional, custos, controle geotécnico, impactos ambientais e aplicabilidade em diferentes condições geológicas. Da mesma forma, ainda são escassos os trabalhos que incorporam o planejamento do fechamento de mina e da recuperação ambiental como componentes do processo de tomada de decisão durante a seleção do método de exploração.

Diante desse cenário, torna-se relevante avaliar os principais métodos de lavra aplicáveis aos depósitos de terras raras em argilas iônicas, considerando suas características técnicas, operacionais, econômicas e ambientais. Essa abordagem contribui para ampliar a compreensão sobre as potencialidades e limitações de cada método, fornecendo subsídios para o planejamento de futuros empreendimentos minerais e para o desenvolvimento de uma mineração de terras raras mais eficiente, segura e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os métodos de lavra aplicados à extração de elementos terras raras em depósitos de argilas iônicas, considerando seus aspectos técnicos, operacionais, econômicos e ambientais.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar os depósitos de argilas iônicas e sua relação com a ocorrência de elementos terras raras.
- b) Descrever os principais métodos de lavra empregados na exploração de depósitos de argilas iônicas.
- c) Comparar os métodos de lixiviação *in situ*, lixiviação em pilha e lavra convencional quanto à eficiência de recuperação, custos operacionais, impactos ambientais, controle geotécnico e viabilidade técnica.
- d) Discutir as potencialidades e limitações de cada método, considerando sua aplicabilidade em diferentes condições geológicas e operacionais.
- e) Apresentar diretrizes técnicas voltadas ao controle da lixiviação, à drenagem monitorada e ao fechamento progressivo de mina como estratégias para uma exploração mais sustentável desses depósitos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ELEMENTOS TERRAS RARAS

Os elementos terras raras (ETRs) correspondem a um grupo de dezessete elementos químicos constituído pelos quinze lantanídeos, além do escândio (Sc) e do ítrio (Y), os quais apresentam propriedades físico-químicas semelhantes e ampla importância tecnológica. Tradicionalmente, esses elementos são classificados em dois grupos: terras raras leves (Light Rare Earth Elements – LREE), que compreendem do lantânio (La) ao európio (Eu), e terras raras pesadas (Heavy Rare Earth Elements – HREE), que abrangem do gadolínio (Gd) ao lutécio (Lu), incluindo o ítrio, frequentemente associado a esse grupo devido ao seu comportamento geoquímico semelhante (GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005).

Essa classificação possui relevância não apenas sob o ponto de vista químico, mas também econômico, uma vez que os diferentes grupos apresentam comportamentos distintos durante os processos de mineralização, beneficiamento e separação metalúrgica. Além disso, as terras raras pesadas, em geral, apresentam menor disponibilidade natural e maior valor agregado em razão de suas aplicações em tecnologias de elevada complexidade.

A cadeia produtiva das terras raras envolve um conjunto de etapas integradas que se inicia com a pesquisa mineral e a caracterização geológica dos depósitos, seguida pelas operações de lavra, beneficiamento físico, concentração mineral e processamento hidrometalúrgico destinado à recuperação e purificação dos elementos de interesse. Posteriormente, os óxidos e metais produzidos são empregados na fabricação de produtos de alto valor agregado, como ímãs permanentes, baterias recarregáveis, catalisadores, componentes eletrônicos e diversos equipamentos utilizados nos setores de energia, transporte, telecomunicações e defesa (GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005).

Entre todas as etapas dessa cadeia produtiva, a lavra representa um dos fatores de maior influência sobre a viabilidade técnica, econômica e ambiental dos empreendimentos minerais. A escolha do método de exploração condiciona aspectos como recuperação do minério, custos operacionais, geração de rejeitos, consumo de reagentes e magnitude dos impactos ambientais. Dessa forma, compreender as características dos diferentes tipos de depósitos e dos métodos de lavra aplicáveis

constitui etapa fundamental para o desenvolvimento sustentável da mineração de elementos terras raras.

3.2 DEPÓSITOS DE ARGILAS IÔNICAS

Os depósitos de argilas iônicas constituem uma importante fonte de elementos terras raras, destacando-se por apresentarem características mineralógicas e geoquímicas distintas dos depósitos convencionais. Esses depósitos são formados principalmente por processos de intemperismo intenso que atuam sobre rochas ígneas ricas em minerais portadores de elementos terras raras, especialmente granitos e complexos alcalinos. Em regiões de clima tropical e subtropical, o intemperismo químico promove a decomposição dos minerais primários, liberando os elementos terras raras, que passam a ser adsorvidos na superfície dos argilominerais presentes no perfil laterítico. Esse processo resulta na formação dos chamados depósitos de adsorção iônica, amplamente explorados no sul da China e considerados uma das principais fontes mundiais de terras raras pesadas (BAO; ZHAO, 2008).

Diferentemente dos depósitos convencionais, nos quais os elementos terras raras ocorrem incorporados à estrutura cristalina de minerais específicos, nos depósitos de argilas iônicas esses elementos encontram-se predominantemente adsorvidos na superfície dos argilominerais por meio de processos de troca iônica. Essa característica permite a recuperação dos elementos utilizando soluções salinas relativamente diluídas, tornando os processos de extração menos complexos do que aqueles empregados em depósitos minerais convencionais (CHI; TIAN, 2008).

A mineralogia desses depósitos exerce papel fundamental na adsorção e na recuperação dos elementos terras raras durante os processos de extração. Entre os principais argilominerais presentes destacam-se a caulinita e a haloisita, minerais pertencentes ao grupo dos aluminossilicatos hidratados, amplamente distribuídos em perfis de intemperismo desenvolvidos em regiões tropicais e subtropicais. Esses minerais apresentam superfícies com sítios de adsorção capazes de reter íons terras raras por interações eletrostáticas, característica que favorece sua recuperação por processos de lixiviação por troca iônica. A caulinita atua como um dos principais minerais hospedeiros dos elementos terras raras adsorvidos, disponibilizando sítios superficiais para a retenção desses íons por mecanismos de troca catiônica. A haloisita, por sua vez, apresenta elevada área superficial e estrutura tubular,

características que ampliam a disponibilidade de sítios de adsorção e favorecem a eficiência dos processos de lixiviação química (BAO; ZHAO, 2008; CHI; TIAN, 2008).

A eficiência da exploração desses depósitos depende diretamente da interação entre suas características geológicas, mineralógicas e geoquímicas. A composição dos argilominerais, o grau de intemperismo, a distribuição dos elementos terras raras e os mecanismos de adsorção influenciam significativamente a escolha do método de lavra, a eficiência da lixiviação e o desempenho dos processos hidrometalúrgicos empregados na recuperação dos elementos de interesse econômico. Dessa forma, o conhecimento dessas características constitui etapa essencial para o planejamento e a avaliação dos métodos de exploração aplicáveis aos depósitos de argilas iônicas (JORDENS *et al.*, 2013).

3.3 MÉTODOS DE LAVRA APLICADOS AOS DEPÓSITOS DE ARGILAS IÔNICAS

A escolha do método de lavra constitui uma das principais etapas do planejamento de empreendimentos destinados à exploração de depósitos de argilas iônicas contendo elementos terras raras. Essa decisão influencia diretamente a recuperação dos elementos de interesse, os custos operacionais, o consumo de reagentes, o controle ambiental e a estabilidade geotécnica da área minerada. Diferentemente dos depósitos convencionais de terras raras, nos quais a mineralização ocorre na estrutura cristalina dos minerais, os depósitos de argilas iônicas permitem a utilização de métodos baseados na lixiviação por troca iônica, tornando o processo de extração menos dependente da remoção integral do minério (CHI; TIAN, 2008).

Entre os principais métodos empregados destaca-se a lixiviação *in situ*, na qual soluções químicas são injetadas diretamente no corpo mineralizado com o objetivo de promover a dessorção dos elementos terras raras ainda no subsolo. Posteriormente, a solução enriquecida é coletada e encaminhada para as etapas de processamento hidrometalúrgico. Esse método tornou-se amplamente utilizado nas províncias do sul da China, especialmente em *Jiangxi*, *Guangdong* e *Guangxi*, onde ocorrem extensos depósitos de argilas iônicas. Sua ampla aplicação está associada ao baixo custo operacional, à reduzida movimentação de estéril e minério e à elevada eficiência na

recuperação dos elementos terras raras, sobretudo em depósitos de baixa profundidade (CHI; TIAN, 2008).

Apesar dessas vantagens, a lixiviação *in situ* apresenta limitações importantes relacionadas ao controle hidrogeológico da operação. A dispersão inadequada das soluções lixiviantes pode provocar contaminação de águas subterrâneas, alterações nas propriedades físico-químicas do solo e instabilidade geotécnica, exigindo rigoroso controle operacional quanto à permeabilidade do depósito, vazão de injeção, consumo de reagentes e recuperação das soluções utilizadas (YANG *et al.*, 2013).

Outro método empregado na exploração desses depósitos é a lixiviação em pilha, na qual o minério previamente escavado é disposto sobre bases impermeabilizadas e submetido à aplicação controlada de soluções lixiviantes contendo sais de amônio ou outros reagentes capazes de promover a troca iônica. Em comparação com a lixiviação *in situ*, esse método proporciona maior controle operacional e ambiental, uma vez que permite monitorar de forma mais eficiente a circulação das soluções e a coleta dos efluentes gerados. Entretanto, sua implantação demanda maior movimentação de material e custos operacionais superiores, associados às etapas de escavação, transporte e construção das pilhas de lixiviação (JORDENS *et al.*, 2013; MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2016).

A eficiência da lixiviação em pilha depende diretamente do controle de parâmetros operacionais como granulometria do minério, permeabilidade da pilha, vazão das soluções lixiviantes, concentração dos reagentes, pH e tempo de residência da solução no material mineralizado. O adequado monitoramento dessas variáveis influencia significativamente a recuperação dos elementos terras raras e o desempenho global do processo hidrometalúrgico (MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2016).

A lavra convencional constitui outra alternativa para exploração de depósitos de argilas iônicas, sendo empregada principalmente quando as características geológicas ou hidrogeológicas inviabilizam a utilização dos métodos de lixiviação direta. Nesse sistema, o minério é removido por operações convencionais de escavação e transporte até unidades de processamento, onde é submetido à lixiviação em tanques sob condições controladas de temperatura, agitação e concentração dos reagentes químicos. Essa configuração proporciona maior controle sobre as etapas de recuperação metalúrgica e reduz parte dos riscos associados à

dispersão das soluções lixiviantes no ambiente (DARLING, 2011; MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2016).

Por outro lado, a lavra convencional apresenta custos operacionais mais elevados em razão da necessidade de movimentação de grandes volumes de material, utilização intensiva de equipamentos de mineração e implantação de instalações industriais para processamento do minério. Além disso, esse método implica maior geração de estéril e rejeitos, exigindo planejamento adequado para disposição desses materiais e para a recuperação ambiental das áreas mineradas.

De maneira geral, observa-se que nenhum método de lavra pode ser considerado universalmente superior para todos os depósitos de argilas iônicas. A seleção da alternativa mais adequada depende da interação entre fatores geológicos, hidrogeológicos, econômicos, operacionais e ambientais. Dessa forma, a avaliação comparativa desses métodos constitui etapa fundamental para subsidiar o planejamento de empreendimentos voltados à exploração sustentável de elementos de terras raras.

3.4 PROCESSAMENTO HIDROMETALÚRGICO

Após a etapa de lavra, a recuperação dos elementos terras raras provenientes dos depósitos de argilas iônicas ocorre por meio de processos hidrometalúrgicos, responsáveis pela dissolução, separação e purificação dos elementos de interesse econômico. Essas etapas são fundamentais para a obtenção de produtos com elevado grau de pureza e elevado valor agregado, constituindo parte essencial da cadeia produtiva das terras raras.

O primeiro mecanismo envolvido na recuperação dos elementos terras raras é a troca iônica, processo característico dos depósitos de argilas iônicas. Nessa etapa, soluções contendo sais de amônio promovem a substituição dos íons terras raras adsorvidos na superfície dos argilominerais por outros íons presentes na solução lixivante. A eficiência desse processo depende de fatores como pH, concentração do reagente, granulometria do minério e tempo de contato entre a solução e o material mineralizado, influenciando diretamente a recuperação dos elementos terras raras (SOBRI; HARUN; YUNUS, 2024).

Após a troca iônica, os elementos terras raras são recuperados por meio da lixiviação química, etapa na qual soluções ácidas ou salinas promovem a dissolução seletiva dos elementos presentes no minério ou adsorvidos aos argilominerais. Esse processo pode ser realizado diretamente no depósito (*in situ*), em pilhas de lixiviação ou em tanques sob condições controladas de temperatura, agitação e concentração química. Segundo Moldoveanu e Papangelakis (2016), a eficiência da lixiviação está diretamente relacionada às características mineralógicas do depósito e ao adequado controle operacional das variáveis do processo.

Na sequência, a solução enriquecida é submetida à extração por solvente, considerada a principal tecnologia empregada na separação e purificação individual dos elementos terras raras. Nesse processo, compostos orgânicos específicos promovem a transferência seletiva dos íons metálicos entre fases aquosa e orgânica, possibilitando a obtenção de produtos com elevado grau de pureza. Devido à elevada similaridade química existente entre os elementos terras raras, essa etapa normalmente requer múltiplos estágios de extração e reextração para alcançar a separação individual dos diferentes elementos (XIE *et al.*, 2014).

A eficiência global do processamento hidrometalúrgico depende da integração entre as etapas de troca iônica, lixiviação e extração por solvente, bem como do controle rigoroso dos parâmetros operacionais envolvidos. Dessa forma, o desempenho dessas operações influencia diretamente a recuperação metalúrgica, os custos de produção e a viabilidade técnica da exploração dos depósitos de argilas iônicas, constituindo fator determinante para o sucesso econômico dos empreendimentos minerários.

3.5 IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À EXPLORAÇÃO

A exploração de depósitos de argilas iônicas contendo elementos terras raras apresenta importantes desafios ambientais, principalmente em função da utilização de soluções químicas durante os processos de lixiviação. Embora esses métodos possibilitam elevada recuperação dos elementos de interesse e reduzam a movimentação de material em comparação com a mineração convencional, sua aplicação exige rigoroso controle operacional para minimizar os riscos de contaminação ambiental e garantir a estabilidade das áreas mineradas.

Entre os principais impactos ambientais destaca-se a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. A utilização de soluções contendo sulfato de amônio e outros reagentes pode favorecer a mobilização de compostos nitrogenados e de elementos terras raras para o meio ambiente quando ocorre infiltração das soluções lixiviantes. Estudos desenvolvidos em áreas mineradas na China demonstram que resíduos do processo podem permanecer no perfil do solo durante longos períodos, mantendo elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal e promovendo alterações no pH do solo e das águas subterrâneas. Além disso, foram registradas concentrações elevadas de elementos terras raras em corpos hídricos, sedimentos e áreas agrícolas adjacentes às minas, evidenciando a dispersão desses contaminantes para diferentes compartimentos ambientais (ZHANG *et al.*, 2020; XI *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2019).

Outro aspecto relevante refere-se à estabilidade geotécnica das áreas submetidas à lixiviação. A circulação das soluções químicas pode modificar as propriedades mecânicas do solo mineralizado, reduzindo parâmetros como resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito interno. Essas alterações aumentam a suscetibilidade à ocorrência de erosões, instabilidades de taludes e movimentos de massa, especialmente em depósitos lateríticos constituídos por materiais pouco consolidados. Dessa forma, o monitoramento geotécnico contínuo constitui requisito fundamental para garantir a segurança operacional durante a exploração desses depósitos (HAMKA *et al.*, 2024).

A degradação do solo também representa um dos principais impactos associados à mineração de terras raras em argilas iônicas. A utilização contínua de reagentes químicos pode provocar acidificação, perda de nutrientes, alterações nas propriedades físico-químicas e redução da qualidade ambiental dos solos. Estudos realizados em áreas mineradas demonstram que a acidificação pode persistir mesmo após o encerramento das atividades, dificultando a recuperação da cobertura vegetal e comprometendo a reabilitação ambiental das áreas degradadas (XU *et al.*, 2023).

Além dos impactos diretos sobre solo e água, a exploração e o processamento de elementos terras raras podem ocasionar alterações na cobertura vegetal, perda de habitats, geração de resíduos e modificações na dinâmica dos ecossistemas. Segundo Balaram (2019) e Yang *et al.* (2013), esses impactos reforçam a necessidade de adoção de práticas de monitoramento ambiental, planejamento da

lavra e controle dos processos hidrometalúrgicos, de forma a compatibilizar a exploração mineral com a conservação ambiental.

Dessa forma, a avaliação dos impactos ambientais associados aos diferentes métodos de lavra constitui etapa indispensável para a definição das estratégias de exploração mais adequadas aos depósitos de argilas iônicas. A adoção de tecnologias que reduzam o consumo de reagentes, minimizem os riscos de contaminação e favoreçam a recuperação ambiental das áreas mineradas representa um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável da mineração de elementos terras raras.

3.6 SUSTENTABILIDADE E FECHAMENTO DE MINA

A crescente demanda mundial por elementos terras raras têm intensificado a necessidade de desenvolver métodos de exploração capazes de conciliar eficiência produtiva, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, os princípios ESG - *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança) têm assumido papel cada vez mais relevante no planejamento e na operação de empreendimentos minerários, incentivando a adoção de práticas voltadas à redução dos impactos ambientais, ao uso racional dos recursos naturais e ao fortalecimento da sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida da mina.

No caso dos depósitos de argilas iônicas, a busca por processos de mineração mais sustentáveis está diretamente relacionada à redução do consumo de água, ao controle da utilização de reagentes químicos e à minimização dos riscos de contaminação ambiental. Estudos recentes indicam que esses depósitos podem representar uma alternativa mais sustentável para o suprimento de elementos terras raras quando associados à adoção de boas práticas operacionais e ao monitoramento ambiental contínuo, contribuindo para o atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e para o fortalecimento das práticas ESG na mineração (TETZNER *et al.*, 2026).

Entre as estratégias voltadas à redução dos impactos ambientais destaca-se o desenvolvimento de reagentes alternativos ao sulfato de amônio, tradicionalmente empregado nos processos de lixiviação de argilas iônicas. Estudos de avaliação do ciclo de vida demonstram que a utilização de sulfato de magnésio pode reduzir entre 15% e 35% os impactos ambientais quando comparada ao sulfato de amônio,

evidenciando seu potencial como alternativa mais sustentável para a recuperação de elementos terras raras. Além disso, processos de bio-lixiviação utilizando microrganismos e metabólitos orgânicos vêm sendo investigados como rotas promissoras para aumentar a sustentabilidade da exploração mineral, embora ainda existam desafios relacionados à seletividade dos processos e ao tratamento das soluções lixiviadas (WANG *et al.*, 2025; BARNETT; PALUMBO-ROE; GREGORY, 2018).

Outra estratégia fundamental para a sustentabilidade da mineração de terras raras consiste na adoção do fechamento progressivo de mina. Diferentemente do modelo convencional, no qual as ações de recuperação ambiental são concentradas apenas ao término das atividades minerárias, o fechamento progressivo prevê a implementação contínua de medidas de reabilitação durante toda a vida útil do empreendimento. Essa abordagem permite reduzir passivos ambientais, minimizar riscos geotécnicos, facilitar o controle dos custos de recuperação e promover uma transição mais eficiente para o período pós-mineração.

Além da recuperação gradual das áreas exauridas, o fechamento progressivo contribui para a manutenção da estabilidade física e química das áreas mineradas, favorecendo o monitoramento contínuo das condições ambientais e permitindo a adaptação das estratégias de recuperação de acordo com a evolução das operações de lavra. Segundo De Barros Galo, Anjos e Sánchez (2022), essa abordagem proporciona maior previsibilidade no planejamento do fechamento, reduz incertezas técnicas e fortalece a sustentabilidade dos empreendimentos minerais.

Dessa forma, a incorporação de práticas sustentáveis, o desenvolvimento de tecnologias de menor impacto ambiental e o planejamento antecipado do fechamento de mina constituem elementos fundamentais para a exploração responsável dos depósitos de argilas iônicas. A integração dessas estratégias aos métodos de lavra contribui para aumentar a eficiência operacional, reduzir os impactos ambientais e promover uma mineração de elementos terras raras mais alinhada aos princípios da sustentabilidade e às demandas da sociedade contemporânea.

4. METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, exploratória e descritiva. É aplicada porque busca produzir conhecimento voltado à avaliação dos métodos de lavra empregados na extração de elementos terras raras em depósitos de argilas iônicas, contribuindo para a compreensão de aspectos técnicos, operacionais, econômicos e ambientais associados a esse tipo de empreendimento mineral.

Quanto aos objetivos, classifica-se como exploratória, uma vez que os depósitos de argilas iônicas ainda representam um tema relativamente recente no contexto mineral brasileiro, com limitada disponibilidade de estudos voltados à comparação dos métodos de lavra aplicáveis a esses depósitos. Também possui caráter descritivo, pois busca caracterizar os depósitos de argilas iônicas, os principais métodos de lavra empregados, os processos associados à lixiviação e os impactos ambientais decorrentes da exploração mineral.

A abordagem adotada é qualitativa, fundamentada na análise crítica de informações disponíveis na literatura científica e técnica. Dessa forma, o estudo busca organizar, interpretar e comparar conhecimentos já publicados, com o objetivo de subsidiar a avaliação dos métodos de lavra aplicados aos depósitos de terras raras em argilas iônicas.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica sobre a exploração de elementos terras raras em depósitos de argilas iônicas. Para isso, foram analisadas publicações técnico-científicas que abordam a formação desses depósitos, os métodos de lavra, o processamento hidrometalúrgico, os impactos ambientais e as estratégias de sustentabilidade aplicadas à mineração de terras raras.

As informações obtidas foram organizadas e analisadas de forma comparativa, permitindo identificar as principais características, vantagens, limitações e aplicações dos métodos de lixiviação *in situ*, lixiviação em pilha e lavra convencional. A partir dessa análise, realizou-se uma discussão integrada dos aspectos técnicos, operacionais e ambientais relacionados a cada método de exploração.

4.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

A avaliação dos métodos de lavra foi realizada com base em cinco critérios: eficiência de recuperação, custo operacional, impacto ambiental, controle geotécnico e viabilidade técnica. Esses critérios foram selecionados por representarem os principais aspectos considerados na implantação e operação de empreendimentos destinados à exploração de depósitos de argilas iônicas contendo elementos de terras raras.

A comparação entre os métodos de lixiviação *in situ*, lixiviação em pilha e lavra convencional foi conduzida de forma integrada, considerando as informações disponíveis na literatura quanto ao desempenho operacional, aos custos envolvidos, aos impactos ambientais e às condições técnicas de aplicação de cada método. Esses critérios constituíram a base para a análise comparativa apresentada no capítulo de resultados e discussão.

4.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

As informações obtidas na revisão bibliográfica foram organizadas em tabelas comparativas e analisadas por meio de abordagem qualitativa. A comparação entre os métodos de lavra permitiu identificar suas principais características, vantagens, limitações e condições de aplicação, considerando os critérios de avaliação estabelecidos neste estudo.

Os resultados foram interpretados de forma integrada, buscando relacionar os diferentes métodos de exploração às características dos depósitos de argilas iônicas, aos aspectos operacionais e aos impactos ambientais associados. Essa análise subsidiou a discussão dos resultados e a elaboração das recomendações técnicas apresentadas neste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE LAVRA

Com base na literatura analisada, a Tabela 1 apresenta uma síntese qualitativa das principais características dos métodos de lavra empregados na exploração de depósitos de argilas iônicas contendo elementos de terras raras. A comparação possui caráter interpretativo e foi elaborada a partir das evidências reportadas nos estudos revisados, não representando uma classificação absoluta dos métodos. Os atributos "baixo", "médio", "alto", "variável" e "controlado" expressam tendências relativas observadas na literatura, podendo variar em função das condições geológicas, hidrogeológicas, operacionais e ambientais de cada depósito

Tabela 1– Comparação qualitativa dos métodos de lavra aplicados a depósitos de terras raras em argilas iônicas

Método	Custo operacional	Recuperação	Impacto ambiental
Lixiviação <i>in situ</i>	Baixo	Alto	Alto
Lixiviação em pilha	Médio	Médio	Médio
Lavra convencional	Alto	Variável	Controlado

Fonte: Elaboração própria.

A análise comparativa evidencia diferenças significativas em relação aos aspectos econômicos, operacionais e ambientais. Conforme apresentado na Tabela 1, o método de lixiviação *in situ* apresenta baixo custo operacional e elevada recuperação dos elementos terras raras, tornando-se economicamente atrativo para depósitos lateríticos e argilas iônicas. Entretanto, esse método também apresenta elevado potencial de impacto ambiental, principalmente devido ao risco de contaminação de águas subterrâneas e às alterações hidrogeoquímicas associadas à dispersão de soluções lixiviantes no meio geológico (YANG *et al.*, 2013).

A lixiviação em pilha apresenta características intermediárias entre eficiência operacional e controle ambiental. Esse método possui custo operacional médio e recuperação considerada moderada, sendo utilizado em depósitos de menor teor mineral devido à simplicidade operacional e ao menor consumo energético quando comparado às rotas convencionais de processamento mineral. Além disso, o controle ambiental tende a ser mais eficiente do que na lixiviação *in situ*, especialmente devido

à utilização de sistemas impermeabilizados e drenagem controlada das soluções químicas empregadas no processo (MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2016).

Por outro lado, a lavra convencional apresenta custos operacionais mais elevados em razão da necessidade de escavação, transporte e processamento do minério em instalações industriais. Apesar disso, esse método possibilita maior controle operacional e ambiental sobre as etapas de extração e beneficiamento mineral, reduzindo parcialmente os riscos associados à contaminação hídrica e à dispersão de reagentes químicos. A eficiência de recuperação nesse modelo pode variar significativamente conforme as características mineralógicas do depósito e as condições operacionais adotadas no beneficiamento associado (JORDENS *et al.*, 2013).

De forma geral, os resultados indicam que não existe um método universalmente superior para exploração de depósitos de argilas iônicas contendo terras raras. A escolha do método mais adequado depende diretamente das características geológicas do depósito, da viabilidade econômica, das condições hidrogeoquímicas e do nível de controle ambiental exigido pela operação mineradora. Nesse contexto, a integração entre eficiência produtiva, sustentabilidade ambiental e segurança geotécnica torna-se fundamental para o desenvolvimento sustentável da mineração de terras raras.

6. PROPOSTA TÉCNICA

6.1 CONTROLE DE LIXIVIAÇÃO

Com base na análise dos métodos de lavra aplicados à extração de terras raras em depósitos de argilas iônicas, propõe-se um modelo técnico fundamentado em três pilares principais: controle de lixiviação, drenagem monitorada e fechamento progressivo de mina. A proposta busca conciliar eficiência operacional, redução de impactos ambientais e alinhamento com os princípios de sustentabilidade atualmente exigidos para a exploração de minerais críticos e estratégicos (BALARAM, 2019).

O primeiro componente da proposta consiste no controle de lixiviação, realizado por meio do monitoramento contínuo dos parâmetros operacionais, como pH, concentração dos reagentes, vazão de aplicação e composição química das soluções lixiviantes. O controle dessas variáveis é essencial para otimizar a recuperação dos elementos terras raras e minimizar perdas de reagentes e riscos ambientais associados à dispersão de soluções químicas no meio geológico (MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2016).

6.2 DRENAGEM MONITORADA

O segundo elemento corresponde à implementação de um sistema de drenagem monitorada, composto por canais de contenção, bacias de coleta e poços de monitoramento hidrogeológico distribuídos ao longo da área operacional. Esse sistema tem como objetivo controlar o fluxo das soluções lixiviantes e prevenir a contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Estudos realizados em depósitos de argilas iônicas na China demonstram que a ausência de monitoramento adequado pode resultar em degradação ambiental significativa e impactos negativos sobre os recursos hídricos locais (YANG *et al.*, 2013).

6.3 FECHAMENTO PROGRESSIVO

Por fim, propõe-se a adoção do fechamento progressivo de mina, estratégia que consiste na recuperação ambiental das áreas exauridas simultaneamente ao avanço das operações minerárias. Essa abordagem inclui recontorno topográfico,

recomposição do solo, revegetação e monitoramento ambiental contínuo, reduzindo o passivo ambiental acumulado ao longo da vida útil da mina. Segundo De Barros Galo, Anjos e Sánchez (2022), o planejamento antecipado do fechamento de mina contribui para redução dos riscos ambientais e melhora a sustentabilidade dos empreendimentos minerais.

Dessa forma, a integração entre controle de lixiviação, drenagem monitorada e fechamento progressivo constitui uma alternativa tecnicamente viável para aumentar a eficiência da exploração de terras raras em argilas iônicas, ao mesmo tempo em que promove maior segurança ambiental e alinhamento com os princípios ESG aplicados ao setor mineral.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os métodos de lavra aplicados à extração de elementos terras raras em depósitos de argilas iônicas, considerando seus aspectos técnicos, operacionais, econômicos e ambientais. A partir da revisão da literatura, foi possível compreender as características desses depósitos e analisar as principais alternativas empregadas para sua exploração, evidenciando que a escolha do método de lavra exerce influência direta sobre a eficiência de recuperação, os custos operacionais, os impactos ambientais e a viabilidade técnica dos empreendimentos minerários.

A análise comparativa demonstrou que a lixiviação *in situ* apresenta elevada eficiência de recuperação e baixos custos operacionais, constituindo uma alternativa economicamente atrativa para depósitos com condições geológicas e hidrogeológicas favoráveis. Entretanto, sua aplicação exige rigoroso controle ambiental em razão dos riscos associados à dispersão de soluções lixiviantes e à contaminação de águas subterrâneas. A lixiviação em pilha apresentou desempenho intermediário, conciliando maior controle operacional e ambiental com custos moderados, enquanto a lavra convencional destacou-se pelo maior controle das operações de extração e processamento, embora apresente custos mais elevados e maior movimentação de material.

Com base na literatura analisada, verificou-se que não existe um método de lavra universalmente superior para todos os depósitos de argilas iônicas. A seleção

da alternativa mais adequada deve considerar, de forma integrada, as características geológicas e hidrogeológicas do depósito, a eficiência de recuperação, os custos operacionais, os requisitos ambientais e as condições técnicas de implantação e operação. Dessa forma, a escolha do método de lavra deve resultar de uma avaliação multidisciplinar, capaz de equilibrar desempenho produtivo, segurança operacional e sustentabilidade ambiental.

Além da comparação dos métodos de lavra, o trabalho permitiu sistematizar diretrizes técnicas relacionadas ao controle da lixiviação, à drenagem monitorada e ao fechamento progressivo de mina. Embora essas diretrizes não constituam um novo modelo de exploração, sua integração representa uma síntese das principais práticas identificadas na literatura, podendo contribuir para o planejamento e a gestão de empreendimentos destinados à exploração de depósitos de terras raras em argilas iônicas.

Como limitação, destaca-se que esta pesquisa foi desenvolvida exclusivamente com base em revisão bibliográfica, não contemplando validação experimental ou aplicação em estudos de caso específicos. Além disso, observa-se que a literatura disponível sobre depósitos brasileiros de argilas iônicas ainda é reduzida quando comparada ao volume de estudos desenvolvidos em outros países, especialmente na China, onde esse tipo de depósito é amplamente explorado.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras contemplem a avaliação experimental dos métodos de lavra em depósitos brasileiros, estudos voltados ao desenvolvimento de lixivantes de menor impacto ambiental, o aperfeiçoamento do monitoramento hidrogeoquímico das operações e análises integradas envolvendo aspectos técnicos, econômicos e ambientais. A crescente demanda mundial por elementos terras raras reforça a importância de ampliar o conhecimento sobre esses depósitos e de desenvolver soluções que conciliem eficiência operacional, competitividade econômica e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, espera-se que este trabalho contribua para a compreensão dos métodos de lavra aplicados às argilas iônicas e sirva como referência para futuras pesquisas e para o planejamento de empreendimentos voltados à exploração sustentável desses recursos minerais.

REFERÊNCIAS

- BALARAM, V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, v. 10, n. 4, p. 1285-1303, 2019. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.
- BARNETT, Megan J.; PALUMBO-ROE, Barbara; GREGORY, Simon P. Comparison of heterotrophic bioleaching and ammonium sulfate ion exchange leaching of rare earth elements from a Madagascan ion-adsorption clay. **Minerals**, v. 8, n. 6, art. 236, 2018. DOI: 10.3390/min8060236.
- BAO, Zhengyi; ZHAO, Zhenhua. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. **Ore Geology Reviews**, v. 33, n. 3-4, p. 519-535, 2008. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2007.03.005.
- BORRA, C. R. *et al.* Recovery of rare earths from bauxite residue (red mud): a review. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 2, n. 4, p. 365-386, 2016. DOI: 10.1007/s40831-016-0068-2.
- CHI, Ru'an; TIAN, Jun. Weathered crust elution-deposited rare earth ores. **New York: Nova Science Publishers, 2008.**
- DARLING, Peter (ed.). SME mining engineering handbook. 3. ed. Littleton: **Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011.**
- DE BARROS GALO, David; ANJOS, José Ângelo Sebastião Araújo dos; SÁNCHEZ, Luis Enrique. Are mining companies mature for mine closure? An approach for evaluating preparedness. **Resources Policy**, v. 78, art. 102919, 2022. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102919.
- FAN, Q. H. *et al.* Sorption of Eu(III) on attapulgite studied by batch, XPS and EXAFS techniques. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 339, n. 1, p. 176-182, 2009.
- FERREIRA, F. A. Terras raras: aplicações industriais e biológicas. Rio de Janeiro: **CETEM, 2013.** (Série Tecnologia Mineral).

GOODENOUGH, Kathryn M. *et al.* Europe's rare earth element resource potential: an overview of REE metallogenic provinces and their geodynamic setting. **Ore Geology Reviews**, v. 72, p. 838-856, 2016. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.09.019.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. Extractive metallurgy of rare earths. **Boca Raton: CRC Press, 2005.**

HAMKA, Amirul Asyraf Mohd; SALEKI, Meisam; NABAVI, Zohreh; DEHGHANI, Hesam. Impacts of ammonium sulfate leaching on ion adsorption rare earths and soil mechanical properties. **Rudarsko-geološko-naftni zbornik**, v. 39, n. 1, p. 21-34, 2024. DOI: 10.17794/rgn.2024.1.3.

HOLANDA, Júlio César de. Terras-raras e nióbio no Brasil: **minerais estratégicos para a transição energética. Rio de Janeiro: IBASE, 2022.**

JORDENS, A. *et al.* A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. **Minerals Engineering**, v. 41, p. 97-114, 2013. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.017.

LONG, Keith R. *et al.* The principal rare earth elements deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective. Reston: **U.S. Geological Survey, 2010.** (Scientific Investigations Report 2010-5220).

LYU, Qifeng *et al.* Fluids flow in granular aggregate packings reconstructed by high-energy X-ray computed tomography and lattice Boltzmann method. 2024. Preprint.

MASSARI, Stefania; RUBERTI, Marcello. Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. **Resources Policy**, v. 38, n. 1, p. 36-43, 2013. DOI: 10.1016/j.resourpol.2012.07.001.

MOLDOVEANU, George A.; PAPANGELAKIS, Vassilios G. An overview of rare-earth recovery by ion-exchange leaching from ion-adsorption clays of various origins. **Minerals**, v. 6, n. 4, art. 130, 2016. DOI: 10.3390/min6040130.

RIBEIRO, F. P. Caracterização mineralógica das argilas presentes no depósito de terras raras do Complexo Alcalino de Poços de Caldas. 2024. Dissertação (Mestrado) – **Universidade Estadual Paulista**, Rio Claro, 2024.

SOBRI, Nurul Aniyah Mohamad; HARUN, Noorlisa; YUNUS, Mohd Yusri Mohd. A review of the ion exchange leaching method for extracting rare earth elements from ion adsorption clay. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 208, p. 94-114, 2024. DOI: 10.1016/j.cherd.2024.06.023.

SOUSA FILHO, Paulo César de; SERRA, Osvaldo Antonio. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. **Química Nova**, v. 37, n. 4, p. 753-760, 2014. DOI: 10.5935/0100-4042.20140121.

TETZNER, Anna B. G. *et al.* Rare earth elements, sustainability, and ion-adsorption clay: a bibliometric study on global trends and Brazil's prominence. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, v. 9, n. 1, p. 41-52, 2026. DOI: 10.29396/jgsb.2026.v9.n1.2.

XIE, Feng *et al.* A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. **Minerals Engineering**, v. 56, p. 10-28, 2014. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.021.

YANG, X. J. *et al.* China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. **Environmental Development**, v. 8, p. 131-136, 2013. DOI: 10.1016/j.envdev.2013.03.006.