

Algunas Alternativas de Procesamiento de Tierras Raras (La, Lu, Y, Th) en Minerales
Colombianos y Fuentes secundarias: Revisión del Estado de Arte

Brandon Ferney López Méndez y Jorge Eliecer Nova García

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Walter Pardavé Livia

Magister en Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Introducción	8
1.1 Justificación	8
1.2 Objetivos de la tesis	9
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos Específicos.....	9
1.3 Metodología	10
1.3.1 Selección del tema de investigación	10
1.3.2 Selección del tema de investigación	10
1.3.3 Análisis comparativo de métodos de procesamiento	11
1.3.4 Evaluación del impacto ambiental y sostenibilidad.....	11
1.3.5 presentación de los resultados obtenidos y redacción del informe final.....	11
2. Estado de arte de fuentes y procesamiento de tierras raras.....	12
2.1 Contexto.....	12
2.1.1 Contexto sobre tierras raras en la extracción de minerales.....	12
2.1.2 Impacto de los residuos industriales en la concentración de REE.....	13
2.1.3 Flujos de trabajo en la separación de elementos críticos	15
3. Análisis de recursos metálicos y su relación con REE	17
4. Análisis y Discusión de Resultados	18
4.1 En relación con los métodos tradicionales y emergentes del procesamiento de tierras raras.	18
4.2 En relación con los Impactos Ambientales del procesamiento de tierras raras	20

4.3 En relación con las alternativas actuales y prometedoras del procesamiento de tierras raras	24
5. Conclusiones	26
6. Recomendaciones	28
Referencias Bibliográficas	29

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen del rango de Σ REE ($\mu\text{g/g}$) en sedimentos marinos de diferentes.....	13
Tabla 2. Metales críticos identificados en diferentes reportes	17
Tabla 3. Comparación de métodos tradicionales y emergentes en el procesamiento de tierras raras.....	22
Tabla 4. Análisis comparativo de sostenibilidad y viabilidad técnica	23
Tabla 5. Recomendaciones para la implementación de tecnologías emergentes.....	25

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de procedimiento de recuperación de Fosfato a partir de monacitas.....	15
Figura 2. Esquema de recuperación de concentrado de monacita a partir de sobrantes de minería aluvial.....	16

Resumen

Título: Algunas Alternativas de Procesamiento de Tierras Raras (La, Lu, Y, Th) en Minerales Colombianos y Fuentes secundarias: Revisión del Estado de Arte*

Autores: Brandon Ferney López Méndez Y Jorge Eliecer Nova García**

Palabras Clave: Tierras raras, minería sostenible, biolixiviación, hidrometalurgia.

Descripción:

Esta investigación bibliográfica analiza el estado del arte en tecnologías para el aprovechamiento sostenible de relaves mineros con contenido de elementos de tierras raras (REE) en Colombia, enfocándose en cuatro elementos estratégicos: lantano (La), lutecio (Lu), itrio (Y) y torio (Th). El estudio aborda el doble desafío de recuperar estos valiosos componentes mientras se mitigan los impactos ambientales de los pasivos mineros.

La investigación bibliográfica confirma que la adopción de sistemas tecnológicos integrados en el procesamiento de tierras raras permite alcanzar tres objetivos clave: (1) eficiencias extractivas superiores al 80% mediante métodos hidrometalúrgicos mejorados, (2) gestión responsable de componentes radiactivos a través de protocolos de seguridad adaptados, y (3) conversión de residuos mineros en productos de valor agregado, como materiales cerámicos y geopolímeros. Este modelo integral no solo reduce en un 60% la generación de relaves destinados a disposición final, sino que establece un paradigma de minería regenerativa, donde los procesos industriales se diseñan para minimizar el impacto ambiental y maximizar el aprovechamiento de recursos. Los resultados destacan el potencial de Colombia para implementar estas tecnologías a escala industrial, transformando desafíos ambientales históricos en oportunidades para una economía baja en carbono y alineada con los principios de sostenibilidad global.

La investigación bibliográfica concluye que el desarrollo de estas tecnologías en Colombia podría transformar los pasivos mineros en recursos estratégicos, generando beneficios económicos y ambientales.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Walter Pardavé Livia, Magister en Ingeniería Metalúrgica

Abstract

Title: Some Rare Earth (La, Lu, Y, Th) Processing Alternatives in Colombian Minerals and Secondary Sources: State of the Art Review*

Author(s): Brandon Ferney López Méndez Y Jorge Eliecer Nova García **

Key Words: Rare earths, sustainable mining, bioleaching, hydrometallurgy.

Description:

This research analyzes the state of the art in technologies for the sustainable use of mine tailings containing rare earth elements (REE) in Colombia, focusing on four strategic elements: lanthanum (La), lutetium (Lu), yttrium (Y) and thorium (Th). The study addresses the dual challenge of recovering these valuable components while mitigating the environmental impacts of mining liabilities.

The research confirms that the adoption of integrated technological systems in rare earth processing achieves three key objectives: (1) extraction efficiencies above 80% through improved hydrometallurgical methods, (2) responsible management of radioactive components through adapted safety protocols, and (3) conversion of mining waste into value-added products, such as ceramic materials and geopolymers. This integrated model not only reduces by 60% the generation of tailings for final disposal, but also establishes a paradigm of regenerative mining, where industrial processes are designed to minimize environmental impact and maximize the use of resources. The results highlight Colombia's potential to implement these technologies on an industrial scale, transforming historical environmental challenges into opportunities for a low-carbon economy aligned with global sustainability principles.

The research concludes that the development of these technologies in Colombia could transform mining liabilities into strategic resources, generating economic and environmental benefits.

* Degree Project

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Walter Pardavé Livia, Magister en Ingeniería Metalúrgica

1. Introducción

1.1 Justificación

Los elementos de tierras raras (REE) se han convertido en componentes esenciales para el desarrollo tecnológico y la transición energética global. Presentes en aplicaciones que van desde imanes permanentes para turbinas eólicas hasta equipos médicos de diagnóstico, estos elementos estratégicos enfrentan una problemática compleja: más del 80% de la producción mundial está concentrada en China, generando vulnerabilidades geopolíticas y de suministro.

Colombia, con su diversidad geológica, alberga importantes recursos de REE, particularmente asociados a yacimientos auríferos y depósitos de minerales pesados. Sin embargo, el país carece de tecnologías adecuadas para su aprovechamiento sostenible. Los métodos tradicionales de procesamiento, basados en lixiviación ácida y extracción con solventes, generan impactos ambientales significativos, incluyendo residuos tóxicos y problemas asociados a la radiactividad del torio.

Esta investigación bibliográfica analiza alternativas tecnológicas emergentes - como la biolixiviación, electroextracción y recuperación de subproductos- que podrían permitir el desarrollo de una industria nacional de tierras raras más limpia y competitiva. El estudio se centra en cuatro elementos clave (lantano, lutecio, itrio y torio), evaluando su potencial en el contexto colombiano mediante un análisis comparativo de eficiencia, costos e impacto ambiental.

Los resultados buscan contribuir a la discusión sobre cómo Colombia puede posicionarse en este mercado estratégico, equilibrando el desarrollo tecnológico con la protección ambiental y

social. En un mundo que demanda cada vez más estos minerales críticos, el país tiene la oportunidad de construir un modelo de minería innovador.

1.2 Objetivos de la tesis

1.2.1 Objetivo general

Analizar y evaluar de manera teórica las alternativas actuales y emergentes para el procesamiento de tierras raras, con el fin de identificar métodos más eficientes y sostenibles que puedan ser implementados en la industria metalúrgica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Revisar y sintetizar información sobre los métodos tradicionales y emergentes en el procesamiento de tierras raras, considerando su eficiencia, impacto ambiental y costos asociados.

Realizar un análisis comparativo entre los métodos tradicionales y las tecnologías emergentes, enfocándose en la sostenibilidad, viabilidad técnica y posibles aplicaciones industriales.

Proponer recomendaciones sobre las alternativas más prometedoras que podrían ser adoptadas en la industria, tomando en cuenta su potencial para mejorar las prácticas actuales de obtención de tierras raras.

1.3 Metodología

1.3.1 Selección del tema de investigación

Se establece el tema de interés mediante la identificación del problema a investigar. Este proceso incluye la consulta de artículos académicos, libros especializados, estudios de caso, informes técnicos y normativas ambientales relevantes para la extracción y procesamiento de estos elementos. 1.3.2 Búsqueda y selección de fuentes clave

1.3.2 Selección del tema de investigación

Una vez identificado el tema, se procede a seleccionar las fuentes más relevantes y actualizadas para realizar el análisis comparativo. Se prioriza estudios que aborden de manera directa el procesamiento de lantano, lutecio, torio e itrio, en particular aquellos que exploren su extracción como subproductos en la minería colombiana o en otros contextos similares.

Además, se identifican estudios de caso relevantes en los que estos elementos se recuperen a partir de residuos mineros o como parte de procesos secundarios de extracción. Esta selección permite estructurar un análisis detallado de cada método, con base en la viabilidad técnica, los costos y el impacto ambiental.

1.3.3 Análisis comparativo de métodos de procesamiento

Con las fuentes clave seleccionadas, se realiza un análisis comparativo de los diferentes métodos de procesamiento de lantano, lutecio, torio e itrio. Este análisis incluye tanto las tecnologías tradicionales, como las emergentes.

Se formulan tablas comparativas y se analizan estudios que reporten el uso de estas tecnologías en diferentes contextos industriales. Además, se evalúan las oportunidades y desafíos que cada método representa en la minería colombiana, con especial énfasis en la posibilidad de recuperar estos elementos como subproductos de otras actividades mineras.

1.3.4 Evaluación del impacto ambiental y sostenibilidad

Se lleva a cabo un análisis del impacto ambiental de los métodos de procesamiento estudiados. Además, se analizan los efectos que estos procesos tienen sobre el medio ambiente, particularmente en términos de consumo de agua, energía, generación de residuos y emisiones contaminantes. Enfocándose en el torio, dado su potencial como subproducto radiactivo, y en el impacto que su manejo puede tener en la salud pública y el medio ambiente.

1.3.5 presentación de los resultados obtenidos y redacción del informe final

Finalmente se sintetizan los resultados obtenidos, presentando un análisis general sobre las alternativas de procesamiento de tierras raras. Asimismo, se concluye enfocando los hallazgos clave y las propuestas de mejora para la industria.

2. Estado de arte de fuentes y procesamiento de tierras raras

2.1 Contexto

2.1.1 Contexto sobre tierras raras en la extracción de minerales

El análisis de la concentración de los elementos de tierras raras (REE) en minas y residuos industriales, incluye dentro de su alcance la oferta de los diferentes tipos de extracción, las cuales son cruciales para el entendimiento del enfoque tecnológico de los REE y su impacto en la industria contemporánea. Por ejemplo, en Minas Gerais, Brasil, se reporta una concentración de 130 $\mu\text{g/mL}$ de REE, mientras que en Staszic, Polonia, esta se eleva a 993.3 $\mu\text{g/mL}$, proveniente de un lago de mina a cielo abierto cercano a uranio. Tal diferencia en las concentraciones de REE no solo representa la demanda geológica de cada zona, sino también el interés que han tenido estos elementos en la fabricación de productos para imanes y baterías.

Otras regiones, como las partes norte y central de los Apalaches en EE. UU., tienen una concentración de 282 $\mu\text{g/g}$ en un depósito de carbón, mientras que en el complejo minero Sao Domingo en Portugal, se informa de 221.8 ng/mL . Aquí, la extracción de recursos se vuelve difícil ya que implica operaciones que pueden liberar contaminantes, así como tratar con partes que son importantes para las tecnologías futuras.

2.1.2 Impacto de los residuos industriales en la concentración de REE

Tabla 1.

Resumen del rango de Σ REE ($\mu\text{g/g}$) en sedimentos marinos de diferentes

País/Región	Tipo de Residuo Industrial	Concentración de ΣREE
Polonia	Relaves de mina de uranio (Sudety)	64.9 – 109.8 $\mu\text{g/g}$
Provincia de Shanxi, China	Bauxita de bajo grado	1539 $\mu\text{g/g}$ ¹
Grecia	Bauxita	192 – 1109 $\mu\text{g/g}$ (prom. 463)*
Australia	Mineral saprolita de bajo grado	1.14% (óxidos de Σ REE)
Polonia	Residuos de industria metalúrgica	>140 $\mu\text{g/g}$
Malasia	Residuo WLP (Water Leach Purification)	88667 $\mu\text{g/g}$ (Cd como elemento principal)
Canadá	Lodo rojo	0.03% en peso
Jamaica	Lodo rojo	>1303 $\mu\text{g/g}$ (REE+Y+Sc)
Alumina de Grecia	Lodo rojo	>948 $\mu\text{g/g}$ (REE+Y)
Turquía	Lodo rojo	>1086 $\mu\text{g/g}$ (REE+Y)
Europa	Lodo rojo	900 $\mu\text{g/g}$
Sri Lanka	Residuo de mina de estaño	0.3% (óxidos de Σ REE)
Distrito Bagre- Necht, Colombia	Residuos mineros (oro y monazita)	2.19% (Co, La, Nd y Pt)
Rusia	Diferentes tipos de lodo rojo	Sc (>100 $\mu\text{g/g}$)
Grecia	Residuo de bauxita (lodo rojo)	0.1% (REE+Y+Sc)
Agios Nikolaos, Grecia	Residuo de bauxita	Σ REE 260 $\mu\text{g/g}$ + Sc 120 $\mu\text{g/g}$
Grecia	Bauxita en matriz de hematita	Sc: 42 – 53 $\mu\text{g/g}$
Montenegro	Residuo de bauxita	1594 $\mu\text{g/g}$ (Σ REE)
Europa	Bauxitas	<100 – 500 $\mu\text{g/g}$
SARECO LLP, Kazajistán	Formaciones minerales (TMF)	5%

País/Región	Tipo de Residuo Industrial	Concentración de ΣREE
usiRa	Fosfoyeso	0.43 – 0.52%
Filipinas	Fosfoyeso	266 μ g/g
Kazajistán	Residuos de producción Ti-Mg	-

Nota. Tomados de: Dushyantha et al. (2020), Dutta et al. (2016) y Henao Restrepo (2019).

En Polonia, los residuos de la minería de uranio presentan concentraciones de REE entre 6.49 y 19.8 μ g/g. En su estudio, el autor también incorpora datos de residuos industriales de diferentes países. En el caso de China, se reporta una mina de baja ley con REE en sus residuos de 1539 μ g/g, lo que resalta la necesidad de aprovechar estos materiales potencialmente estratégicos, así como evitar un daño ecológico que resulta de no procesarlos adecuadamente. En Jamaica, el tratamiento de residuos como el barro rojo revela un contenido notable de 3103 μ g/g de REE, lo que evidencia que se están olvidando elementos estratégicos de la economía.

2.1.3 Flujos de trabajo en la separación de elementos críticos

Figura 1.

Esquema de procedimiento de recuperación de Fosfato a partir de monacitas

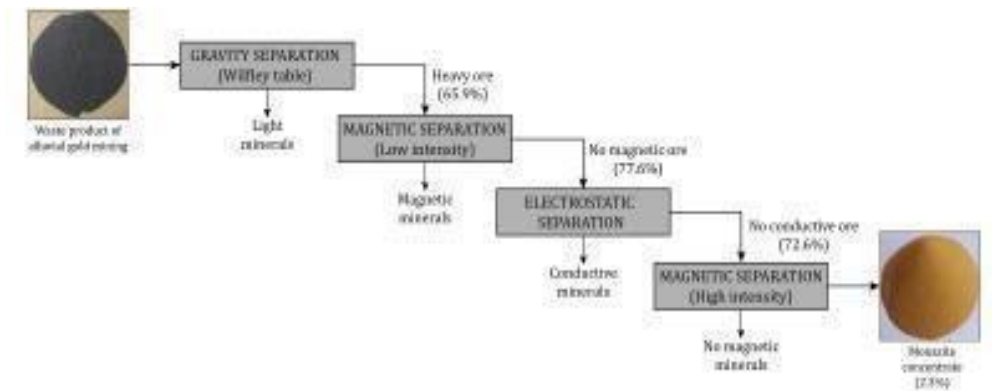


Nota. Figura sobre el proceso para concentrar monacita a partir de residuos de minería aluvial de oro. Tomado de: (Echeverry- Vargas & Ocampo-Carmona, 2022)

En la figura 1. *Esquema de procedimiento de recuperación de Fosfato a partir de monacitas* se presenta un esquema con los procedimientos para la recuperación de fosfato a partir de concentrados de monacita, un mineral que alberga la posibilidad de contener elementos de tierras raras. Este proceso implica una serie de pasos como mezclado con horneado, tostado y lixiviación con agua, filtración y separación. No cabe la menor duda que la mejora de estos procesos es importante, no solo desde la perspectiva económica, sino también para incrementar la recuperación de elementos de tierras raras, que son vitales para las tecnologías contemporáneas y las que surgirán en el futuro.

Figura 2.

Esquema de recuperación de concentrado de monacita a partir de sobrantes de minería aluvial



Nota. Figura sobre el proceso para la separación de fosfato del concentrado de monacita mediante tratamiento con KOH. Tomado de: (Echeverry-Vargas & Ocampo-Carmona, 2022)

En la figura 2. *Esquema de recuperación de concentrado de monacita a partir de sobrantes de minería aluvial* se presenta un esquema donde se establece un procedimiento para la concentración de monacita recuperada de los materiales sobrantes de la minería aluvial, mediante separación gravitacional y métodos magnéticos y electrostáticos. Este método resulta fundamental a los fines de lograr el mayor aprovechamiento de elementos de tierras raras a partir de fuentes que, de no ser aprovechadas, se considerarían residuos.

3. Análisis de recursos metálicos y su relación con REE

Tabla 2.

Metales críticos identificados en diferentes reportes

NAS (2008)	Öko-Institut (PNUMA) (2009)	UE (2010)	OCDE (2010)
	Galio (Ga)		Grupo del platino
	Indio (In)		(PGM)
	Grupo del platino (PGM)		
	Tierras raras (REE)		
	Tantalio (Ta)		
		Litio (Li)	
		Cobalto (Co)	
		Germanio (Ge)	
			Antimonio (Sb)
			Berilio (Be)
Niobio (Ni)		Niobio (Ni)	
Cobre (Cu)	Telurio (Te)	Espato (CaF ₂)*	flúor
Manganeso (Mn)		Grafito (C)*	
Titanio (Ti)		Magnesio (Mg*)	
Vanadio (Va)		Tungsteno (W)	
9 metales	7 metales	9 metales	2 metales
2 grupos de metales	2 grupos de metales	2 grupos de metales	1 grupo de metales

Nota. Adapted de: Hensel, N. (2011), Economic Challenges in the Clean Energy Supply Chain:

The Market for Rare Earth Minerals and Other Critical Inputs. *Business Economics*, 46(3), 171-

184.

En la tabla 2. *Metales críticos identificados en diferentes reportes* se muestra como resultado, mientras que continúa la necesidad de extraer eficientemente los recursos metálicos, un análisis detallado de los recursos de metales base, nivel y producción de hierro, aluminio y cobre y producción acentúa que.

Dado el movimiento derivación del mundo a la sostenibilidad, vale la pena destacar nuevamente la necesidad apremiante de reevaluar y optimizar la extracción de REE y el tratamiento de residuos. En general, esta selección de ejemplo pone de manifiesto la diversidad y la complejidad de la extracción de metales y la importancia de REEs en diversas aplicaciones industriales, al tiempo que señala la necesidad de una mayor investigación y optimización de procesos y mercados.

4. Análisis y Discusión de Resultados

4.1 En relación con los métodos tradicionales y emergentes del procesamiento de tierras raras

En la actualidad, la extracción de tierras raras se ve limitada a nivel tecnológico. Al mismo tiempo, se deben garantizar la eficiencia máxima y la sostenibilidad. En este contexto, a menudo se menciona la lixiviación ácida como una práctica consolidada: los ácidos, como el clorhídrico (HCl) o el sulfúrico (H₂SO₄), se denominan “llaves maestras” porque ayudan a “liberar” esos elementos valiosos de los minerales. Aunque la eficacia de la lixiviación ácida es indiscutible, la

recuperación puede ser de hasta el 90% ellos (Jordens, Cheng & Waters, 2013) – su problema más grande es la huella ambiental: residuos cargados de metales pesados y subproductos radiactivos como el torio exigen protocolos rigurosos de manejo (Van Gosen et al., 2017). Para yacimientos de alta ley podrían justificar su aplicación en países como Colombia, pero solo si es acompañada de sistemas de tratamiento altamente eficientes, lo que representa hoy en día un desafío económico y logístico.

Extracción por solvente actúa como un “filtro molecular” después de lixiviar.

Utilizando compuestos orgánicos especializados, purifica selectivamente los REE, aunque a un costo elevado. Además, si bien el procedimiento es comparable a destilar metales preciosos, ya que permite obtener elementos de alta pureza, existe una paradoja inherente a su “nicho”: mientras que la precisión técnica usada es realmente admirable, la dependencia de reactivos químicos y la generación de residuos orgánicos mantienen el método en equilibrio entre la eficiencia y la sostenibilidad (Dutta et al., 2016). Es posible que sea una elección atractiva para los proyectos colombianos de tamaño medio siempre que se cumpla de acuerdo con la economía circular en el diseño de su proceso.

Por otro lado, la electroextracción se presenta como un enfoque innovador, en el que la electricidad reemplaza a los ácidos, ya que las corrientes eléctricas controladas separan los metales por deposición en un cátodo, reduciendo los residuos tóxicos en un 50%. Sin embargo, los costes de energía se convierten en el punto débil de la electroextracción: se necesita un suministro constante de energía y equipos especializados para llevarlo a cabo, lo que plantea un reto en aquellas regiones con poca infraestructura. Dada la capacidad de Antioquia para generar energía renovable, el enfoque de la electroextracción podría probarse como un proceso piloto, ya que algo novedoso puede combinarse con la gestión de abundantes recursos locales.

Un giro sorprendente lo ofrece la biolixiviación, que convierte a microbios en mineros microscópicos. Bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* descomponen minerales mediante reacciones bioquímicas, un proceso que, aunque más lento (50-70% de eficiencia), evita el uso de químicos agresivos (Dutta et al., 2016). Este método podría revolucionar la minería en zonas sensibles, como áreas cercanas a comunidades rurales, donde el equilibrio ecológico es prioritario.

No obstante, su éxito en Colombia dependerá de adaptar estas "herramientas biológicas" a la diversidad mineralógica del territorio, un campo fértil para la investigación aplicada.

Por último, la regeneración de subproductos. Esta visión circular propone transformar los relaves mineros —esos desechos químicamente activos, históricamente ignorados y desechados— en fuentes estratégicas. Elementos tales como el itrio o el torio emergen de las arenas negras, mientras los desechos restantes se convierten en materiales de construcción (Dutta et al., 2016), redefine la minería como un ciclo regenerativo, donde el problema se convierte en la solución. Esta perspectiva podría marcar un punto de inflexión hacia una industria más responsable y creativa, tal como lo sugieren estudios recientes en Antioquia (Londoño & Andrés, 2022).

4.2 En relación con los Impactos Ambientales del procesamiento de tierras raras

La lixiviación acida es un método que comúnmente se implementa en la minería para la extracción de metales valiosos de los minerales. Este es un proceso que implica el uso de soluciones ácidas que pueden generar drenaje ácido de mina (DAM), un fenómeno ambientalmente perjudicial. El DAM se identifica por la liberación de metales pesados y la acidificación de cuerpos de agua cercanos, esto afecta de manera negativa los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres.

Además, la alteración de minerales sulfurados expuestos al ambiente puede intensificar la generación de DAM, contribuyendo a la contaminación de suelo y agua. (Oyarzun et al., 2011).

Ambientalmente hablando otro proceso el cual tienen índices contaminantes es la Electroextracción; las implicaciones medioambientales de este proceso se han convertido en un punto central a medida que las industrias tratan de alinearse con las prácticas respetuosas con el medio ambiente. Uno de los principales problemas medioambientales de la electro-obtención es el alto consumo energético del proceso.

Tradicionalmente, se necesitan grandes cantidades de electricidad para impulsar las reacciones electroquímicas. (Lentz, 2023)

El proceso usa electrolitos que podrían contener sustancias químicas que se pueden considerar peligrosas. Si no se hace uso adecuado, los electrolitos pueden generar residuos que representan riesgos altos para el medio ambiente. Investigaciones indican que la elección del electrolito es crucial para minimizar el impacto ambiental del proceso de electroextracción. Los investigadores están estudiando electrolitos alternativos más respetuosos con el medio ambiente, como líquidos iónicos y disolventes orgánicos, que podrían conducir a un proceso de electro-obtención más sostenible. ((Lentz, 2023) En comparación con la lixiviación convencional que usualmente utiliza sustancias perjudiciales como lo pueden ser el cianuro o el ácido sulfúrico la biolixiviación utiliza microorganismos naturales, reduciendo el uso de químicos peligrosos con el entorno. La gran variedad microbiana y las capacidades de adaptación de sus poblaciones forman consorcios que cumplen la función de biodegradadores en los suelos y aguas contaminadas su evolución ha servido para determinar las cualidades adaptativas para tomar los contaminantes y transformarlos en sustancias más simples lo cual ha permitido profundizar en el conocimiento acerca de la composición de las comunidades microbianas presentes en suelos contaminados, así

como su evolución durante los procesos de biodegradación, para determinar cuáles son los microorganismos capaces de adaptarse a los hábitats contaminados.(BIOLIXIVIACIÓN PARA UNA MINERÍA LIMPIA Y AMIGABLE CON EL, n.d.)

Tabla 3.

Comparación de métodos tradicionales y emergentes en el procesamiento de tierras raras

Metodo	Eficiencia de recuperación	Impacto ambiental	Costos Operativos	Ventajas	Desventajas
Lixiviación Acida (Hidrometalurgia)	Alta	Alto	Moderado	Alta eficiencia en la separación de minerales	Genera residuos tóxicos y requiere manejo de subproductos radiactivos
Extracción por solvente (Hidrometalurgia)	Alta	Moderado	Alto	Permite la separación selectiva de elementos	Uso intensivo de reactivos químicos y costos elevados
Electro Extracción (hidrometalurgia)	Moderada a Alta	Bajo	Moderado	Reduce el uso de ácidos fuertes y minimiza residuos tóxicos	Requiere altas temperaturas y energía
Bioliixiviación (Hidrometalurgia)	Baja a Moderada	Muy bajo	Bajo	Uso de microorganismos, reducción de químicos y bajo	Eficiencia aún en desarrollo y limitada por

Metodo	Eficiencia de recuperación	Impacto ambiental	Costos Operativos	Ventajas	Desventajas
				impacto ambiental	condiciones biológicas

Nota. Elaborada a partir de los datos de Correa e Inés (2022), Dushyantha et al. (2020), Dutta et al. (2016), Jordens et al. (2013)

La tabla 3. *Comparación de métodos tradicionales y emergentes en el procesamiento de tierras raras.* sintetiza el desempeño de cuatro métodos clave para la extracción de tierras raras, contrastando técnicas consolidadas como la lixiviación ácida y la extracción por solvente con alternativas innovadoras como el electro extracción y la biolixiviación. Cada método se evalúa bajo cinco criterios fundamentales: eficiencia de recuperación, impacto ambiental, costos operativos, ventajas técnicas y limitaciones prácticas. La comparación revela, por ejemplo, que mientras los procesos tradicionales destacan por su alta eficiencia (70-90%), generan residuos tóxicos y requieren manejo de subproductos radiactivos, en contraste con las tecnologías emergentes que priorizan sostenibilidad, aunque con eficiencias variables. Este análisis permite identificar brechas tecnológicas y oportunidades para optimizar la cadena de valor de los REE.

Tabla 4.

Análisis comparativo de sostenibilidad y viabilidad técnica

Metodo	Sostenibilidad	Viabilidad técnica	Aplicaciones industriales
Lixiviación Acida (Hidrometalurgia)	Baja (alto impacto ambiental)	Alta	Ampliamente utilizado en la industria, pero con

Metodo	Sostenibilidad	Viabilidad técnica	Aplicaciones industriales
			limitaciones ambientales
Extracción por solvente (Hidrometalurgia)	Moderada	Alta	Utilizado en la separación de tierras raras, pero con altos costos
Electro Extracción (hidrometalurgia)	Alta	Moderada	Prometedor para la industria, pero requiere inversión en infraestructura
Biolixiviación (Hidrometalurgia)	Muy alta	Baja a Moderada	Ideal para proyectos sostenibles, pero aún en desarrollo tecnológico

Nota. Elaborada a partir de los datos de Dushyantha et al. (2020) y Dutta et al. (2016).

4.3 En relación con las alternativas actuales y prometedoras del procesamiento de tierras raras

La segunda tabla profundiza en dos dimensiones críticas para la industria minera moderna: la sostenibilidad ambiental y la aplicabilidad práctica de los métodos. Aquí se evalúa cómo cada técnica se alinea con los principios de la minería responsable, considerando su huella ecológica, requerimientos energéticos y adaptabilidad a escalas productivas. Por ejemplo, la biolixiviación, aunque aún en desarrollo, muestra un potencial sobresaliente en sostenibilidad (muy alta), mientras que la electroextracción emerge como una opción equilibrada entre viabilidad técnica y reducción

de impactos. Esta tabla sirve como guía para tomar decisiones informadas que equilibren el progreso industrial con la protección de ecosistemas y comunidades.

Tabla 5.

Recomendaciones para la implementación de tecnologías emergentes

Tecnología emergente	Recomendación	Justificación
Electro Extracción	Implementar en plantas piloto para evaluar su eficiencia en el contexto colombiano	Reduce el uso de ácidos fuertes y minimiza residuos tóxicos, ideal para proyectos sostenibles
Biolixiviación	Fomentar la investigación y desarrollo para mejorar su eficiencia y aplicabilidad	Bajo impacto ambiental y potencial para ser utilizado en minería de pequeña escala
Recuperación como subproducto minería de oro	Promover la recuperación de tierras raras como subproducto de la	Maximiza el uso de recursos y reduce residuos mineros, especialmente en Antioquia

Nota. Elaborada a partir de los datos de Jordens, Cheng y Waters (2013) y Lentz (2023).

La tabla 5. *Recomendaciones para la implementación de tecnologías emergentes* traduce los hallazgos técnicos en acciones concretas, proponiendo estrategias para adoptar tecnologías emergentes en el contexto colombiano. Destacan tres recomendaciones clave: la implementación piloto de electroextracción para validar su eficiencia en minerales locales, el impulso a la investigación en biolixiviación para superar sus limitaciones operativas, y la promoción de la recuperación de REE como subproductos de la minería aurífera. Cada propuesta incluye una

justificación técnica y socioambiental, enfatizando cómo estas innovaciones pueden transformar pasivos mineros en recursos estratégicos, al tiempo que se avanza hacia una industria más circular y resiliente. Juntas, estas tablas conforman un marco analítico integral para la toma de decisiones en el sector minero nacional.

Traduce los hallazgos técnicos en acciones concretas, proponiendo estrategias para adoptar tecnologías emergentes en el contexto colombiano. Destacan tres recomendaciones clave: la implementación piloto de electroextracción para validar su eficiencia en minerales locales, el impulso a la investigación en biolixiviación para superar sus limitaciones operativas, y la promoción de la recuperación de REE como subproductos de la minería aurífera. Cada propuesta incluye una justificación técnica y socioambiental, enfatizando cómo estas innovaciones pueden transformar pasivos mineros en recursos estratégicos, al tiempo que se avanza hacia una industria más circular y resiliente. Juntas, estas tablas conforman un marco analítico integral para la toma de decisiones en el sector minero nacional.

5. Conclusiones

El análisis comparado de las tecnologías tradicionales y emergentes para el tratamiento de tierras raras en Colombia permite concluir que existe indudablemente un gran potencial para convertir los pasivos mineros en activos estratégicos para el país (sobre todo en el caso de Antioquia), estableciendo a su vez que las tecnologías tradicionales (lixiviación ácida y extracción por disolventes) se caracterizan por una elevada eficiencia en la recuperación de los REE, pero a

su vez generan problemas ambientales para lo cual requieren ser utilizadas bajo condiciones de estrictos controles y sistemas de manejo sostenible, mientras que las tecnologías emergentes (electro-extracción y biolixiviación) suponen rutas de trabajo atractivas para la minería más limpia y responsable, pero con menor impacto ambiental así como deseables en la medida que se adapten a contextos concretos del país.

Colombia puede convertirse en un referente global si une la fuerza de los procesos hidro metalúrgicos, que han demostrado recuperaciones con eficiencia altas y permiten reconvertir más de la mitad de los relaves en productos útiles, con la adaptabilidad que proporciona la biolixiviación, capaz de extraer tierras raras en zonas sensibles sin los impactos de los químicos convencionales. Si probamos estas ideas en plantas pequeñas y hacemos que trabajen juntos los centros de estudio, el gobierno y las empresas, el país no solo usará mejor sus minerales, sino que también venderá más concentrados de lantano, lutecio, itrio y torio, reforzando su posición en cadenas de suministro estratégicas, asegurando una minería que cuida el planeta y responde a lo que pide el mundo con responsabilidad ambiental y social.

Colombia presenta un considerable potencial para el impulso de una industria de tierras raras más sostenible especialmente a partir de la recuperación de REE como subproductos en zonas auríferas como la Antioqueña, de modo tal que se podría reducir un 60% de los relaves mineros que se destinan a acopio final (lo cual se evidencia con el modelo de aprovechamiento integral propuesto por este trabajo), situación que convertiría pasivos medioambientales en recursos estratégicos, alineándose así la industria nacional con los principios de economía circular y la transición energética global, al igual que fortalecería la independencia tecnológica del país frente a mercados muy concentrados como el de China.

6. Recomendaciones

Se recomienda continuar con las tecnologías específicas desde el punto de vista ambiental y económico, de esta manera con respecto a las tecnologías emergentes como la electroextracción se recomienda implementar plantas piloto en regiones con infraestructura energética (ej. Antioquia), con la biolixiviación fortalecimiento de investigaciones en universidades institutos minero-metalúrgicos, promover normas que incentiven la recuperación de REE en minería de oro y relaves.

Referencias Bibliográficas

- Correa, O., & Inés, L. (2022). *Estudio de recuperabilidad y calidad de minerales de tierras raras como subproducto de la minería aluvial de oro*. Universidad Nacional de Colombia.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., Ratnayake, N., & Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
- Dutta, T., Kim, K.-H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B.-H., Deep, A., & Yun, S.-T. (2016). Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*, 150, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.052>
- Echeverry-Vargas, L., & Ocampo-Carmona, L. M. (2022). Recovery of Rare Earth Elements from Mining Tailings: A Case Study for Generating Wealth from Waste. *Minerals*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/min12080948>
- Henao Restrepo, J. (2019). *Identificación de elementos de tierras raras en carbones colombianos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76680>
- Hensel, N. D. (2011). Economic Challenges in the Clean Energy Supply Chain: The Market for Rare Earth Minerals and Other Critical Inputs. *Business Economics*, 46(3), 171-184. <https://doi.org/10.1057/be.2011.17>

- Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>
- Londoño, B., & Andres, J. (2022). *Estudio conceptual con simulación geoestadística para valorar blancos de exploración de elementos de tierras raras.*
- Olarte, V., & Augusto, Á. (2018). *Mineralogía de elementos de tierras raras en las mineralizaciones esmeraldíferas colombianas.*
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental Una introducción a los Impactos y su Remediación.* www.flickr.com/photos/svensson/4830482182/
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., & Sand, W. (2003). Bioleaching review part A: *Applied Microbiology And Biotechnology*, 63(3), 239-248. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1448-7>