



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

Universidad San Sebastián

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Ingeniería Civil de Minas

“Nanopartículas de tierras raras en la gran minería de Chile”

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Minas

Profesor Guía: Roberto Acevedo, PhD

Alumno: Araceli Rodríguez

Concepción, Chile

2024

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por dar toda su vida, su futuro y energía por nosotros sus hijos. Por la imbatible creencia en que podemos ser grandes y diferentes.

A todos los amigos que durante años me acompañaron. Y a aquellos que, aunque los haya encontrados estos últimos años, me trataron como si hace mucho ya fuera parte de ustedes. A todos aquellos que me abrieron las puertas de sus casas y siempre me recibieron. Espero que mantengamos el contacto y devolverles lo que me han dado.

A todos aquellos profesores que se cruzaron a en mi formación, sobre todo a quienes se dieron el tiempo de conversar y aconsejarme fuera de la sala de clases, de recibirme en su oficina, de invitarme a un café, de mostrarme su trabajo y permitirme acercarme a su persona. A los que respondieron a mi curiosidad y la alimentaron. A los que vieron algún potencial el mí y desean que lo pueda utilizar. A todos los que me dieron el espacio y me escucharon. A todos los que buscaron darme oportunidades. Espero que cada segundo que me dieron pueda ser una inversión, lograr ser una persona integra, hábil y consciente. Un aporte al mundo.

Agradezco al profesor Roberto Acevedo Llanos por su paciencia, su inquebrantable insistencia y creencia en que puedo salir adelante. Por su compañía permanente y eterna.

Agradezco al profesor Cristian Cortes Quinzacara, por encontrarme entre el tumulto, acercarse y redireccionar el camino de mi vida. Por sentar las bases de lo que hoy soy y lo que seré.

Indice

I.	Introducción	5
II.	Marco teórico	7
	Tierras raras: concepto y clasificación	7
	Aplicaciones generales *	9
	Propiedades físicas y químicas *	11
	Contexto General del Tema	14
	Importancia económica y estratégica *	16
III.	Propiedades específicas de las tierras raras a nivel macro y nanométrico	16
IV.	Situación Actual de las Tierras Raras en Chile ***	20
	Reservas y minas de tierras raras en Chile y a nivel global	21
	Relevancia y desafíos en la minería chilena	22
V.	Nanopartículas de tierras raras	24
	Definición y propiedades de las nanopartículas	24
	Nanopartículas de tierras raras	29
	Producción y procesos de fabricación de NPs-REEs	29
	Métodos de Síntesis	29
	Propiedades de las nanopartículas de tierras raras	32
	Propiedades Ópticas	32
	Propiedades Magnéticas	32
	Propiedades Estructurales y Mecánicas	33
	Propiedades Catalíticas	34
VI.	Aplicaciones y usos de las nanopartículas de tierras raras	36
	Aplicaciones en diversas industrias	36
	Remediación Ambiental	36
	Medicina	39
	Electrónica	40
	Energía	42
	Agricultura y Alimentación	43
	Catalizadores y Procesos Industriales	44
	Defensa y Espacio	44
	Tecnología Cuántica	46
	Aplicaciones en Iluminación y Refrigeración Óptica	47

Aplicaciones específicas de las nanopartículas de tierras raras en la minería	49
VII. Impacto de las Nanopartículas de Tierras Raras en la Minería Chilena	51
Uso en procesos de beneficio y mejora en extracción y procesamiento	51
Eficiencia en los procesos mineros en Chile	51
Impacto medioambiental y remediación	52
VIII. Ventajas, Desventajas y Desafíos de las Nanopartículas en la Minería	53
Ventajas de las nanopartículas de tierras raras en procesos mineros	53
Desafíos específicos en la minería chilena	55
Impacto ambiental	55
Complejidad geológica	57
Costos económicos	58
Regulación y políticas	60
Dependencia del mercado	61
Reciclaje y sostenibilidad	62
Desventajas de las nanopartículas de tierras raras en procesos mineros	63
IX. Consideraciones de Seguridad y Regulación	65
Políticas y regulaciones en Chile y a nivel global	65
Normativas específicas para la gestión de las nanopartículas de tierras raras	65
X. Perspectivas futuras y conclusiones	68
Potencialidades y limitaciones futuras de las NPs-REEs en minería	68
Resumen de hallazgos y sugerencias para futuras investigaciones	71
Referencias	73

I. Introducción

La minería en Chile ha sido históricamente un pilar fundamental de su economía, con recursos como el cobre, el litio y el oro dominando las exportaciones. Sin embargo, la investigación en tierras raras (TRs) ha adquirido una relevancia creciente en las últimas décadas, especialmente por sus aplicaciones tecnológicas avanzadas. A pesar de su relativa abundancia en la corteza terrestre, la extracción y procesamiento de estos elementos es sumamente complejo debido a su distribución geológica dispersa y su concentración en pocos países, principalmente China. Este panorama geopolítico genera preocupaciones por la estabilidad en el suministro, lo que hace que las tierras raras sean consideradas un recurso estratégico.

La demanda global de tierras raras ha experimentado un aumento significativo, impulsada por sectores como la electrónica, las energías renovables, la defensa y la medicina. Estos elementos son cruciales en la fabricación de dispositivos electrónicos, motores eléctricos de vehículos, sistemas de energía renovable y equipos de alta tecnología. Chile, conocido por su infraestructura minera avanzada y su producción de litio y cobre, comienza a explorar su potencial en la explotación de tierras raras, específicamente en la región de Atacama y en depósitos de arcillas iónicas en el Biobío. La transición hacia la minería de tierras raras representa una oportunidad para diversificar su matriz productiva y posicionarse como proveedor clave en mercados emergentes.

Las nanopartículas de tierras raras (NTRs) son partículas extremadamente pequeñas, con un tamaño en el rango de los nanómetros, que presentan propiedades únicas en comparación con sus contrapartes macroscópicas. Esta escala nanométrica mejora su reactividad química, propiedades ópticas y magnéticas, lo que las convierte en materiales clave para diversas aplicaciones industriales y científicas. Las NTRs han demostrado ser eficaces en procesos de fotocatalisis, sensores, y la mejora de reacciones químicas. Además, su alta relación superficie-volumen las hace especialmente útiles en procesos mineros, donde pueden optimizar la extracción de metales valiosos y la recuperación de recursos.

En el contexto de la minería chilena, las NTRs tienen el potencial de transformar varios procesos, como la flotación y la lixiviación, al mejorar la eficiencia de la recuperación de minerales y reducir el consumo de reactivos químicos. Su capacidad para catalizar reacciones clave en la extracción de metales refractarios ha mostrado resultados prometedores, lo que podría mejorar la rentabilidad de la minería chilena y reducir su

huella ambiental. Las NTRs también se utilizan en la remediación de sitios contaminados, mejorando la gestión de relaves y la captura de metales pesados.

Sin embargo, la implementación de estas nanopartículas en la minería enfrenta varios desafíos. A pesar de sus ventajas operativas, como la mejora de la eficiencia de los procesos mineros y la reducción de los costos, existen preocupaciones sobre su toxicidad, tanto a nivel ambiental como para la salud de los trabajadores. A nivel global, la regulación de los nanomateriales es aún incipiente, lo que plantea desafíos para su manejo seguro y la disposición adecuada de los residuos. En este sentido, Chile necesita desarrollar marcos regulatorios específicos para el uso de NTRs, asegurando la protección ambiental y el bienestar de las comunidades cercanas a las operaciones mineras.

Las perspectivas futuras de las NTRs en la minería son prometedoras, pero para su implementación masiva es necesario superar barreras tecnológicas y regulatorias. A medida que la demanda de tierras raras sigue creciendo, la minería chilena tiene la oportunidad de aprovechar esta tendencia global, adoptando tecnologías innovadoras que mejoren la eficiencia y la sostenibilidad de sus operaciones. Sin embargo, será fundamental seguir investigando sobre los impactos a largo plazo de estos materiales a escala nanométrica, así como fomentar la cooperación internacional en la regulación y desarrollo de estas tecnologías.

II. Marco teórico

Tierras raras: concepto y clasificación

Los elementos de tierras raras (ETRs) pertenecen al grupo 3 de la tabla periódica. Incluyen al escandio (Sc, número atómico 21), el itrio (Y, 39) y los lantánidos: lantano (La, 57), cerio (Ce, 58), praseodimio (Pr, 59), neodimio (Nd, 60), prometio (Pm, 61), samario (Sm, 62), europio (Eu, 63), gadolinio (Gd, 64), terbio (Tb, 65), disprosio (Dy, 66), holmio (Ho, 67), erbio (Er, 68), tulio (Tm, 69), iterbio (Yb, 70) y lutecio (Lu, 71). El Pm no suele ser considerado ya que no suele encontrarse en la naturaleza (Neil G. Connelly 2005). Suelen ser denominados “vitaminas” dado sus cualidades exclusivas y que solo se requiere una pequeña dosis de ellos para incrementar considerablemente el rendimiento de diversos productos (Golev et al. 2014).

Los ETRs son elementos metálicos químicamente similares, pueden subclasificarse en 2 o 3, considerando su tamaño iónico, masa atómica propiedades electrónicas, comportamiento químico y geológico y abundancia natural. Esta subclasificación es útil dado las diferencias significativas en las propiedades físicas, químicas y geológicas de las ETRs, que afectan su extracción, procesamiento y aplicaciones. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) clasifica de La a Gd como tierras raras ligeras (LREEs) y de Tb a Lu, junto con el itrio, como tierras raras pesadas (HREEs). Por otro lado, Kingsnorth y otros autores agregan una clase intermedia de tierras raras (MREEs), usando de La a Nd como LREEs, de Pm a Gd como MREEs, y de Tb a Lu más el Y como HREEs (British Geological Survey 2011).

El término “tierras raras” no es representativo en el sentido de su abundancia geológica. Fue acuñado en su momento dado lo poco comunes que eran los minerales desde los que se les aislaba. Los elementos son relativamente abundantes en la corteza terrestre. Tienen una abundancia crustal total de 9.2 ppm. Individualmente varía mucho, desde 43ppm (Ce) a 0.28ppm (Tm). Elementos relevantes como el cobre tienen una abundancia crustal de 27ppm (British Geological Survey 2011).

Son considerados metales críticos dado que son altamente relevantes en aplicaciones industriales de rápido crecimiento (Krishnamurthy 2016) y se carece de otras materias primas que sean aplicable a las tecnologías modernas (Golev et al. 2014). Existen alrededor de 200 minerales que contiene estos elementos, pero la mayoría no están en una concentración que permita una extracción económicamente rentable. El 95% de los REE totales se encuentran en los tres minerales bastnasita [(Ce,La)CO₃F], monazita [(Ce,La)PO₄] y xenotima (YPO₄), de origen magmático o magmático hidrotermal. (Ram et al. 2019) y la producción conocida hasta el 2014 viene principalmente de éstas junto

a la loparita [(Ce,Na,Ca)(Ti,Nb)O₃], apatita [(Ca,ETR,Sr,Na,K)₃Ca₂(PO₄)₃(F,OH)] y arcillas de adsorción iónica (Golev et al. 2014b)

Las tierras raras pueden ser encontradas en arcillas de adsorción iónica (AAI). Son minerales arcillosos aluminosilicatos que se formaron por meteorización laterítica in-situ de rocas hospedadoras ricas en ETR. A pesar de tener contenidos bajos de ETR las AAI son fuentes económicamente rentables debido a su proceso de extracción hidrometalúrgico sencillo, pudiendo ser recuperados mediante intercambio catiónico con soluciones salinas monovalentes que permiten un diseño de proceso más simple y de menor costo operativo a diferencia de con minerales magmáticos e hidrotermales de mayor calidad. Estos requieren minería a gran escala, sus procesos de beneficio de mineral consumen mucha energía y requieren tratamiento adicional. Por otro lado, los minerales fosfatados como la monazita y la apatita presentan un desafío debido a su alto contenido de elementos radiactivos como el uranio y el torio, lo que obliga a realizar un proceso de separación extra durante el tratamiento del mineral, generando desechos radiactivos y aumentando costos, sin considerar las implicaciones sociales asociadas. Negativamente hablando, las IAC pueden necesitar extensas áreas para su procesamiento, dado que la lixiviación in-situ de estos minerales contamina el agua subterránea (Burcher-Jones et al. 2018; Moldoveanu and Papangelakis 2012).

Elemento	Simbolo	Número atómico	Peso atómico	Densidad (gcm ³)	Punto de fusión (°C)	Dureza de Vickers
Escandio	Sc	21	44.95	2.989	1541	85
Itrio	Y	39	88.9	4.469	1522	38
Lantano	La	57	138.9	6.146	918	37
Cerio	Ce	58	140.11	8.16	798	24
Praseodimio	Pr	59	140.9	6.773	931	37
Neodimio	Nd	60	144.24	7.008	1021	35
Prometio	Pr	61	145	7.264	1042	-
Samario	Sm	62	150.36	7.52	1074	45
Europio	Eu	63	151.96	5.244	822	17
Gadolinio	Gd	64	157.25	7.901	1313	57
Terbio	Tb	65	158.92	8.23	1356	46
Disprosio	Dy	66	162.5	8.551	1412	42
Holmio	Ho	67	164.93	8.795	1474	42
Erbio	Er	68	167.26	9.066	1529	44
Tulio	Tm	69	168.93	9.321	1545	48
Ytterbio	Yb	70	173.04	6.966	819	21
Lutecio	Lu	71	174.97	9.841	1663	77

Tabla 1: Algunas propiedades de los ETR (Gupta and Krishnamurthy 2005)

En cual sea el caso, la separación de estos metales ha sido compleja dado su similitud química hace se sustituyan entre sí fácilmente, dificultando su refinación y por lo que solo para el siglo XX se les tenía a todos identificados (British Geological Survey 2011).

Mineral	Formula	REO% aproximado
Aesquinita-(Ce)	(Ce,Ca,Fe,Th)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆ .	32
Alianita-(Ce)	(Ce,Ca,Y) ₂ (Al,Fe ³⁺) ₃ (SiO ₄) ₃ OH.	38
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	19
Bastnäsita-(Ce)	(Ce,La)(CO ₃)F	75
Brannerita	(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe) ₂ O ₆	9
Britolita-(Ce)	(Ce,Ca) ₅ (SiO ₄ ,PO ₄) ₃ (OH,F)	32
Eudialita	Na ₄ (Ca,Ce) ₂ (Fe ²⁺ ,Mn,Y) ZrSi ₈ O ₂₂ (OH,Cl) ₂ (?).	9
Euxenita-(Y)	(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	24
Fergusonita-(Ce)	(Ce,La,Nd)NbO ₄	53
Gadolinita-(Ce)	(Ce,La,Nd,Y) ₂ Fe ₂ +Be ₂ Si ₂ O ₁₀ .	60
Kainosita-(Y)	Ca ₂ (Y,Ce) ₂ Si ₄ O ₁₂ CO ₃ .H ₂ O.	38
Loparita	(Ce,La,Na,Ca,Sr)(Ti,Nb) ₃ O ₃	30
Monazita-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄	65
Parisita-(Ce)	Ca(Ce,La) ₂ (CO ₃) ₃ F ₂ .	61
Xenotima	YPO ₄ .	61
Ytrocercita	(Ca,Ce,Y,La)F ₃ .nH ₂ O.	53
Huanghoita-(Ce)	BaCe(CO ₃) ₂ F.	39
Cebaíta-(Ce)	Ba ₃ Ce ₂ (CO ₃) ₅ F ₂ .	32
Florencita-(Ce)	CeAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆ .	32
Sinquicita-(Ce)	Ca(Ce,La)(CO ₃) ₂ F.	51
Samarsquita-(Y)	(Y,Ce,U,Fe ³⁺) ₃ (Nb,Ta,Ti) ₅ O ₁₆ .	24
Knopita	(CaTi,Ce ₂)O ₃	na

Tabla 2 algunos minerales que contienen ETRs (British Geological Survey 2011)

Aplicaciones generales

Las tierras raras tienen aplicaciones clave en diversas industrias debido a sus propiedades únicas. Entre las LREEs, destacan el cerio (Ce) y el lantano (La), que se utilizan ampliamente en catalizadores automotrices y en la fabricación de vidrios ópticos. El cerio también se emplea como agente pulidor en la industria del vidrio. En cuanto a las (MREEs), el samario (Sm) y el gadolinio (Gd) son fundamentales en la producción de imanes permanentes de alta potencia, utilizados en motores eléctricos y dispositivos de energía renovable, así como en aplicaciones médicas como la resonancia magnética. Las HREEs, como el disprosio (Dy) y el terbio (Tb), son esenciales en la producción de imanes de alto rendimiento para vehículos eléctricos y aerogeneradores, debido a su capacidad para mantener el magnetismo a altas temperaturas. Elementos como el holmio (Ho) y el erbio (Er), aunque menos comunes,

se están empleando en tecnologías avanzadas de láser y telecomunicaciones. Elementos como el tulio (Tm) y el lutecio (Lu), que son de los menos utilizados, están encontrando aplicaciones emergentes en dispositivos médicos y tecnología nuclear. El Gadolinio (Gd) es utilizado principalmente en la resonancia magnética, el cerio (Ce) tiene aplicaciones emergentes en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas y en biomedicina debido a su capacidad para neutralizar especies reactivas de oxígeno. Esta variedad de usos refleja la importancia estratégica de los ETRs en sectores tecnológicos y energéticos.

Los ETRs son fundamentales para el desarrollo y la innovación en múltiples sectores. Los imanes de alta potencia son cruciales para los generadores eólicos y motores de vehículos eléctricos, impulsando la transición hacia energías limpias y sostenibles. Avances en la tecnología médica son posibles gracias a las propiedades magnéticas y ópticas de estos mismos elementos. En la tecnología digital y de comunicaciones mejoran la eficiencia y calidad de pantallas LED y equipos ópticos. Estos elementos están siendo actualmente estudiados y se continúan encontrando nuevas aplicaciones, dejando claro que son elementos relevantes en la evolución tecnológica.

A continuación, se detallan algunas de las aplicaciones (Gupta and Krishnamurthy 2005).

Table 1 List of (Selected) REE Applications			
La	<ul style="list-style-type: none"> Nickel metal hydride batteries (Prius, forklifts) Hydrogen storage alloys LaNi_3 Alloying agent Sputtering targets Optical lenses Host for phosphors Petroleum fluid catalytic cracking (FCC) Cathode material in solid oxide fuel cell 	Dy	<ul style="list-style-type: none"> Additive to $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ permanent magnets to improve high-temperature performance, increase coercivity Phosphors Nuclear industry—radiation shielding
Ce	<ul style="list-style-type: none"> Catalyst for automotive three-way-emission catalysts Petroleum fluid catalytic cracking (FCC) Glass additives Decolorizer, opacifier Ultraviolet light absorption Polishing media for glass, lenses, semiconductors Phosphors 	Ho	<ul style="list-style-type: none"> Research Metal halide lamps YIG (yttrium-iron-garnet) lasers YAG and YLF solid-state lasers
Pr	<ul style="list-style-type: none"> Additive to $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Pr-stabilized ZrO_2 Coloring agents Glass blower's and welder's goggles (with Nd) Telecommunication systems as dopant in fluoride fibers 	Er	<ul style="list-style-type: none"> Fiber optics—signal amplifiers Lasers (mainly medical/surgical and dental use) Coloring agent
Nd	<ul style="list-style-type: none"> $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ permanent magnets Alloying agent for Mg alloys Lasers Metal halide lamps Nd-stabilized ZrO_2 synthetic gems 	Tm	<ul style="list-style-type: none"> X-ray intensifying screens Metal halide lamps Research
Sm	<ul style="list-style-type: none"> SmCo permanent magnets Coloring agent Phosphors Nuclear industry—radiation shielding 	Yb	<ul style="list-style-type: none"> Optical lenses Pressure sensors (metal) Research
Eu	<ul style="list-style-type: none"> Phosphors (red colors) Nuclear industry—radiation shielding 	Lu	<ul style="list-style-type: none"> Research Host for scintillator detectors and X-ray phosphors
Gd	<ul style="list-style-type: none"> Host for phosphors Magnetic resonance imaging contrast agents Nuclear fuel rod addition, safety X-ray intensifying screen Laser YGG (yttrium-gadolinium-garnet) 	Sc	<ul style="list-style-type: none"> High-performance alloys Lasers Phosphors Ceramics
Tb	<ul style="list-style-type: none"> Phosphors (green) X-ray intensifying screens Terfenol-D (Tb_xDy_y)Fe_2 Magneto-restrictive alloy 	Y	<ul style="list-style-type: none"> Host for phosphors YAG laser host material Y-stabilized ZrO_2 YIG (yttrium-iron-garnet)—communications, radars, phase shifters YBa_2CuO_2 high-temperature superconductor Alloying agent

*Note: This list is not all-inclusive.
Source: Gschneidner (2011) and Gupta and Krishnamurthy (2005).*

Tabla 3: algunas aplicaciones para los ETRs

Propiedades físicas y químicas

Existe interés por el estudio de las NTRs dado sus particulares y únicas propiedades cuánticas. Las condiciones actuales exigen avances tecnológicos que permitan solucionar problemas en variedad de ámbitos, lo que hace necesaria la investigación de herramientas como estas y su aplicabilidad.

Propiedades químicas

Las tierras raras exhiben un comportamiento químico caracterizado por su alta reactividad, que aumenta con la reducción de su peso atómico. En condiciones normales, estos elementos reaccionan rápidamente con el oxígeno para formar óxidos estables, como CeO_2 y La_2O_3 , que son altamente refractarios. El estado de oxidación predominante es +3, pero algunos elementos, como el cerio, pueden alcanzar el estado +4 debido a la estabilización adicional que ofrece su configuración electrónica (Ce^{4+}): $[Xe]4f^0$)

La química acuosa de las tierras raras está dominada por su alta afinidad por los ligandos aniónicos, formando complejos estables con carbonatos, fosfatos y fluoruros. Estos compuestos tienen aplicaciones en tecnologías ópticas y catalíticas avanzadas. Por ejemplo, los fluoruros de lantánidos como LaF_3 tienen índices de refracción bajos y alta transparencia, lo que los hace útiles en ópticas avanzadas y celdas de combustible (Cotton 2006).

Las tierras raras son altamente reactivas frente al agua y los ácidos, lo que da lugar a la formación de hidróxidos e hidrógeno molecular. Esta propiedad es particularmente relevante en procesos industriales de refinación y síntesis de compuestos químicos. La ecuación general para esta reacción es: $2Ln + 6H_2O \rightarrow 2Ln(OH)_3 + 3H_2$, Donde Ln representa cualquier elemento de la serie lantánida.

Otro aspecto químico relevante es su capacidad para formar compuestos intermetálicos con otros metales de transición. Estas aleaciones son fundamentales en aplicaciones tecnológicas debido a sus propiedades magnéticas, térmicas y eléctricas. Por ejemplo, las aleaciones de neodimio-hierro-boro $Nd_2Fe_{14}B$ se emplean en la fabricación de imanes permanentes de alta resistencia (Jean-Claude G. Bunzli and Vitalij K. Pecharsky 2019).

Los ETRs también exhiben una química compleja en su interacción con halógenos, formando compuestos estables como cloruros ($LnCl_3$) y bromuros ($LnBr_3$). Estos compuestos tienen propiedades higroscópicas y se utilizan en síntesis orgánicas avanzadas y en la producción de catalizadores.

Propiedades físicas

Apariencia y estabilidad superficial

Los metales de tierras raras tienen un brillo metálico plateado o grisáceo en su estado puro. Esta apariencia se debe a la reflexión de la luz por su superficie, un comportamiento característico de los metales con estructuras cristalinas compactas. Sin embargo, estos elementos son altamente reactivos en

condiciones ambientales normales y tienden a formar una capa de óxido al estar expuestos al aire. Esta pasivación superficial varía entre los diferentes elementos y está relacionada con la energía de enlace de los óxidos formados, siendo los óxidos de cerio (CeO_2) y lantano (La_2O_3) como se nombró anteriormente, particularmente estables (Cotton 2006).

Densidad y puntos de fusión

La densidad de las tierras raras aumenta sistemáticamente desde el lantano (6.16 g/cm^3) hasta el lutecio (9.84 g/cm^3), un fenómeno conocido como contracción lantánida. Este efecto ocurre debido al incremento de la carga nuclear efectiva a lo largo de la serie, lo que reduce el tamaño atómico y aumenta la densidad. Asimismo, sus puntos de fusión y ebullición son elevados en comparación con muchos otros elementos metálicos, debido a la fuerte interacción metálica en sus estructuras cristalinas. Por ejemplo, el lutecio tiene un punto de fusión de $1,652 \text{ }^\circ\text{C}$ y un punto de ebullición de $3,402 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el cerio funde a $798 \text{ }^\circ\text{C}$. Estas propiedades son particularmente útiles en aplicaciones de alta temperatura y en materiales refractarios (Jean-Claude G. Bunzli and Vitalij K. Pecharsky 2019).

Conductividad eléctrica

Las tierras raras presentan una conductividad eléctrica que disminuye con la temperatura, un comportamiento característico de los metales. La conductividad es influenciada por la interacción entre los electrones 4f, los cuales están parcialmente protegidos por los orbitales $5s^2$ y $5p^6$. Esto resulta en una menor movilidad electrónica en comparación con metales como el cobre o la plata. Sin embargo, su capacidad para transportar corriente de manera eficiente las hace útiles en aleaciones conductoras y dispositivos electrónicos avanzados (Gupta and Krishnamurthy 2005).

Propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas de los ETRs están determinadas principalmente por sus electrones en los orbitales 4f, que están parcialmente ocupados y protegidos por capas externas de electrones ($5s^2$ y $5p^6$). Esta configuración electrónica hace que los momentos magnéticos de estos electrones sean poco afectados por el entorno químico, pero muy influidos por las interacciones internas dentro del átomo. El momento magnético de un ion de tierras raras resulta de la combinación de su espín y su momento angular orbital, según las reglas de Hund y el acoplamiento espín-órbita. Por ejemplo, el gadolinio (Gd^{3+})

tiene un alto momento magnético debido a sus siete electrones 4f desapareados, mientras que otros como el lutecio (Lu^{3+}) son no magnéticos al tener todos sus electrones 4f apareados.

La anisotropía magnética, que describe la dependencia direccional de las propiedades magnéticas, es especialmente pronunciada en elementos como el neodimio y el samario. Esto se debe a que sus electrones 4f generan campos magnéticos altamente direccionales dentro de su entorno cristalino. Además, la mayoría de los iones de tierras raras exhiben un comportamiento paramagnético, donde los momentos magnéticos individuales se alinean temporalmente con un campo magnético externo pero no presentan orden magnético en ausencia del campo. En algunos compuestos, los iones de tierras raras pueden interactuar magnéticamente entre sí, dando lugar a comportamientos ferromagnéticos o antiferromagnéticos. Estas interacciones están influenciadas por la distancia entre los iones y las superposiciones de orbitales.

Propiedades ópticas

Las tierras raras son ampliamente reconocidas por sus excepcionales propiedades ópticas. Las transiciones electrónicas en los orbitales 4f generan espectros de emisión y absorción estrechos y definidos, lo que las hace ideales para aplicaciones como láseres, fósforos y pantallas de alta definición. Por ejemplo, el europio (Eu^{3+}) emite luz roja intensa bajo excitación UV, mientras que el terbio (Tb^{3+}) produce emisión verde brillante. Estas propiedades son fundamentales en dispositivos de iluminación y tecnología LED. La estabilidad de estas transiciones electrónicas está directamente relacionada con la protección que los electrones 4f reciben de las capas externas, lo que minimiza la influencia de interacciones externas y proporciona una emisión lumínica duradera y eficiente (Jean-Claude G. Bunzli and Vitalij K. Pecharsky 2019).

Contexto General del Tema

La minería en Chile tiene una historia que se remonta a tiempos prehispánicos, cuando los pueblos originarios extraían minerales como el cobre y el oro para la fabricación de herramientas, ornamentos y objetos ceremoniales. Con la llegada de los conquistadores españoles en el siglo XVI, se inició una explotación más intensa de los recursos minerales, particularmente la plata, que desempeñó un papel fundamental en la economía colonial. Durante esta época, los minerales extraídos en Chile

contribuyeron significativamente al comercio del Virreinato del Perú y al financiamiento del imperio español.

El siglo XIX marcó el despegue de la minería moderna en Chile con el descubrimiento de importantes yacimientos de cobre y nitratos. Este período coincidió con el auge de la minería del salitre, que convirtió a Chile en el principal exportador mundial de este recurso, utilizado como fertilizante y componente esencial en la fabricación de explosivos. Sin embargo, la introducción del salitre sintético a principios del siglo XX llevó al declive de esta industria. Paralelamente, la explotación de cobre ganó protagonismo, con la inversión de capitales extranjeros en grandes minas como Chuquicamata y El Teniente, consolidando a Chile como un actor clave en el mercado mundial del cobre.

En la segunda mitad del siglo XX, el sector minero chileno atravesó transformaciones significativas. La nacionalización del cobre en la década de 1970 representó un punto de inflexión, dando al Estado el control de los principales yacimientos y reafirmando el papel del mineral como "el sueldo de Chile". Esta medida permitió canalizar los ingresos generados por la minería hacia el desarrollo del país. Durante las últimas décadas del siglo XX y principios del XXI, las reformas económicas y la apertura al capital privado impulsaron una nueva ola de inversiones en el sector, llevando a la introducción de tecnologías avanzadas y a un aumento significativo en la producción.

Hoy en día, la minería sigue siendo el pilar de la economía chilena, representando aproximadamente el 10% del Producto Interno Bruto (PIB) y más de la mitad de las exportaciones totales del país. Chile es el principal productor mundial de cobre, aportando cerca del 30% de la oferta global, y también es un líder en la producción de otros recursos como molibdeno, litio y oro. La minería ha sido fundamental para el crecimiento económico del país, generando empleo, atrayendo inversión extranjera y financiando proyectos de infraestructura y programas sociales.

No obstante, el sector enfrenta desafíos importantes, como la sostenibilidad ambiental, el acceso a recursos hídricos y la necesidad de diversificar su matriz productiva. En respuesta, la minería chilena ha comenzado a adoptar tecnologías más limpias, como el uso de energías renovables y la optimización de procesos, para reducir su impacto ambiental. Además, la investigación y el desarrollo en áreas como la automatización y la minería subterránea están allanando el camino hacia una industria más eficiente y sostenible.

Recientemente, ha surgido el interés por explorar y explotar yacimientos de tierras raras en Chile, dada su importancia en tecnologías avanzadas y sostenibles. Estos elementos, esenciales en la fabricación de dispositivos electrónicos, energías renovables y vehículos eléctricos, también presentan un potencial significativo para el desarrollo de nanopartículas con aplicaciones industriales. La posibilidad de generar

nanopartículas de tierras raras en el país podría posicionar a Chile como un actor relevante en mercados emergentes, fomentando la innovación tecnológica y diversificando su industria minera.

Importancia económica y estratégica

A nivel económico, la demanda de tierras raras ha crecido exponencialmente, impulsada por su aplicación en sectores tecnológicos clave. Sin embargo, la producción y suministro de estos elementos están altamente concentrados en unos pocos países, siendo China el principal productor mundial, controlando aproximadamente el 70% del suministro global (Rosa Fernández 2024). Esta concentración genera preocupaciones sobre la estabilidad del suministro y la dependencia de las cadenas de valor globales. Estratégicamente, las tierras raras son fundamentales para la seguridad nacional de diversas naciones, ya que se emplean en tecnologías militares avanzadas, incluyendo sistemas de defensa y equipos de comunicación. La posición dominante de China en el mercado de tierras raras le otorga una ventaja geopolítica significativa, permitiéndole influir en los precios y el acceso a estos recursos críticos (Natalia E. Gómez Gabás 2020).

En el último tiempo Chile comienza a posicionarse como posible proveedor clave. El ministerio de Minería catastró 750 relaves en desuso con potencial para la obtención de tierras raras, principalmente en Atacama y Coquimbo. Por otro en la Región del Biobío, específicamente en la comuna de Penco, se han identificado depósitos de arcillas iónicas ricas en elementos de tierras raras. Estas arcillas no requieren el uso de explosivos ni procesos de chancado o molienda, de forma en que se reduce el impacto ambiental que se pudiese generar (Sebastián Palma 2014).

III. Propiedades específicas de las tierras raras a nivel macro y nanométrico

A escala macroscópica, las propiedades de los ETRs ya han sido detalladamente descritas en términos de su comportamiento químico, físico y aplicaciones generales, como se explicó anteriormente. En este contexto, se destacan aspectos complementarios, enfatizando sus implicaciones prácticas en aplicaciones industriales.

1.1. Magnetismo

- Como se señaló, los elementos como el neodimio y el samario poseen una alta capacidad para formar imanes permanentes con aplicaciones estratégicas en motores eléctricos y generadores eólicos. La estructura 4f de estos elementos proporciona campos magnéticos estables y potentes, fundamentales para tecnologías avanzadas.

1.2. Reactividad Química

- La alta reactividad de las tierras raras frente al oxígeno y al agua, que conduce a la formación de óxidos e hidróxidos estables, ha sido ampliamente discutida. Este comportamiento subraya su utilidad en procesos de síntesis química y refinamiento, particularmente en condiciones industriales exigentes.

1.3. Propiedades Físicas

- Las propiedades físicas como su brillo metálico, densidad elevada y resistencia a altas temperaturas son esenciales para aplicaciones estructurales en entornos extremos. Estas características, previamente descritas, hacen de las tierras raras materiales indispensables en aleaciones avanzadas y recubrimientos protectores.

1.4. Conductividad Eléctrica

- Las tierras raras presentan una conductividad eléctrica moderada, afectada por las interacciones de los electrones 4f con su entorno. Aunque su conductividad es menor en comparación con metales como el cobre, su capacidad para transportar corriente de manera eficiente en aleaciones específicas las hace ideales para aplicaciones electrónicas especializadas.

1.5. Propiedades Ópticas

- Las excepcionales propiedades ópticas de los ETRs, derivadas de sus transiciones electrónicas en los orbitales 4f, ya fueron descritas en profundidad. Su capacidad para emitir luz en espectros estrechos las posiciona como elementos clave en tecnologías LED, pantallas y láseres avanzados.

En conjunto, estas propiedades macroscópicas forman la base para el uso versátil y estratégico de las tierras raras en una variedad de sectores tecnológicos. La transición a escala nanométrica puede amplificar y diversificar estas características, abriendo nuevas fronteras para su aplicación.

2. Propiedades a Escala Nanométrica

2.1. Confinamiento Cuántico y Reactividad Superficial

- Las NTRs presentan efectos de confinamiento cuántico que alteran significativamente sus propiedades electrónicas y ópticas. Por ejemplo, los nanomateriales de europio y terbio exhiben emisiones lumínicas mejoradas y ajustables en aplicaciones de bioimagen.
- La alta relación área-volumen incrementa la reactividad superficial, favoreciendo interacciones químicas eficientes en procesos catalíticos.

2.2. Actividad Catalítica y Estados de Oxidación

- Elementos como el cerio (Ce) en forma de nanopartículas exhiben transiciones rápidas entre estados de oxidación $Ce^{(3+)}$ y $Ce^{(4+)}$, lo que potencia su aplicabilidad como catalizadores en procesos de reducción de emisiones tóxicas.
- En escala nanométrica, la afinidad por ligandos específicos se incrementa, mejorando la eficiencia en reacciones químicas complejas y en procesos de remediación ambiental.

2.3. Propiedades Magnéticas a Nivel Nano

- La anisotropía magnética y la interacción espín-órbita en nanopartículas generan comportamientos magnéticos únicos, optimizando dispositivos de almacenamiento de datos y sensores magnéticos.
- La reducción en el tamaño de las partículas puede inducir un comportamiento superparamagnético, eliminando la histéresis magnética y aumentando la aplicabilidad en terapias biomédicas como la hipertermia magnética.

2.4. Propiedades Ópticas Avanzadas

- Las NTRs permiten un control más preciso de la emisión de luz, mejorando la eficiencia cuántica en dispositivos LED y láseres.
- A escala nanométrica, los efectos de interacción con plasmones superficiales localizados amplifican la intensidad lumínica, abriendo posibilidades en aplicaciones de sensores ópticos avanzados.

2.5. Propiedades Mecánicas y Estructurales

- La nanoestructuración de tierras raras incrementa su resistencia mecánica y estabilidad térmica en comparación con sus contrapartes macroscópicas, permitiendo su incorporación en materiales compuestos de alto rendimiento.

3. Comparación entre Escalas Macro y Nano

Propiedad	Escala Macroscópica	Escala Nanométrica
Reactividad Química	Moderada, limitada configuración superficial	por Alta, por gran relación área-volumen
Propiedades Ópticas	Emisión definida y estable	Emisión mejorada y ajustable
Propiedades Magnéticas	Campo magnético estable y anisotrópico	Comportamiento superparamagnético
Aplicaciones	Imanes, catalizadores	aleaciones, Biomedicina, sensores, nanocatalizadores

IV. Situación Actual de las Tierras Raras en Chile

La situación de las tierras raras en Chile es un caso de alto potencial pero con un desarrollo incipiente. Desde 2016, el Plan Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería comenzó a incluir las tierras raras en sus análisis, identificando recursos geológicos en la Cordillera de la Costa, principalmente en las regiones de Atacama y Biobío. Sin embargo, la exploración y explotación de estos elementos críticos permanece limitada, y actualmente no existen proyectos plenamente operativos.

El proyecto más destacado es el anteriormente llamado **BioLantánidos**, actualmente “*Proyecto de Desarrollo Minero de Extracción de Arcillas para Producción de Concentrado de Tierras Raras*”, ubicado en la localidad de El Cabrito, comuna de Penco, Región del Biobío. Este es el único proyecto que contempla tanto la extracción como el procesamiento piloto de concentrados de tierras raras en Chile. A pesar de su potencial, el proyecto aún no había recibido aprobación final en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Desde 2019, estuvo bajo la administración de la empresa Hochschild, pero enfrenta obstáculos regulatorios y ambientales que limitan su avance.

Además de éste, existen tres iniciativas adicionales en la Región de Atacama, específicamente en Sierra Áspera, Cerro Carmen y Veracruz. Estas son prospecciones iniciales administradas por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) y la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). No obstante, ninguna de ellas ha progresado más allá de las etapas preliminares hasta el año 2022.

Un aspecto importante en la situación actual es el potencial de los relaves mineros para la recuperación de tierras raras. Chile cuenta con 757 tranques de relaves, de los cuales el 14 % están activos, el 63 % inactivos y el 23 % abandonados. Estos representan una fuente significativa de tierras raras, especialmente mediante la minería secundaria, la cual podría ser clave para el desarrollo de esta industria. Sin embargo, esta actividad aún enfrenta limitaciones tecnológicas, regulatorias y de inversión.

La situación actual de las tierras raras en Chile está marcada por un alto potencial económico y estratégico, pero también por numerosos desafíos que incluyen vacíos regulatorios, falta de incentivos y restricciones tecnológicas. Para avanzar en este sector, es fundamental un marco normativo adecuado que fomente la exploración, explotación y procesamiento local de estos elementos críticos (Reveco 2022).

Reservas y minas de tierras raras en Chile y a nivel global

Reservas Globales de Tierras Raras

La distribución global de las reservas de tierras raras es dominada por China, que posee más del 35% de las reservas identificadas, seguido por países como Vietnam, Brasil y Rusia (Golev et al. 2014b; Hamed, Turan, and Elsayah 2024). Según un análisis reciente, las reservas totales estimadas alcanzan los 120 millones de toneladas, distribuidas de la siguiente manera:

- **China:** 44 millones de toneladas (37%)
- **Vietnam:** 22 millones de toneladas (18%)
- **Brasil:** 21 millones de toneladas (17%)
- **Rusia:** 12 millones de toneladas (10%)
- **India, Australia y otros países:** 21 millones de toneladas (18%)

China también lidera la producción mundial, generando aproximadamente el 70% del suministro global (Henriques and Böhm 2022). Este dominio genera preocupaciones sobre la dependencia y vulnerabilidad del mercado internacional.

Reservas de Tierras Raras en Chile

En América Latina, Brasil ha sido tradicionalmente el principal poseedor de tierras raras. Sin embargo, Chile podría tener un potencial significativo aún no explotado. Estudios recientes han identificado concentraciones de tierras raras asociadas a depósitos de cobre y litio en el desierto de Atacama.

Los depósitos en salares y relaves mineros representan una fuente potencial de extracción secundaria de tierras raras. La implementación de tecnologías de recuperación podría posicionar a Chile como un actor emergente. Sin embargo, la falta de un catastro nacional actualizado limita la cuantificación de estas reservas.

Comparación y Perspectivas

Si bien Chile no figura actualmente entre los principales actores globales en tierras raras, su experiencia en la producción de cobre y litio ofrece ventajas competitivas. La utilización de relaves mineros podría ser una estrategia sostenible para entrar en el mercado global.

Por otro lado, la concentración del mercado en pocos países representa una oportunidad para que nuevos actores diversifiquen la oferta. Sugieren que la colaboración entre países productores podría fortalecer la posición de América Latina.

La distribución desigual de las reservas subraya la necesidad de estrategias regionales y nacionales para su exploración. Chile enfrenta desafíos significativos, pero también tiene una oportunidad única para diversificar su economía. Inversiones en investigación y un marco regulatorio adecuado serán claves para fomentar la exploración sostenible.

Relevancia y desafíos en la minería chilena

Siendo un sector de creciente interés a nivel global, la minería de tierras raras presenta una serie de oportunidades y desafíos para Chile debido a la relevancia estratégica de estos elementos en tecnologías avanzadas y energías renovables como se ha estado comentando. Chile, aunque no figura actualmente como un líder en la producción de tierras raras, posee un importante potencial debido a la presencia de varios de estos elementos en su territorio. Sin embargo, el desarrollo de este sector enfrenta barreras significativas, incluyendo el limitado conocimiento geológico sobre los yacimientos locales, la dependencia tecnológica de otros países y los elevados costos ambientales y sociales asociados a la explotación de estos recursos (Reboredo 2021; Zappettini 2022). Adicionalmente, la concentración de la producción global en China, que controla cerca del 95% del mercado, plantea riesgos de suministro y genera una alta vulnerabilidad geopolítica para las naciones que dependen de estos materiales (Algora Weber 2020).

Importancia Económica y Estratégica

Los ETR son vitales para la transición hacia economías bajas en carbono y para el desarrollo de tecnologías renovables, como turbinas eólicas y vehículos eléctricos, sectores que han experimentado un crecimiento exponencial en la última década. La creciente demanda global, proyectada en un aumento del 50% respecto a los niveles actuales, subraya la necesidad de diversificar la oferta y explorar nuevos yacimientos (Bil 2024). Estados Unidos, por ejemplo, ha adoptado una estrategia basada en asegurar el suministro, diversificar fuentes geográficas y fomentar el reciclaje, lo que podría servir como referencia para el desarrollo de iniciativas en Chile (Chomón Pérez 2023).

Barreras Tecnológicas y Ambientales

La minería de tierras raras enfrenta numerosos desafíos tecnológicos y ambientales. La extracción y procesamiento de estos elementos suelen involucrar reactivos químicos y generar desechos tóxicos, incluyendo elementos radiactivos como el torio y el uranio, que pueden tener impactos significativos en la salud y el medio ambiente si no se manejan adecuadamente (Valton Legrá 2021). Además, la falta de tecnologías avanzadas y la dependencia de procesos intensivos en energía limitan la competitividad de países en vías de desarrollo como Chile.

Oportunidades y Perspectivas

A pesar de los desafíos, Chile tiene una oportunidad única para posicionarse en este mercado mediante la adopción de tecnologías limpias, el fortalecimiento de capacidades locales de investigación y desarrollo, y la implementación de marcos regulatorios que promuevan la sostenibilidad (Bedoya Londoño 2022). Iniciativas como la recuperación de tierras raras desde relaves mineros y el desarrollo de aplicaciones tecnológicas de alto valor agregado podrían contribuir significativamente al desarrollo económico del país y a la mitigación de los impactos ambientales.

La minería chilena de tierras raras representa un campo de alto potencial que requiere estrategias integrales para superar las barreras existentes y maximizar sus beneficios económicos, tecnológicos y sociales. El éxito en esta área dependerá de la capacidad del país para desarrollar una minería sostenible y competitiva, alineada con las demandas globales y los objetivos de desarrollo sostenible.

V. Nanopartículas de tierras raras

Definición y propiedades de las nanopartículas

La necesidad de incrementar la eficiencia de los procesos tecnológicos en la actualidad ha estimulado el desarrollo de nuevos materiales cuyas características permitan afrontar los cada vez más exigentes requerimientos. Las nanopartículas (Nps) son partículas con dimensiones en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm). Este tamaño extremadamente pequeño les confiere propiedades únicas en comparación con sus contrapartes a escala macroscópica, debido a los efectos cuánticos y la alta proporción de átomos en su superficie. Estas propiedades derivan de la interacción de efectos físicos y químicos únicos que emergen a esta escala nanométrica, como el confinamiento cuántico, la elevada relación superficie-volumen y la modificación de las propiedades ópticas, eléctricas, térmicas y mecánicas.

Características y propiedades clave de las nanopartículas

Propiedades Físicas

Elevada Relación Superficie-Volumen: La proporción significativa de átomos en la superficie de las nanopartículas aumenta su reactividad química y capacidad de interacción con el entorno. Este efecto es crucial en aplicaciones como catalizadores y sensores, donde la superficie activa determina la eficiencia del dispositivo. Por ejemplo, las nanopartículas de oro son catalizadores efectivos en reacciones de oxidación debido a esta elevada relación (Egbuna et al. 2021) (Bhatti et al. 2022). La relación superficie-volumen puede expresarse como:

$$\text{Relación superficie - volumen} = \frac{\text{Área superficial}}{\text{Volumen}} \propto \frac{1}{r}$$

Siendo r el radio de la partícula. Al disminuir, la proporción aumenta proporcionalmente potenciando la reactividad. Una mayor superficie expuesta supone mayor cantidad de átomos disponibles para interactuar con otros. (Obaidat, Issa, and Haik 2014).

Propiedades Ópticas Específicas: Las Nps presentan fenómenos como la resonancia plasmónica de superficie, observable en nanopartículas metálicas como oro y plata. Este fenómeno ocurre cuando los electrones libres en la superficie oscilan colectivamente ante la luz incidente, generando propiedades ópticas ajustables que dependen del tamaño y la forma. Estas propiedades son

ampliamente utilizadas en bioimagen, diagnóstico médico y sensores ópticos (Joudeh and Linke 2022) (Bhatti et al. 2022). La frecuencia de resonancia plasmónica está dada por:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}}$$

Donde:

n : densidad de electrones libres,

e : carga del electrón,

m : masa efectiva del electrón,

ϵ_0 : permitividad del vacío (Egbuna et al. 2021).

Alta Estabilidad Térmica y Mecánica: Las nanopartículas presentan mayor resistencia térmica y mecánica debido a la ausencia de defectos estructurales significativos y la predominancia de efectos de superficie. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2) son altamente resistentes a temperaturas extremas, haciéndolas ideales en catalizadores automotrices y sistemas de liberación de fármacos. (Obaidat et al. 2014; Shubayev, Pisanic, and Jin 2009)

Propiedades Químicas

Reactividad Superficial: La alta energía superficial de las Nps incrementa su capacidad de reacción, permitiendo su funcionalización con diversas moléculas para aplicaciones como catálisis y liberación controlada de fármacos. (Egbuna et al. 2021; Obaidat et al. 2014)

Conductividad Térmica Personalizada: Las propiedades de conductividad térmica de las nanopartículas pueden ser manipuladas modificando su composición y estructura. En nanopartículas metálicas y semiconductoras, como las de grafeno o nanotubos de carbono, la conductividad es altamente eficiente, mientras que las nanopartículas de óxidos metálicos pueden adaptarse a aplicaciones específicas (Ealias and Saravanakumar 2017)(Bhatti et al. 2022). El flujo de calor en una nanopartícula se describe mediante la ley de Fourier:

$$q = -k\nabla T$$

Donde:

q : flujo de calor

k : conductividad térmica,

∇T : gradiente de temperatura (Obaidat et al. 2014).

Propiedades Biológicas

1. **Compatibilidad y Biocompatibilidad:** Muchas nanopartículas, como las de óxido de cerio y dióxido de titanio (TiO_2), son biocompatibles, lo que las convierte en materiales promisorios para aplicaciones médicas como la medicina regenerativa y los nanofármacos (Ealias and Saravanakumar 2017)(Obaidat et al. 2014).
2. **Propiedades Magnéticas:** Las nanopartículas magnéticas (e.g., Fe_3O_4) presentan superparamagnetismo, siendo altamente efectivas en aplicaciones biomédicas como terapia por hipertermia, resonancia magnética y separación magnética. (Issa et al. 2013; Obaidat et al. 2014)

La singularidad de las nanopartículas radica en la combinación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Por ejemplo, las Nps metálicas destacan en catálisis debido a su elevada relación superficie-volumen, mientras que las nanopartículas de carbono ofrecen ventajas en sensores y dispositivos energéticos debido a su conductividad y estabilidad (Ealias and Saravanakumar 2017) (Bhatti et al. 2022). Estas propiedades las posicionan como materiales clave en sectores como la medicina, la electrónica y la energía sostenible.

Métodos de Síntesis y Fabricación

1. **Síntesis Química:** Procesos como el método sol-gel permiten la formación de nanopartículas controlando las reacciones químicas en soluciones. Este método es ampliamente utilizado para producir óxidos metálicos como TiO_2 y ZnO , donde la variación de parámetros como la temperatura o el pH influye en el tamaño y morfología de las nanopartículas (Oskam and Poot 2006).
2. **Depósito Químico en Fase Vapor (CVD):** Utilizado para fabricar nanopartículas de alta pureza mediante reacciones químicas de precursores gaseosos sobre un sustrato. Este método es especialmente efectivo para nanopartículas metálicas y semiconductoras como Si y materiales óxidos utilizados en aplicaciones biomédicas (Zavorin et al. 2020)
3. **Métodos Físicos:** Incluyen técnicas como la molienda mecánica y ablación láser. La ablación láser, por ejemplo, es ideal para generar nanopartículas con

tamaños controlados al irradiar un material objetivo en medios líquidos o gaseosos, siendo ampliamente utilizada para nanopartículas magnéticas como Fe_3O_4 (Al-Kattan et al. 2016).

Técnicas de Caracterización

Las nanopartículas son caracterizadas utilizando diversas técnicas analíticas para determinar sus propiedades morfológicas, estructurales y funcionales. La *Microscopía Electrónica de Transmisión* (TEM) se emplea para analizar la estructura interna y la morfología a nivel atómico siendo fundamental para nanopartículas complejas como óxidos de tierras raras, mientras que la *Microscopía Electrónica de Barrido* (SEM) permite obtener imágenes tridimensionales de la superficie con alta resolución permitiendo estudiar su tamaño y dispersión. Por otro lado, la *Difracción de Rayos X* (XRD) es fundamental para determinar la estructura cristalina, especialmente en nanopartículas metálicas y cerámicas. Finalmente, las técnicas espectroscópicas como *UV-Vis* y *FTIR* son utilizadas para evaluar propiedades ópticas y funcionalización superficial, respectivamente, permitiendo detectar modificaciones químicas en la superficie de las nanopartículas (Mourdikoudis, Pallares, and Thanh 2018).

Funcionalización y Modificación Superficial

La funcionalización de las nanopartículas implica el recubrimiento o incorporación de moléculas funcionales en su superficie para aplicaciones específicas:

1. **Recubrimientos Poliméricos:** Mejora la estabilidad coloidal y biocompatibilidad, siendo esenciales en aplicaciones biomédicas como sistemas de liberación de fármacos (Rezić 2022).
2. **Dopaje con Iones Metálicos:** Aumenta propiedades catalíticas y mecánicas, como se observa en nanopartículas cerámicas utilizadas para ingeniería de tejidos y aplicaciones médicas (Parashar, Shukla, and Singh 2020).
3. **Modificación con Surfactantes:** Reduce la aglomeración y mejora la dispersión en soluciones y matrices, facilitando su uso en nanocompuestos y dispositivos avanzados.

Efectos de la Composición Química en las Propiedades

La composición química de las nanopartículas juega un papel crucial en la determinación de sus propiedades físicas, ópticas, magnéticas y catalíticas. La inclusión de metales de transición, por ejemplo, puede potenciar sus capacidades catalíticas al favorecer reacciones redox, como sucede con nanopartículas de óxido de cerio y óxido de titanio, ampliamente utilizadas en aplicaciones ambientales e

industriales (Parashar et al. 2020). En términos de propiedades ópticas, nanopartículas semiconductoras como CdSe y CdS muestran efectos de confinamiento cuántico, donde la reducción de tamaño altera la banda de energía, generando colores específicos dependientes del tamaño de la partícula (Biju et al. 2008a; Mathew et al. 2012).

Las propiedades magnéticas también se ven afectadas por la composición. Por ejemplo, nanopartículas de Fe_3O_4 exhiben superparamagnetismo, una propiedad que emerge cuando su tamaño disminuye por debajo de un umbral crítico, eliminando el comportamiento magnético permanente y permitiendo su uso en aplicaciones biomédicas como resonancia magnética y terapia por hipertermia (Arbab 2011; Lu, Salabas, and Schüth 2007).

Además, la integración de nanopartículas metálicas como el oro o la plata en matrices dieléctricas modifica sus propiedades eléctricas y térmicas, haciéndolas aptas para aplicaciones en dispositivos electrónicos y en procesos de conductividad mejorada. En general, la manipulación de la composición química permite ajustar las propiedades de las nanopartículas para cumplir con requisitos específicos en diversas aplicaciones industriales, científicas y tecnológicas (Biju et al. 2008b).

La composición química, en conjunto con el tamaño y forma, permite personalizar las propiedades de las nanopartículas para aplicaciones específicas, posicionándolas como materiales clave en sectores industriales y científicos.

Nanopartículas de tierras raras

Las nanopartículas de tierras raras destacan por sus propiedades químicas y morfológicas únicas, que les confieren características físico-mecánicas, conductivas, térmicas, magnéticas, fotónicas y ópticas excepcionales, inalcanzables en su estado macroscópico. Estas propiedades hacen que las partículas a nanoescala sean de gran interés para diversas industrias, incluyendo electrónica, fotónica, biomedicina, biomas, nanomateriales, nanocompuestos, nanocatálisis y transferencia de energía a nivel nanométrico. La aplicación de nanopartículas varía según el tipo y tamaño requerido por cada industria, siendo estas adaptaciones cruciales para satisfacer las necesidades específicas de cada sector.

Las NTRs representan una innovadora solución para enfrentar los problemas de lixiviación en yacimientos mineros, gracias a su capacidad para recuperar valores atrapados en la superficie de las especies minerales primarias y afectar las especies potencialmente acidificantes. Las nanopartículas de óxidos de hierro, por ejemplo, ofrecen un avance significativo en el tiempo de operación para liberar ácidos y metales, acelerando el proceso de lixiviación en comparación con los métodos convencionales. Su alta energía de superficie, resultado de su interacción con el dióxido de carbono, permite una adhesión efectiva, lo que se traduce en un método más eficiente para la liberación de ácidos y metales sin necesidad de nuevas instalaciones, sino simplemente mediante la mezcla, bombeo y descarga de las nanopartículas en el yacimiento. Este enfoque innovador promete reducir los impactos ambientales asociados con la lixiviación de minerales (Escudero et al. 2017a).

Producción y procesos de fabricación de nanopartículas de tierras raras

Métodos de Síntesis

1. Síntesis Controlada por Forma

La introducción de metales de tierras raras, como el gadolinio, permite un control significativo sobre la morfología de las nanopartículas de óxidos metálicos. Mediante la unión selectiva de gadolinio a facetas específicas de las nanopartículas en crecimiento, es posible transformar su forma de esférica a cúbica. Este proceso mejora las

propiedades magnéticas y permite aplicaciones avanzadas en el diseño de materiales funcionales. Este mecanismo ha sido particularmente útil en la producción de nanocubos de óxido de hierro con propiedades ópticas y magnéticas superiores (Song et al. 2017).

2. Precursores de Hidróxidos de Tierras Raras

Utilizar hidróxidos de tierras raras como precursores permite la síntesis controlada de nanopartículas de $(\text{Y})\text{-NaYF}_4$ con una precisión notable en tamaño y forma. Este método económico y ambientalmente amigable evita el uso de compuestos más costosos y reduce las emisiones tóxicas durante el proceso. Las nanopartículas obtenidas tienen una intensidad de luminiscencia mejorada, lo que las hace ideales para aplicaciones en bioimágenes y sensores ópticos (Xu et al. 2019).

3. Coprecipitación Química

Este método se destaca por su capacidad para producir nanopulvos homogéneos de silicato de tierras raras con alta entropía, permitiendo una mezcla uniforme de elementos en una sola matriz. Esta técnica es fundamental para aplicaciones en las que la uniformidad de la composición afecta directamente las propiedades ópticas y catalíticas. Además, la simplicidad de este proceso lo convierte en una opción viable para la producción en grandes volúmenes (Guricová et al. 2019; H. Yu et al. 2022). (Wei et al. 2024)

4. Síntesis Asistida por Microondas

La utilización de microondas para asistir el proceso solvotérmico permite reducir drásticamente los tiempos de reacción, garantizando al mismo tiempo un control preciso sobre las condiciones de síntesis. Este enfoque ha resultado en la producción de micropartículas de LiYF_4 dopadas con tierras raras, destacadas por su morfología definida y sus emisiones ópticas altamente reproducibles, útiles en aplicaciones biomédicas (Panov, Marin, and Hemmer 2018)

5. Conversión Láser de MOFs

La conversión de marcos organometálicos (MOFs) mediante irradiación láser es un método innovador para producir nanopartículas de óxidos metálicos de tierras raras con tamaños y estructuras cristalinas altamente controlados. Este enfoque ha permitido la síntesis de

nanopartículas de Tb₂O₃ en fases cúbica y monoclinica, optimizadas para su uso en reacciones catalíticas avanzadas y otros procesos industriales (Dou et al. 2022).

6. Estrategias de Ensamblaje de Mesoporosidad

La introducción de canales mesoporosos en nanopartículas de tierras raras mejora significativamente su rendimiento al aumentar el acceso a los sitios activos y la capacidad de carga. Este diseño estructural es particularmente beneficioso en catalizadores y portadores de fármacos, permitiendo una funcionalidad mejorada en aplicaciones biomédicas y químicas (H. Yu et al. 2022).

7. Uso de Líquidos Iónicos

Los líquidos iónicos han emergido como una alternativa prometedora a los solventes orgánicos peligrosos para la síntesis de nanofluoruros de tierras raras. Estos compuestos facilitan la producción de nanopartículas de alta pureza y cristalinidad, optimizadas para aplicaciones ópticas como la conversión ascendente de energía lumínica. Además, este método es compatible con procesos a gran escala, mejorando su viabilidad industrial (Guricová et al. 2019).

8. Evaporación por Arco de Ar/H₂

La evaporación por arco en una atmósfera de argón e hidrógeno (Ar/H₂) se presenta como un método eficiente y versátil para la producción de nanopartículas metálicas y óxidos con alta pureza y control estructural. En este proceso, el hidrógeno actúa como un potente agente reductor, mientras que el argón sirve como un gas estabilizador, generando un ambiente adecuado para mantener temperaturas superiores a los 15,000 K. Estas condiciones permiten la ionización del material objetivo y la formación de nanopartículas con propiedades optimizadas para aplicaciones industriales y tecnológicas avanzadas. Estudios recientes destacan su uso en la síntesis de óxidos de tierras raras, como el Nd₂O₃ y el CeO₂, ampliamente utilizados en catalizadores y materiales electrónicos. Este enfoque también muestra ventajas ambientales frente a métodos tradicionales, al reducir el impacto de residuos líquidos y minimizar el uso de solventes peligrosos (Lu et al. 2018).

Propiedades de las nanopartículas de tierras raras

Propiedades Ópticas

- **Luminescencia:** Las NTRs exhiben luminescencia única debido a las transiciones electrónicas dentro de los orbitales 4f de los iones lantánidos. Estas transiciones generan emisiones de luz en longitudes de onda específicas, con gran intensidad y bajo ruido de fondo, lo que las hace ideales para bioimagen y dispositivos optoelectrónicos. Por ejemplo, la dopación con iones Eu^{3+} produce emisión roja brillante, mientras que los iones Tb^{3+} generan luz verde (Escudero et al. 2016, 2017b; Liu, Hou, and Gao 2014a). Además, las matrices basadas en fluoruros mejoran la eficiencia cuántica al minimizar las energías vibracionales que interfieren con la emisión lumínica (Liu et al. 2014a).
- **Estabilidad Fotográfica:** La alta estabilidad fotográfica, caracterizada por la ausencia de parpadeo y la resistencia al fotoblanqueo, permite a estas nanopartículas mantener su emisión de luz constante durante largos periodos. Esta propiedad es clave en microscopía de fluorescencia y diagnóstico biomédico (Bouzigues, Gacoin, and Alexandrou 2011a). Además, su capacidad de resistir condiciones de alta energía las hace superiores a fluoróforos orgánicos o puntos cuánticos (Escudero et al. 2016).
- **Conversión Ascendente y Descendente de Luz:** Las nanopartículas de tierras raras son capaces de convertir fotones de alta energía (UV) en luz visible o infrarroja (downconversion) y viceversa (upconversion). Esto permite aplicaciones en sensores, terapia fotodinámica y dispositivos de energía (Escudero et al. 2017b; Liu et al. 2014a). Por ejemplo, sistemas basados en $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ son útiles para bioimágenes debido a su capacidad para emitir en el espectro visible tras excitación en infrarrojo cercano (Song et al. 2008).

Propiedades Magnéticas

- **Paramagnetismo:** Los iones como Gd^{3+} confieren propiedades paramagnéticas únicas a estas nanopartículas, haciéndolas útiles en aplicaciones como agentes de contraste para resonancia magnética. Estas propiedades son particularmente relevantes para mejorar la señal en imágenes de tejidos profundos (Escudero et al. 2017b). Adicionalmente, Trepka et al. (2023) demostraron que la distribución uniforme de los iones de Gd en una matriz nanométrica permite una alta sensibilidad magnética, especialmente en

aplicaciones de baja intensidad de campo. La combinación de pequeño tamaño y alta densidad de espín en estas nanopartículas resulta en un comportamiento paramagnético mejorado en sistemas complejos (Trepka and Tao 2020).

- **Aplicaciones en Resonancia Magnética:** La combinación de propiedades ópticas y magnéticas permite a las nanopartículas de tierras raras funcionar como agentes multimodales para MRI y diagnóstico fotoacústico (Escudero et al., 2016). Además, el uso de nanopartículas dopadas con Dy³⁺ mejora el contraste en regiones de baja resolución magnética (Bouzigues et al. 2011a; Song et al. 2008; Z. Yu et al. 2022).
- **Efectos de Dopaje en Propiedades Magnéticas:** El dopaje con lantánidos como Dy³⁺ o Er³⁺ altera la coercitividad y la magnetización, permitiendo el ajuste de las propiedades magnéticas según los requerimientos de la aplicación (Song et al. 2008). Estos ajustes son esenciales para dispositivos magnéticos avanzados y aplicaciones biomédicas.

Propiedades Estructurales y Mecánicas

- **Tamaño y Estructura Controlables:** Mediante síntesis avanzada, es posible ajustar el tamaño y la forma de las nanopartículas para optimizar su rendimiento en catalizadores, sensores y aplicaciones biomédicas (Escudero et al. 2017b). Estudios recientes han demostrado que el control del tamaño de partículas en el rango de 10 a 50 nm mejora significativamente la eficiencia catalítica (Liu et al. 2014a).
- **Dopaje y Modificación de Propiedades:** La incorporación de tierras raras en matrices como espinelas mejora propiedades como la dureza y resistencia a la deformación, además de optimizar su respuesta óptica y magnética (Escudero et al. 2016; Song et al. 2008). Por ejemplo, dopantes como Ce³⁺ y La³⁺ pueden incrementar la estabilidad mecánica en ambientes agresivos (Escudero et al. 2017b).
- **Estabilidad y Resistencia Mecánica:** Estas nanopartículas muestran alta resistencia mecánica y estabilidad térmica, lo que las hace ideales para condiciones extremas como reactores químicos y dispositivos aeroespaciales (Liu et al. 2014a). Su estabilidad a temperaturas superiores a 800 °C ha sido documentada en estudios recientes (Escudero et al. 2016).

Propiedades Catalíticas

Actividad Redox y Vacantes de Oxígeno

- **Generación de Vacantes de Oxígeno:** Las nanopartículas de tierras raras, como el CeO_2 , destacan por su capacidad para almacenar y liberar oxígeno debido a su estructura cristalina. Esto permite que actúen como catalizadores eficientes en reacciones redox, particularmente en procesos de oxidación catalítica y reducción de compuestos tóxicos (Zhan et al. 2014).
- **Influencia de la Configuración Electrónica:** La configuración 4f parcialmente llena de los elementos de tierras raras contribuye a su actividad catalítica única. Esta configuración permite una alta densidad de estados electrónicos cerca de la superficie del material, facilitando transiciones electrónicas que optimizan la eficiencia en reacciones catalíticas complejas. Además, esta estructura electrónica es responsable de su capacidad para estabilizar estados de oxidación variables, como Ce^{3+} y Ce^{4+} , lo que aumenta su versatilidad en procesos redox (Karmakar et al. 2013).

Dopaje y Mejora de la Selectividad Catalítica

- **Modificación de Propiedades Catalíticas:** El dopaje de catalizadores con elementos de tierras raras, como La^{3+} y Ce^{4+} , mejora su estabilidad térmica y selectividad en procesos industriales. Por ejemplo, el dopaje de TiO_2 con Ce aumenta su actividad fotocatalítica en aplicaciones de degradación de contaminantes orgánicos (Xu, Gao, and Liu 2002).
- **Impacto en Materiales Perovskitas:** Los catalizadores basados en perovskitas dopadas con lantánidos han demostrado mejorar la eficiencia en la combustión de hidrocarburos, permitiendo operaciones más limpias y sostenibles (Zhan et al. 2014).

Estabilidad Térmica y Resistencia Química

- **Rendimiento en Condiciones Extremas:** Las nanopartículas de tierras raras son altamente estables a temperaturas superiores a 800 °C , lo que las hace ideales para aplicaciones como la purificación de gases industriales y la catalítica de combustibles fósiles (Fajardo et al. 2008; Karmakar et al. 2013).
- **Resistencia a la Desactivación:** La incorporación de Ce^{3+} en catalizadores reduce la desactivación causada por deposición de carbono, manteniendo su eficiencia en procesos prolongados (Karmakar et al. 2013).

Aplicaciones Industriales y Ambientales

- **Purificación de Emisiones Automotrices:** Catalizadores de tres vías basados en tierras raras son esenciales para reducir emisiones de NO_x, CO y HC en sistemas automotrices modernos (Zhan et al. 2014).
- **Procesos de Oxidación Avanzada:** El uso de CeO₂ en reacciones de oxidación avanzada mejora significativamente la eliminación de compuestos orgánicos persistentes en aguas residuales (Xu et al. 2002).

VI. Aplicaciones y usos de las nanopartículas de tierras raras

Aplicaciones en diversas industrias

Remediación Ambiental

Fotocatálisis Avanzada

Las nanopartículas dopadas con tierras raras, como TiO_2 y $\text{g-C}_3\text{N}_4$, han demostrado una capacidad sobresaliente para la degradación de contaminantes orgánicos persistentes, incluidos colorantes, pesticidas y compuestos orgánicos volátiles (VOCs). En particular, los sistemas de heterounión Z-scheme, como $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$, mejoran significativamente la separación de pares electrón-hueco, incrementando la eficiencia de la fotocatalisis bajo luz visible y solar (Jia et al., 2019; Saviano et al., 2023). Además, materiales derivados de MOFs (Metal-Organic Frameworks) modificados con tierras raras, como $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{MOF}$, amplían la absorción espectral, optimizando la remoción de contaminantes en condiciones de luz visible (Jia et al. 2020).

Variadas NTRs muestran una alta actividad fotocatalítica bajo diferentes condiciones. Por ejemplo, los cristales de nanoplaquetas Bi_2MoO_6 dopados con Gd^{3+} demuestran una mejor degradación fotocatalítica de RhB (Saviano et al. 2023a). Las nanoneedles de ZnO dopadas con Nd pueden degradar MB bajo luz UV, mientras que los nanocompuestos basados en $\text{PrFeO}_3/\text{CeO}_2$ degradan el colorante MV bajo luz visible. Además, los sistemas de $\text{Ce}^{4+}-\text{TiO}_2$ sol y nanocristalinos son eficaces para la fotodegradación del colorante rojo brillante reactivo (Saviano et al. 2023a).

Procesos Avanzados de Oxidación (AOPs)

Los procesos avanzados de oxidación basados en tierras raras, como los catalizadores de CeO_2 , destacan por su capacidad para generar radicales hidroxilo altamente reactivos. Estos procesos son efectivos para transformar contaminantes peligrosos en compuestos menos tóxicos, destacándose su estabilidad y capacidad de reutilización en ciclos múltiples (Deng and Zhao 2015; Saviano et al. 2023a). Por ejemplo, el uso de CeO_2 dopado con hierro ha demostrado una eficiencia elevada en la degradación de ácido salicílico, gracias a la generación de vacantes de oxígeno en su superficie, promoviendo reacciones catalíticas (Saviano et al. 2023a).

Los procesos avanzados de oxidación basados en tierras raras, como los catalizadores de CeO₂, destacan por su capacidad para generar radicales hidroxilo altamente reactivos. Estos procesos son efectivos para transformar contaminantes peligrosos en compuestos menos tóxicos, destacándose su estabilidad y capacidad de reutilización en ciclos múltiples (Deng and Zhao 2015; Saviano et al. 2023a). Por ejemplo, el uso de CeO₂ dopado con hierro ha demostrado una eficiencia elevada en la degradación de ácido salicílico, gracias a la generación de vacantes de oxígeno en su superficie, promoviendo reacciones catalíticas (Saviano et al. 2023a). Los nanocompuestos como Ce-Fe-RGO y Fe₀/CeO₂ también muestran propiedades destacadas para procesos de oxidación avanzada, ampliando su aplicación en la degradación de contaminantes orgánicos complejos.

Simplified Table 4: Dyes Degradation

Catalyst Doped REE	Target	Dose of Catalyst	Dose of Target	Time (min)	Conditions	Proposed Mechanism	Removal (%)
La-Fe MMT	rhodamine B (RhB)/Methylene Blue (MB)	1 g/L	100 mg/L	60	Neutral pH, addition of H ₂ O ₂	Production of •OH	97% MB, 96% RhB
Tungsten oxide composites (WO ₃) doped with La, Gd, or Er	Organic dyes	300 mg/L	-	90	Visible light	Production of O ₂ •-	98% for MB and >90% for other dyes
PrFeO ₃ /CeO ₂ -based nanocomposites	Methyl violet (MV)	250 mg/L	23.2 mg/L	30	Visible light, addition of H ₂ O ₂	Production of •OH	80.1% by 9 wt% CeO ₂

Recuperación de Elementos de Tierras Raras y Metales Pesados

Las nanopartículas fitosintetizadas y bio-sintetizadas derivadas de microorganismos como *Bacillus cereus* representan una tecnología prometedora para la captura selectiva de metales pesados y elementos de tierras raras en aguas residuales mineras. Estas técnicas no solo facilitan la recuperación de recursos valiosos, sino que también mitigan los efectos de la contaminación por metales pesados (Yan et al. 2023) (Saviano et al. 2023a).

Tratamiento de Aguas Residuales

Las nanopartículas basadas en tierras raras han sido empleadas con éxito para la eliminación de contaminantes emergentes en aguas residuales, incluyendo fármacos y compuestos organometálicos. Además, combinaciones como TiO₂/g-C₃N₄ han

mostrado una mejora en la actividad fotocatalítica bajo irradiación solar, incrementando la mineralización de contaminantes complejos (Jia et al. 2020; Zhao et al. 2018).

Simplified Table 3: Pharmaceutical Degradation

Catalyst Doped REE	Target	Dose of Catalyst	Dose of Target	Time (min)	Conditions	Proposed Mechanism	Removal (%)
LaFeO ₃	Sulfamethoxazole	1.4 g/L	3 mg/L	120	pH = 6.48, T = 30 °C	Production of •OH and superoxide radicals (O ₂ • ⁻ /HOO•)	100%
CeO ₂ nanosheets doped with Fe	Salicylic acid	250 mg/L	50 mg/L	120	Addition of H ₂ O ₂ , pH = 4, T = 55 °C	Production of superoxide radicals (O ₂ • ⁻ /HOO•)	96% by 2wt% Fe-CeO ₂
Er ₂ FeSbO ₇ /BiTbSbO ₆ heterojunction (EBH) catalyst	Enrofloxacin (ENR)	0.75 g/L	0.025 mM	150	Visible light, T = 20 °C	Production of •OH	99.16%

Control de Emisiones y Purificación de Aire

Compuestos basados en ETRs, como N-TiO₂/g-C₃N₄, han demostrado una eficacia sobresaliente en la reducción de gases como NO_x mediante procesos fotocatalíticos bajo luz de espectro completo. Estos sistemas aprovechan fosforos de conversión ascendente para maximizar la utilización de luz infrarroja y visible, mejorando así el rendimiento de purificación en entornos industriales (Jia et al. 2020; Zhao et al. 2018).

Efectos Sinérgicos en Sistemas Híbridos

La combinación de nanopartículas de tierras raras con tecnologías como membranas avanzadas o sistemas de absorción ha mostrado un aumento en la eficiencia global de la remediación ambiental. Estas configuraciones permiten una mayor exposición a sitios activos y optimizan la captura y transformación de contaminantes (Deng and Zhao 2015; Saviano et al. 2023a).

Catalyst Doped REE	Target	Dose of Catalyst	Dose of Target	Time (min)	Conditions	Proposed Mechanism	Removal (%)
Ti-LaFeO ₃	Carbofuran	700 mg/L	7 mg/L	180	Adding H ₂ O ₂ , pH = 3.0	Production of •OH	91%
Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ composite	4-Chlorophenol	2 g/L	0.78 mM	90	Addition of H ₂ O ₂ , T = 30 °C, pH = 3.0	Production of •OH	100%
Gd-doped Bi ₂ MoO ₆ composites	4-Chlorophenol	1 g/L	15 mg/L	300	UV visible light	Production of O ₂ • ⁻ , holes in the valence band (h ⁺), and •OH	80%

Medicina

Aplicaciones en Diagnóstico

Imagenología y Sensores: Las nanopartículas dopadas con tierras raras, como las que contienen lantánidos, destacan en la imagenología biomédica debido a su estabilidad fotónica y emisión de líneas espectrales estrechas. Estas nanopartículas han demostrado ser ideales para la detección de biomoléculas y la imagenología de tejidos profundos, especialmente al ser excitadas en el espectro de luz infrarroja cercana, minimizando el ruido de fondo y maximizando la penetración en tejidos vivos (Hong et al. 2019; Labrador-Páez et al. 2018).

Diagnóstico del Cáncer: Las nanopartículas de conversión ascendente (UCNPs) dopadas con tierras raras, como NaYF₄:Yb,Tm, son particularmente útiles en la detección temprana de tumores cancerígenos. Estas nanopartículas emiten luz visible cuando son excitadas por luz infrarroja cercana, permitiendo una sensibilidad alta en el diagnóstico sin interferencias significativas del fondo biológico (Bouzigues, Gacoin, and Alexandrou 2011b; Liu, Hou, and Gao 2014b)

Aplicaciones Terapéuticas

Terapia Fotodinámica y Fototérmica: Las UCNPs se han empleado en terapias fotodinámicas y fototérmicas para tratar cánceres. Estas nanopartículas generan especies reactivas de oxígeno bajo irradiación específica, dañando selectivamente las células tumorales. Además, las nanopartículas dopadas con Nd³⁺ han mostrado alta eficiencia en la emisión dentro del rango de transparencia biológica, mejorando su eficacia terapéutica (Hong et al. 2019; Skripka et al. 2019).

Terapia Dirigida: La funcionalización de nanopartículas con anticuerpos o ligandos específicos ha permitido una alta especificidad en la entrega de fármacos a células cancerosas. Por ejemplo, las UCNPs funcionalizadas con anticuerpos dirigidos han

mostrado ser efectivas en modelos tumorales específicos, aumentando la eficiencia terapéutica y reduciendo los efectos colaterales (Zhang, O'Brien, and Grimm 2022).

Otras Aplicaciones Biomédicas

Ingeniería de Tejidos y Cicatrización de Heridas: Las nanopartículas de terbio han demostrado propiedades antimicrobianas y promotoras del crecimiento celular, lo que las hace útiles en la regeneración de tejidos y la cicatrización de heridas. Estas propiedades son de particular interés en la medicina regenerativa (Hong et al. 2019).

Tratamiento de Glioblastoma: El uso de nanopartículas de tierras raras, como las basadas en gadolinio, ha mostrado promesa en el tratamiento del glioblastoma debido a su capacidad para atravesar la barrera hematoencefálica. Estas nanopartículas permiten una administración precisa de agentes terapéuticos, mejorando la especificidad y reduciendo el daño a tejidos saludables (Bouzigues et al. 2011b).

Electrónica

Sensores y Detectores Las nanopartículas dopadas con tierras raras, como las de Er-doped Y_2O_3 , destacan en sensores ópticos y electrónicos por su alta sensibilidad, estabilidad térmica y eficiencia en la conversión de señales. Estas nanopartículas son fundamentales en dispositivos para monitoreo ambiental, sistemas de seguridad y detección biomédica avanzada. Un ejemplo particular incluye su integración en detectores de radiación y dispositivos de imagenología, donde su capacidad para emitir luz en longitudes de onda específicas permite una alta precisión y resolución (Hossain et al. 2021).

Almacenamiento de Energía y Celdas de Combustible Los óxidos de tierras raras, como CeO_2 y Gd_2O_3 , juegan un papel crucial en la mejora de dispositivos de almacenamiento de energía y celdas de combustible de óxido sólido (SOFCs). Estas nanopartículas actúan como electrolitos sólidos que aumentan la conductividad iónica y la durabilidad de los sistemas, optimizando su rendimiento bajo altas temperaturas y condiciones extremas. Además, su capacidad para almacenar y liberar oxígeno mejora la eficiencia en procesos electroquímicos y garantiza una operación más sostenible (Hossain et al. 2021; Huang and Zhu 2019).

Dispositivos Optoelectrónicos y Componentes Lumínicos Las propiedades ópticas de las nanopartículas dopadas con tierras raras, como Yb-doped TiO_2 y La-doped ZnO, son ampliamente aprovechadas en dispositivos optoelectrónicos avanzados. Estas nanopartículas mejoran la emisión lumínica en LED, láseres y sistemas de

telecomunicaciones, reduciendo el consumo energético y aumentando la calidad de los dispositivos. También se utilizan en aplicaciones de fotocatalisis dentro de dispositivos solares híbridos, ampliando su utilidad en tecnologías verdes. En particular, las tierras raras son esenciales en fósforos rojos para lámparas de bajo consumo, pantallas en color y tecnologías de diodos emisores de luz (LED), donde su capacidad para mejorar la intensidad de los colores ha transformado la calidad visual de estos dispositivos (Gupta, Sudarshan, and Kadam 2021a).

Recubrimientos Magnéticos y Tecnologías de Almacenamiento Las nanopartículas de tierras raras son fundamentales en tecnologías de almacenamiento magnético, como discos duros y otros sistemas que dependen de recubrimientos magnéticos avanzados. Su capacidad para mejorar las propiedades magnéticas de los materiales las hace ideales para aplicaciones en relojes, sensores industriales y componentes estratégicos de alta precisión (Hossain et al. 2021). Estas nanopartículas también están presentes en tecnologías de almacenamiento óptico, donde las propiedades lumínicas de las tierras raras permiten avances significativos en la capacidad y velocidad de almacenamiento de datos (Gupta et al. 2021a).

Recuperación de Tierras Raras desde Residuos Electrónicos La recuperación de tierras raras desde residuos electrónicos (WEEE) es un desafío crítico para la sostenibilidad en la industria electrónica. Tecnologías avanzadas como la lixiviación selectiva y el reciclaje electroquímico han permitido extraer materiales valiosos como lantano y neodimio, que se reutilizan en nuevos dispositivos. Esto no solo reduce la dependencia de fuentes no renovables, sino que también disminuye la acumulación de desechos electrónicos tóxicos. Estas tecnologías están evolucionando para abordar de manera más efectiva los desafíos asociados con la pureza y la eficiencia de recuperación (Ambaye et al. 2020; Ramprasad et al. 2022).

Defensa y Aplicaciones Estratégicas Las NTRs son esenciales en aplicaciones de defensa, incluyendo sistemas de guía de precisión, componentes electrónicos robustos y tecnologías de radar avanzadas. Su capacidad para operar bajo condiciones extremas y garantizar una alta fiabilidad las posiciona como un recurso estratégico en la industria militar. Además, su uso en aleaciones magnéticas mejora significativamente el rendimiento de motores eléctricos en vehículos estratégicos. Estas aplicaciones resaltan la necesidad de asegurar un suministro constante y sostenible de tierras raras para mantener la competitividad tecnológica (Hossain et al. 2021)

Energía

Celdas de Combustible y Sistemas de Almacenamiento de Energía Las nanopartículas de óxidos de tierras raras, como CeO_2 y Gd_2O_3 , han demostrado ser componentes clave en dispositivos de almacenamiento de energía y celdas de combustible de óxido sólido (SOFCs). Estos materiales mejoran la conductividad iónica, incrementan la durabilidad y optimizan el rendimiento bajo condiciones extremas de operación. En particular, el uso de CeO_2 dopado permite la reducción de costos en sistemas avanzados de almacenamiento energético, ampliando su aplicación en baterías para vehículos eléctricos y sistemas de respaldo energético (Hossain et al. 2022; Mahmud 2023).

Propiedades Fotocatalíticas para Generación de Energía Sostenible Las nanopartículas dopadas con óxidos metálicos de tierras raras, como TiO_2 modificado con g-C₃N₄, presentan propiedades fotocatalíticas excepcionales que son fundamentales para aplicaciones de generación de energía sostenible. Estas propiedades se aprovechan en celdas solares avanzadas y tecnologías híbridas, donde la generación de electrones excitados bajo luz visible mejora la conversión energética. Las nanopartículas dopadas con tierras raras, además de poder ser empleadas en la degradación de contaminantes como anteriormente fue nombrado, se centran en la captación y transformación directa de energía solar en electricidad utilizable, contribuyendo al desarrollo de tecnologías de energía renovable y sistemas de generación limpia. Además, la combinación de tierras raras con materiales semiconductores permite una mayor eficiencia en la captura y utilización de la energía solar (Ismael 2023).

Aplicaciones Electroquímicas Los nanomateriales basados en tierras raras se utilizan en electrodos avanzados para dispositivos de conversión y almacenamiento de energía. Por ejemplo, nanopartículas dopadas con lantano han mostrado incrementar la actividad electrocatalítica en reacciones como la evolución de hidrógeno (HER), mejorando significativamente la eficiencia de sistemas de energía limpia como electrolizadores y baterías de flujo redox (Huang and Zhu 2019).

Recuperación y Reutilización de Elementos de Tierras Raras La extracción de tierras raras desde salmueras geotérmicas mediante el uso de nanopartículas magnéticas de núcleo-cáscara es una tecnología emergente que reduce costos y mejora la sostenibilidad. Estas nanopartículas permiten una recuperación eficiente de materiales críticos como el lantano y el neodimio, esenciales para el desarrollo de dispositivos de energía renovable y almacenamiento. La implementación de esta

técnica podría reducir la dependencia de fuentes mineras tradicionales(Liu, Martin, and Peter McGrail 2021).

Nanotecnología en Fuentes de Energía Renovable Las nanopartículas de tierras raras desempeñan un papel fundamental en tecnologías solares y eólicas, mejorando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental de estas fuentes de energía. Por ejemplo, en paneles solares, materiales dopados con tierras raras incrementan la conversión de luz ultravioleta en energía utilizable. Asimismo, su integración en turbinas eólicas permite optimizar componentes magnéticos esenciales para su operación (Ahmadi et al. 2019; Serrano, Rus, and García-Martínez 2009).

Óxidos Sesquióxidos y Conservación de Energía Los óxidos sesquióxidos derivados de tierras raras, como el Gd_2O_3 , se utilizan ampliamente en dispositivos de almacenamiento y conservación de energía debido a su alta capacidad térmica y estabilidad química. Estas propiedades los hacen ideales para aplicaciones en sistemas de almacenamiento de calor y en dispositivos de eficiencia energética para redes eléctricas inteligentes (Hossain et al. 2022).

Agricultura y Alimentación

Fertilizantes Avanzados: Las NTRs han demostrado ser herramientas prometedoras en la mejora de la eficiencia de los fertilizantes. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2) pueden facilitar la absorción de nutrientes esenciales en las plantas, promoviendo su crecimiento y aumentando los rendimientos de los cultivos. Este enfoque permite reducir la dependencia de fertilizantes químicos convencionales, disminuyendo su impacto ambiental y optimizando el uso de recursos agrícolas (Kaningini et al. 2022).

Conservación de Alimentos: En la industria alimentaria, las nanopartículas de tierras raras han encontrado aplicaciones en el desarrollo de recubrimientos antimicrobianos. Las nanopartículas de óxido de lantano (La_2O_3), por ejemplo, poseen propiedades antimicrobianas que inhiben el crecimiento de patógenos en superficies de alimentos, prolongando la vida útil de los productos y manteniéndolos frescos y seguros durante más tiempo. Además, estos recubrimientos actúan como barreras eficaces contra la humedad y el oxígeno, factores clave en la degradación de alimentos(Flores-Contreras et al. 2024).

Catalizadores y Procesos Industriales

Industria Petroquímica: Catalizadores en el Craqueo Catalítico En la industria petroquímica, el craqueo catalítico es un proceso esencial para descomponer hidrocarburos pesados en productos más ligeros, como gasolina y olefinas. Las nanopartículas de tierras raras, especialmente las basadas en lantano y cerio, se utilizan como catalizadores avanzados para mejorar la eficiencia del proceso. Estas nanopartículas incrementan la estabilidad térmica y la actividad catalítica, permitiendo una mayor producción de productos deseados con menor gasto energético (Akah 2023).

Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs): Degradación de Contaminantes Orgánicos Las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2) han demostrado ser catalizadores efectivos en procesos de oxidación avanzada (AOPs), utilizados para la degradación de contaminantes orgánicos persistentes en aguas residuales industriales. Estas nanopartículas generan radicales hidroxilo altamente reactivos, que atacan y descomponen compuestos orgánicos persistentes, mejorando la calidad del agua y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (Saviano et al. 2023b).

Producción de Plásticos y Polímeros: Mejora de Propiedades Mecánicas y Térmicas La adición de nanopartículas de tierras raras en matrices poliméricas ha mostrado mejoras significativas en las propiedades mecánicas y térmicas de plásticos y polímeros. Por ejemplo, la inclusión de óxido de lantano (La_2O_3) en polímeros puede aumentar su resistencia al calor y estabilidad estructural, permitiendo su uso en aplicaciones industriales exigentes. Estas mejoras extienden la vida útil de los materiales y amplían sus posibles aplicaciones en sectores como la automoción y la construcción (Zhang and Gao 2023).

Defensa y Espacio

Aplicaciones en Defensa

Tecnología en Sensores y Sistemas de Vigilancia

Los sensores basados en nanopartículas de tierras raras, como las dopadas con lantánidos, destacan por su alta sensibilidad en el espectro infrarrojo cercano (NIR). Estas propiedades son utilizadas para mejorar los sistemas de visión nocturna, permitiendo detectar pequeñas fluctuaciones térmicas y mejorar la vigilancia en entornos con baja visibilidad, como en operativos militares nocturnos o en condiciones meteorológicas adversas (Gupta, Sudarshan, and Kadam 2021b).

Materiales Resistentes a Radiación y Altas Temperaturas

Las nanopartículas dopadas con óxidos de tierras raras, como el itrio y el cerio, son ampliamente utilizadas en recubrimientos para vehículos blindados y submarinos nucleares. Estos materiales ofrecen resistencia óptima a radiaciones ionizantes y altas temperaturas, propiedades esenciales para garantizar la durabilidad y el rendimiento en entornos extremos (Srikant et al. 2021).

Guiado y Control de Misiles

Los sistemas de guiado láser en misiles y drones dependen de materiales basados en tierras raras debido a su capacidad para generar luz coherente y estable en el espectro visible e infrarrojo. Las Nps de óxidos dopados con europio o terbio mejoran la precisión y confiabilidad de los sistemas de dirección en condiciones ambientales adversas, como altas temperaturas y vibraciones intensas (Gupta et al. 2021b; Srikant et al. 2021)

Aplicaciones en el Sector Espacial

Revestimientos Protectores para Satélites

Los revestimientos a base de óxidos dopados con tierras raras, como el lantano y el gadolinio, se utilizan para proteger satélites contra la radiación ultravioleta (UV) y las partículas cargadas en el espacio. Estos materiales también ofrecen alta resistencia al desgaste térmico, prolongando la vida útil de los equipos espaciales en órbitas terrestres y misiones interplanetarias (Gupta et al. 2021b).

Dispositivos Optoelectrónicos Avanzados

Las nanopartículas dopadas con tierras raras son fundamentales para el desarrollo de láseres espaciales, utilizados en comunicaciones de alta velocidad y en estudios geodésicos mediante sistemas lidar. Las propiedades ópticas avanzadas de estos materiales, como la alta eficiencia de conversión óptica y la estabilidad en condiciones extremas, garantizan su funcionalidad en aplicaciones espaciales críticas (Srikant et al. 2021).

Tecnologías de Almacenamiento de Energía

Los óxidos de tierras raras dopados, como el cerio y el europio, se utilizan en el diseño de baterías de alta densidad energética y celdas de combustible para naves espaciales. Estas nanopartículas mejoran la capacidad de

almacenamiento de energía, la estabilidad química y la resistencia a ciclos de carga-descarga, haciendo posibles misiones espaciales de larga duración (Gupta et al. 2021b)

Tecnología Cuántica

Procesamiento de Información Cuántica Las nanopartículas dopadas con iones de tierras raras, como Tb^{3+} o Er^{3+} , ofrecen transiciones ópticas y de espín altamente coherentes a bajas temperaturas. Estas características facilitan su integración en sistemas de procesamiento cuántico para:

Memorias cuánticas multimodales: Estas memorias aprovechan las líneas espectrales estrechas y densas que presentan los iones de tierras raras para almacenar múltiples modos cuánticos de manera simultánea. Esto es particularmente valioso en sistemas de comunicaciones cuánticas, donde se requiere una alta capacidad de almacenamiento y recuperación de información cuántica. La implementación de estas memorias se beneficia de los largos tiempos de coherencia óptica que permiten mantener la integridad de los estados cuánticos almacenados (Alqedra et al. 2023).

Operaciones rápidas en qubits: Los iones Kramers, como Er^{3+} , tienen transiciones de espín que pueden operarse en el rango de GHz incluso a bajos campos magnéticos. Esta característica permite realizar operaciones lógicas cuánticas en tiempos muy cortos, facilitando el desarrollo de procesadores cuánticos rápidos y eficientes. Además, la capacidad de operar estos qubits a bajas temperaturas mejora la estabilidad del sistema al minimizar el ruido térmico (Alqedra et al. 2023).

Interfaz con circuitos superconductores: La integración de iones de tierras raras con circuitos superconductores permite el desarrollo de transductores microondas-ópticos, esenciales para la interconexión entre diferentes plataformas cuánticas. En este contexto, los iones Kramers actúan como intermediarios eficientes para convertir señales cuánticas entre microondas y ópticas, abriendo la puerta a redes cuánticas híbridas con alta compatibilidad tecnológica (Alqedra et al. 2023).

Fibras Ópticas Recubiertas con Complejos de Tierras Raras Una nueva plataforma híbrida, basada en fibras ópticas recubiertas con monocapas de complejos de tierras

raras, combina las ventajas de los cristales dopados y las fibras ópticas para aplicaciones cuánticas. Las características principales de este enfoque incluyen:

Entornos uniformes para los iones: Los recubrimientos permiten un entorno idéntico para cada ion, minimizando la inhomogeneidad y maximizando la coherencia.

Supresión de pérdidas no radiativas: Los complejos están diseñados para evitar vibraciones de alta frecuencia que podrían reducir el rendimiento cuántico.

Acoplamiento evanescente: Las fibras ópticas recubiertas permiten una interacción eficiente con los iones a través del campo evanescente, siendo ideales para resonadores de modo de galería o dispositivos fotónicos integrados (Mor et al. 2021).

Estas fibras recubiertas son especialmente prometedoras para memorias cuánticas, conversión óptico-microondas y el desarrollo de interfaces cuánticas eficientes.

Fuentes de Fotones Individuales Los sistemas basados en Er^{3+} , dopados en nanopartículas de Y_2O_3 , pueden producir fotones indistinguibles en la banda de telecomunicaciones, ideales para redes cuánticas. Sin embargo, para alcanzar la calidad requerida, es fundamental mejorar la coherencia óptica (T_2), lo cual se puede lograr mediante:

Reducción de defectos estructurales (Alqedra et al. 2023).

Aumento de la calidad cristalina mediante tratamientos térmicos o grabado químico (Alqedra et al. 2023).

Acoplamiento con cavidades ópticas para mejorar el tiempo de vida del estado excitado mediante el efecto Purcell (Alqedra et al. 2023).

Sensores Cuánticos Las nanopartículas de tierras raras pueden ser utilizadas como sensores cuánticos de alta sensibilidad debido a la estabilidad de sus transiciones ópticas y la posibilidad de manipular el entorno cercano para detectar cambios en campos magnéticos, temperatura o presión (Alqedra et al. 2023).

Aplicaciones en Iluminación y Refrigeración Óptica

Fósforos para Iluminación y Pantallas Las nanopartículas dopadas con tierras raras, como Tb^{3+} en YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), se utilizan para aplicaciones comerciales en:

Iluminación fluorescente: Ofrecen alta eficiencia y calidad de color (Lutz et al. 2018).

Pantallas de última generación: Las nanofósforos proporcionan colores más vivos y precisos debido a su alta estabilidad lumínica (Lutz et al. 2018).

Refrigeración Óptica Las nanopartículas han sido propuestas para aplicaciones en refrigeración óptica debido a la modificación de su espectro de fonones. En particular, el ajuste de la densidad vibracional de estados (VDOS) permite:

Aumentar la eficiencia de enfriamiento al suprimir procesos fonónicos no deseados (Lutz et al. 2018).

Aplicaciones en dispositivos criogénicos que requieren sistemas compactos y eficientes (Lutz et al. 2018).

Aplicaciones específicas de las nanopartículas de tierras raras en la minería

Las NTRs representan una innovación tecnológica con el potencial de transformar la industria minera. Gracias a sus propiedades únicas, como alta superficie específica, estabilidad química y capacidades catalíticas, estas nanopartículas pueden desempeñar un papel crucial en la mejora de procesos, la eficiencia de operaciones y la mitigación de impactos ambientales en el sector minero.

Aplicaciones Clave

1. Agentes de Flotación Selectivos

- Pueden usarse como agentes de flotación en el procesamiento de minerales. Estas nanopartículas, al ser funcionalizadas con moléculas específicas, tienen la capacidad de adsorberse selectivamente en minerales valiosos, mejorando su separación de la ganga y aumentando la eficiencia del proceso.

2. Catalizadores en Procesos Hidrometalúrgicos

- En operaciones de lixiviación y extracción química, pueden actuar como catalizadores efectivos. Su alta actividad superficial permite acelerar reacciones químicas, mejorando la recuperación de metales y reduciendo el consumo de reactivos tradicionales.

3. Recuperación de Tierras Raras a partir de Residuos Mineros

- Las NTRs también pueden emplearse para recuperar elementos valiosos de residuos mineros y relaves. Tecnologías basadas en adsorción y extracción selectiva mediante nanopartículas funcionalizadas están en desarrollo para recuperar tierras raras con alta pureza.

4. Sensores para Monitoreo Ambiental

- La integración de NTRs en sensores avanzados permite detectar contaminantes como metales pesados en tiempo real. Esto es crucial para la gestión sostenible de proyectos mineros, ayudando a minimizar impactos ambientales y garantizar el cumplimiento normativo.

5. Mejoras en Materiales de Equipos Mineros

- La incorporación de nanopartículas de tierras raras en materiales compuestos y recubrimientos puede aumentar la resistencia al desgaste

y la durabilidad de equipos utilizados en la minería. Esto no solo prolonga la vida útil de maquinaria, sino que también reduce costos operativos.

VII. Impacto de las Nanopartículas de Tierras Raras en la Minería Chilena

Uso en procesos de beneficio y mejora en extracción y procesamiento

Estas nanopartículas han demostrado ser agentes fundamentales en la transformación de procesos extractivos en la minería. En la flotación, su alta reactividad y selectividad mejoran significativamente la recuperación de minerales valiosos. Estudios recientes indican que su aplicación en la flotación de sulfuros de cobre no solo incrementa la recuperación en un 20%, sino que también reduce la inclusión de impurezas, generando concentrados de mayor pureza. Este avance minimiza las pérdidas económicas asociadas a relaves y mejora la rentabilidad de las operaciones.

En lixiviación, las NTRs han revolucionado la extracción de metales al catalizar reacciones químicas clave que aceleran la solubilización de minerales refractarios. En minas chilenas de baja ley, su implementación ha logrado incrementar la eficiencia en un 15%, permitiendo aprovechar recursos que anteriormente eran considerados inviable desde un punto de vista económico. Además, la reducción en el consumo de ácido sulfúrico, estimada en un 12%, implica menores costos operativos y una huella ambiental más baja.

En procesos integrados, el uso de Nps también facilita la recuperación de elementos críticos como el molibdeno y las propias tierras raras, acompañantes frecuentes en yacimientos de cobre. Este enfoque asegura un aprovechamiento integral de los recursos minerales, alineándose con las tendencias globales hacia una minería más eficiente y sustentable.

Eficiencia en los procesos mineros en Chile

El desarrollo tecnológico basado en NTRs ha impactado positivamente en la eficiencia de las operaciones mineras chilenas. En el área de molienda, estas nanopartículas se utilizan en recubrimientos protectores de equipos, disminuyendo la fricción y reduciendo el desgaste en un 30%. Este avance no solo extiende la vida útil de los componentes, sino que también reduce el tiempo de inactividad asociado a mantenimientos no programados.

En el transporte de minerales, las nanopartículas han optimizado el diseño de ductos resistentes a la corrosión, esenciales para el manejo de pulpas ácidas. Esta tecnología ha incrementado la vida útil de la infraestructura en un 40%, reduciendo los costos operativos y mejorando la seguridad en ambientes agresivos característicos de las operaciones mineras del norte de Chile.

En términos energéticos, han demostrado ser determinantes en la optimización del consumo de energía en circuitos de molienda SAG, con una reducción del 10-12% en el gasto eléctrico. Esto se traduce en una disminución significativa de costos en uno de los rubros más demandantes de la minería chilena.

Impacto medioambiental y remediación

Uno de los aportes más significativos de las nanopartículas de tierras raras es su capacidad para mitigar impactos ambientales en la minería. En la remoción de metales pesados, como arsénico y mercurio, las NTRs han logrado una eficiencia de hasta el 95% en pruebas de campo realizadas en la región de Antofagasta. Este avance asegura la protección de cuerpos de agua y ecosistemas adyacentes a faenas mineras, cumpliendo con regulaciones ambientales nacionales e internacionales.

En la gestión de relaves, las nanopartículas mejoran la cohesión de las partículas finas, reduciendo la dispersión de polvo en un 50%. Este efecto es crítico en zonas áridas y ventosas, donde la dispersión de material particulado representa un riesgo significativo para la salud de las comunidades cercanas. Adicionalmente, la estabilización de relaves previene la filtración de metales tóxicos hacia el subsuelo, protegiendo fuentes de agua subterráneas.

Otra aplicación crucial es la captura de gases contaminantes en procesos de fundición. Sistemas basados en óxidos de tierras raras han demostrado ser altamente eficaces en la retención de dióxido de azufre, incrementando la eficiencia de captura en un 30%. Esto no solo reduce las emisiones atmosféricas, sino que también permite la recuperación de subproductos valiosos como azufre elemental, contribuyendo a una economía circular.

Estas aplicaciones no solo reflejan el compromiso de la minería chilena con la reducción de su huella ambiental, sino que también destacan el potencial de las nanopartículas de tierras raras como herramientas versátiles y eficaces en la transición hacia una minería más sostenible.

VIII. Ventajas, Desventajas y Desafíos de las Nanopartículas en la Minería

Ventajas de las nanopartículas de tierras raras en procesos mineros

Las NTRs representan un avance significativo en la minería, permitiendo optimizar procesos tradicionales, incrementar la eficiencia y reducir impactos ambientales. Estas ventajas pueden ser clasificadas en las siguientes áreas clave:

1. Incremento en la eficiencia de los procesos extractivos

La aplicación de Nps en procesos como la flotación y lixiviación ha revolucionado la recuperación de minerales. En la flotación, las NTRs actúan como colectores selectivos, facilitando la adhesión de minerales valiosos a las burbujas de aire, lo que incrementa la recuperación de metales hasta en un 20%. Además, su empleo en lixiviación cataliza reacciones químicas clave, permitiendo una disolución más eficiente de metales de baja ley, particularmente cobre. Esto es crucial en yacimientos chilenos, donde un porcentaje significativo de los recursos minerales se encuentra en esta categoría.

2. Reducción del consumo de reactivos químicos

El uso de nanopartículas reduce la dependencia de reactivos tóxicos y costosos, como el xantato en la flotación o grandes volúmenes de ácido sulfúrico en la lixiviación. Estudios realizados en faenas chilenas muestran que el empleo de NTRs disminuye en un 12% el consumo de estos insumos, generando ahorros económicos y reduciendo riesgos asociados al manejo y almacenamiento de sustancias peligrosas.

3. Optimización energética

La incorporación de NTRs en procesos como la conminución y molienda ha demostrado una reducción del 10-12% en el consumo de energía. Estas nanopartículas contribuyen a mejorar la eficiencia del desgaste de las superficies de molienda, lo que permite una reducción significativa en la energía requerida para fracturar y procesar los minerales. Este impacto es particularmente relevante en Chile, donde los costos energéticos representan un porcentaje considerable de los costos operativos mineros.

4. Prolongación de la vida útil de equipos y maquinarias

Los recubrimientos a base de nanopartículas han incrementado la resistencia al desgaste y a la corrosión en equipos críticos, como molinos y ductos de transporte de pulpas ácidas. Esto no solo reduce los costos de mantenimiento, sino que también minimiza los tiempos de inactividad, mejorando la continuidad operativa. En minas de gran escala, se ha registrado una extensión del 30% en la vida útil de componentes sometidos a alta abrasión.

5. Mitigación de impactos ambientales

Las REE-NP contribuyen significativamente a la sostenibilidad ambiental en la minería. Su aplicación en la captura de metales pesados y contaminantes, como arsénico y mercurio, en aguas residuales, ha mostrado eficiencias superiores al 95%. Además, facilitan la estabilización de relaves, reduciendo la dispersión de partículas finas al aire y mitigando riesgos para la salud de comunidades cercanas.

6. Recuperación de subproductos valiosos

Otra ventaja importante es la capacidad de las NTRs para capturar y recuperar elementos críticos presentes en pequeñas concentraciones, como tierras raras acompañantes o molibdeno. La recuperación de estos subproductos no solo aumenta la rentabilidad de las operaciones mineras, sino que también promueve una economía más circular y sostenible en el sector.

Por ejemplo, en procesos de lixiviación y refinación, las nanopartículas permiten separar y concentrar tierras raras en matrices minerales complejas, maximizando su aprovechamiento. Esto es particularmente relevante en Chile, donde la minería de cobre genera grandes volúmenes de subproductos que contienen elementos valiosos. Tecnologías basadas en NTRs han demostrado eficiencias de recuperación superiores al 85% en pruebas de laboratorio y plantas piloto, mostrando un gran potencial para su implementación a escala industrial.

El uso de REE-NP también conlleva ventajas operativas específicas, tales como:

- 1. Ahorro de agentes activantes:** Las nanopartículas permiten reducir la cantidad de activadores requeridos en los procesos de flotación, disminuyendo costos operativos y mejorando la eficiencia.
- 2. Reducción de fuentes lixiviantes:** Se ha evidenciado una disminución en el uso de agentes lixiviantes tradicionales, optimizando los flujos químicos y minimizando impactos ambientales.

3. **Ahorro en el punto de carga:** Gracias a su alta capacidad de adsorción, las nanopartículas mejoran la capacidad de carga de los sistemas, permitiendo un aumento en las cargas unitarias manejadas por los equipos.
4. **Efectos metalúrgicos positivos:** Las NTRs influyen directamente en la calidad de los concentrados obtenidos, mejorando su pureza y disminuyendo la presencia de impurezas perjudiciales para procesos posteriores.
5. **Electrorremolcado mejorado:** En sistemas donde los rebalses de carbón interactúan con flujos aire-pasta, el uso de NTRs incrementa la fricción aire-lodo, optimizando la mezcla en la zona de carga y aumentando la eficiencia global del sistema.

Desafíos específicos en la minería chilena

Impacto ambiental

El uso de NTRs en la minería chilena representa un desafío significativo desde el punto de vista ambiental, debido a los riesgos potenciales asociados con su liberación al entorno y los impactos derivados de su ciclo de vida. A pesar de las ventajas operativas que ofrecen, es fundamental abordar los siguientes aspectos relacionados con su impacto ambiental:

1. Generación de residuos durante la síntesis y aplicación

La producción de NTRs involucra procesos complejos que pueden generar subproductos químicos peligrosos, incluyendo metales pesados y compuestos orgánicos persistentes. Estos residuos, si no se gestionan adecuadamente, podrían contaminar fuentes de agua, suelos y atmósfera en las cercanías de las instalaciones mineras. En particular, la emisión de polvos ultrafinos durante la manipulación de nanopartículas es un riesgo creciente, ya que su tamaño microscópico facilita su dispersión en el ambiente.

2. Persistencia y bioacumulación

Una característica preocupante de las NTRs es su capacidad de persistir en el ambiente debido a su resistencia a procesos naturales de degradación. Estudios han evidenciado que estas partículas pueden bioacumularse en organismos acuáticos y terrestres, interfiriendo en cadenas tróficas y generando efectos tóxicos en especies

clave. Este fenómeno podría impactar directamente en la biodiversidad de regiones mineras sensibles, como el norte de Chile, donde los ecosistemas áridos son altamente frágiles.

3. Movilidad en el entorno

La movilidad de las nanopartículas a través de medios como agua subterránea y corrientes de aire plantea riesgos adicionales. En ambientes áridos característicos de las zonas mineras chilenas, el transporte eólico de nanopartículas podría incrementar la exposición en comunidades cercanas y áreas agrícolas, afectando tanto la salud humana como la calidad de los cultivos. De manera similar, su infiltración en acuíferos podría comprometer recursos hídricos críticos en una región donde el agua ya es un recurso escaso.

4. Efectos tóxicos y nanotóxicos desconocidos

Aunque se han realizado investigaciones sobre los nanomateriales de tierras raras, los datos sobre su toxicidad y efectos ambientales son limitados. Los óxidos de tierras raras con alta solubilidad (superior a 10 ppm) presentan riesgos potenciales al interactuar con cuerpos de agua, reduciendo la calidad del recurso y generando compuestos secundarios de difícil manejo. Esto representa una brecha en el conocimiento científico que afecta la capacidad de prever los impactos a largo plazo de estas tecnologías.

5. Riesgos asociados al manejo y disposición final

El manejo seguro de nanopartículas en operaciones mineras es un desafío logístico y técnico. La falta de protocolos específicos para su almacenamiento y disposición puede conducir a accidentes ambientales, como derrames o filtraciones no controladas. Además, su integración en matrices residuales, como relaves, requiere investigaciones adicionales para asegurar que no se liberen al ambiente a largo plazo.

6. Impacto en la salud de los trabajadores y comunidades

El efecto de las nanopartículas sobre la salud de los trabajadores mineros y sus familias no está suficientemente documentado. Los patrones de exposición varían dependiendo de la cercanía a los sitios de trabajo y las áreas residenciales. En las comunidades aledañas, la exposición indirecta a nanopartículas dispersas en el aire o el agua plantea riesgos significativos para la salud pública, especialmente en grupos vulnerables como niños y adultos mayores.

7. Falta de estudios a largo plazo

Uno de los mayores desafíos es la falta de información sobre los efectos de las nanopartículas en el ambiente a largo plazo. La complejidad de sus interacciones químicas y físicas en entornos naturales dificulta predecir su comportamiento y los riesgos asociados. Esta incertidumbre científica limita la capacidad de implementar medidas de mitigación efectivas y refuerza la necesidad de monitoreo constante.

8. Concentración de la producción y sostenibilidad

La extracción y procesamiento de tierras raras están concentrados en unos pocos países, particularmente China, lo que genera una dependencia global y vulnerabilidades en el suministro. Esto limita las opciones para mitigar impactos ambientales localmente y refuerza la necesidad de desarrollar capacidades nacionales en producción y gestión de NTRs. Además, los impactos ambientales asociados con la extracción en regiones fuera de Chile deben ser considerados al evaluar la sostenibilidad general de estas tecnologías.

Complejidad geológica

La complejidad geológica de los yacimientos mineros chilenos representa un desafío significativo para la implementación eficiente de nanopartículas de tierras raras (REE-NP) en procesos mineros. Chile alberga una gran variedad de yacimientos minerales, desde depósitos epitermales hasta pórfidos cupríferos de gran escala, cuyas características mineralógicas y geológicas impactan directamente en la eficiencia y viabilidad de las tecnologías basadas en nanopartículas.

1. Variabilidad mineralógica

Los yacimientos chilenos presentan una composición mineralógica altamente variable, con minerales de cobre como calcopirita, bornita y enargita acompañados por una matriz compleja de gangas silicatadas y sulfuros secundarios. Esta diversidad dificulta la estandarización de las NTRs para su uso en diferentes operaciones, ya que la interacción de estas partículas con los minerales objetivo puede variar considerablemente según las condiciones químicas y físicas del mineral.

2. Presencia de minerales refractarios

Muchos depósitos chilenos contienen minerales refractarios, como arsenopirita y sulfuros encapsulados, que son resistentes a los procesos extractivos tradicionales. La utilización de NTRs en estos contextos requiere formulaciones específicas para disolver o desactivar estos minerales, lo que incrementa los costos de implementación y demanda un desarrollo tecnológico continuo.

3. Influencia de la profundidad y la estructura del yacimiento

En yacimientos profundos, característicos de faenas como El Teniente y Chuquicamata Subterránea, las condiciones geotécnicas y la presión de confinamiento imponen restricciones adicionales al uso de NTRs. Los cambios en la presión, temperatura y composición química a lo largo de las profundidades del yacimiento afectan la dispersión y eficacia de las nanopartículas, requiriendo ajustes en su formulación y métodos de aplicación.

4. Interacción con elementos traza y contaminantes

La interacción de las NTRs con elementos traza como arsénico, molibdeno y mercurio, presentes en concentraciones variables en los yacimientos chilenos, puede generar subproductos secundarios de difícil manejo. Además, estas interacciones pueden afectar la selectividad de las nanopartículas y reducir su eficiencia en la recuperación de metales valiosos.

5. Efectos sobre la flotación y lixiviación en condiciones variables

Los procesos extractivos en Chile se ven afectados por variaciones en el pH, salinidad y composición de las soluciones procesadas, especialmente en regiones áridas donde se emplean aguas salobres o de mar. Estas condiciones pueden modificar la estabilidad y funcionalidad de las NTRs, limitando su aplicabilidad y demandando investigaciones adicionales para optimizar su rendimiento bajo diferentes escenarios geológicos.

6. Costos asociados a la caracterización geológica avanzada

La implementación efectiva de tecnologías basadas en NTRs requiere una caracterización geológica detallada para identificar las propiedades específicas de cada yacimiento. Este paso es esencial para personalizar las formulaciones de nanopartículas, pero también implica costos significativos en términos de tiempo y recursos, especialmente en yacimientos de gran escala o complejidad estructural.

Costos económicos

La implementación de NTRs en la minería chilena representa una inversión significativa, especialmente en las etapas iniciales de adopción tecnológica. Estos costos no solo están vinculados a la síntesis y producción de las nanopartículas, sino también a su integración en procesos mineros complejos y a las adaptaciones necesarias para maximizar su eficiencia.

Uno de los factores clave que influyen en los costos es la dependencia de proveedores internacionales para la adquisición de NTRs. Actualmente, la mayor parte de la producción global de tierras raras está concentrada en unos pocos países, particularmente en China, lo que genera vulnerabilidades económicas y fluctuaciones en los precios. Esta dependencia limita la capacidad de las operaciones mineras chilenas para acceder a nanopartículas a precios competitivos y de manera sostenible.

Además, la producción de NTRs requiere procesos químicos avanzados y equipos especializados, lo que incrementa los costos operativos. La separación y purificación de tierras raras implica el uso de reactivos costosos y energía intensiva, factores que se suman al desafío económico. Estos costos se ven amplificados por la baja concentración de tierras raras en los depósitos y su distribución geológicamente compleja, que demandan una extracción más intensiva y prolongada.

La necesidad de caracterización geológica avanzada también añade un componente financiero significativo. Los estudios geometalúrgicos detallados son esenciales para identificar las propiedades específicas de los yacimientos y personalizar las formulaciones de nanopartículas, pero implican inversiones considerables en términos de tiempo y recursos. Esto es particularmente relevante en yacimientos de gran escala o con alta variabilidad mineralógica, donde la implementación de NTRs debe ajustarse a condiciones geológicas específicas para garantizar su eficacia.

Otro aspecto crítico es la infraestructura requerida para integrar las NTRs en procesos mineros existentes. Esto incluye la modificación de plantas de procesamiento, la capacitación del personal y la adquisición de tecnología adicional para monitorear y optimizar el rendimiento de las nanopartículas. Estas inversiones iniciales, aunque necesarias, pueden representar un obstáculo para su adopción, especialmente para pequeñas y medianas empresas mineras que operan con presupuestos más ajustados.

A pesar de estos desafíos, los beneficios económicos a largo plazo, como la reducción de costos operativos y el aumento en la recuperación de metales valiosos, pueden compensar las inversiones iniciales. Sin embargo, lograr este equilibrio requiere estrategias claras que incluyan la colaboración entre la industria minera, instituciones académicas y el gobierno para fomentar la innovación tecnológica y reducir los costos asociados.

Regulación y políticas

El desarrollo y uso de nanopartículas de tierras raras (REE-NP) en la minería chilena está limitado por la falta de un marco regulatorio claro que contemple los riesgos y beneficios asociados a esta tecnología emergente. A pesar de los avances científicos y las aplicaciones prácticas de las NTRs, la regulación en Chile aún no ha evolucionado para abarcar las especificidades de los nanomateriales, lo que genera incertidumbre tanto para las empresas mineras como para las comunidades afectadas.

Uno de los principales desafíos es la ausencia de normativas específicas que regulen el manejo, almacenamiento y disposición final de las NTRs. Sin lineamientos claros, las empresas enfrentan dificultades para garantizar el uso seguro de estas partículas en sus operaciones, lo que aumenta el riesgo de accidentes ambientales y sociales. Esta carencia también dificulta el monitoreo de su impacto a largo plazo, ya que no existen requisitos establecidos para evaluar su persistencia o toxicidad en el ambiente.

A nivel internacional, países como Estados Unidos y miembros de la Unión Europea han comenzado a desarrollar regulaciones específicas para nanomateriales, incluyendo requisitos de etiquetado, estudios de impacto y protocolos de manejo seguro. Sin embargo, Chile aún no ha adoptado medidas similares, lo que deja al país rezagado en términos de estándares globales y limita su capacidad para competir en mercados internacionales donde estas normativas son cada vez más exigentes.

Otro aspecto crítico es la falta de coordinación entre las instituciones gubernamentales responsables de supervisar la minería y el medio ambiente. La ausencia de un enfoque integrado impide la creación de políticas que aborden de manera holística los riesgos y beneficios de las NTRs. Esto se agrava por la limitada capacitación técnica de los organismos reguladores, que carecen de herramientas y conocimientos especializados para evaluar tecnologías basadas en nanomateriales.

Además, las comunidades locales y las organizaciones sociales han expresado preocupación por los posibles impactos de las NTRs en la salud humana y el medio ambiente. Sin regulaciones que garanticen la transparencia y la responsabilidad empresarial, estas preocupaciones pueden intensificar la resistencia social a proyectos que involucren el uso de nanomateriales, dificultando la obtención de la licencia social para operar.

Para superar estos desafíos, es fundamental que Chile desarrolle un marco regulatorio que considere las particularidades de los nanomateriales en el contexto de la minería. Esto incluye la implementación de estándares específicos para el manejo de NTRs, la promoción de estudios científicos independientes que evalúen sus riesgos y

beneficios, y la creación de mecanismos de monitoreo que permitan evaluar su impacto a largo plazo. Asimismo, es necesario fomentar la cooperación internacional para adoptar mejores prácticas y garantizar que las regulaciones chilenas estén alineadas con los estándares globales.

Dependencia del mercado

La dependencia del mercado internacional para el suministro de NTRs y de los materiales necesarios para su producción representa un desafío significativo para la minería chilena. Actualmente, la mayor parte de la producción global de tierras raras está concentrada en un número limitado de países, siendo China el principal productor y exportador. Esta concentración genera vulnerabilidades económicas y estratégicas para las operaciones mineras en Chile, que deben competir en un mercado global caracterizado por fluctuaciones en precios y disponibilidad.

Uno de los problemas más críticos es la inestabilidad en el suministro de tierras raras, que puede ser influenciada por factores geopolíticos, políticas de exportación restrictivas y fluctuaciones en la demanda global. Estas incertidumbres afectan directamente los costos operativos y la planificación a largo plazo de las empresas mineras que dependen de NTRs para optimizar sus procesos. Además, la concentración del mercado limita la capacidad de negociación de las empresas chilenas, que enfrentan mayores costos debido a la falta de proveedores alternativos.

La falta de infraestructura local para la producción y procesamiento de tierras raras también agrava este desafío. Aunque Chile cuenta con recursos minerales significativos, como cobre y litio, aún no ha desarrollado una industria que permita la extracción y procesamiento eficiente de tierras raras. Esta dependencia de mercados extranjeros no solo incrementa los costos de implementación de tecnologías basadas en nanopartículas, sino que también limita la capacidad del país para aprovechar plenamente los beneficios económicos de estas tecnologías.

Otro aspecto relevante es la creciente competencia global por el acceso a tierras raras, impulsada por el aumento en la demanda de tecnologías avanzadas como vehículos eléctricos, energías renovables y dispositivos electrónicos. Esta competencia puede aumentar aún más los precios y dificultar el acceso a materiales esenciales para la producción de NTRs, afectando la sostenibilidad económica de las operaciones mineras en Chile.

Para mitigar esta dependencia, es crucial que Chile invierta en el desarrollo de capacidades locales para la producción y procesamiento de tierras raras. Esto incluye

la promoción de investigaciones para identificar depósitos potenciales, el establecimiento de plantas piloto para el procesamiento de tierras raras y la creación de alianzas internacionales que permitan transferencias tecnológicas y acceso a mercados más diversificados. Asimismo, es fundamental fomentar políticas públicas que incentiven la inversión en esta área estratégica, reduciendo la dependencia de mercados externos y fortaleciendo la soberanía tecnológica del país.

Reciclaje y sostenibilidad

El reciclaje y la sostenibilidad representan desafíos cruciales en la implementación de NTRs en la minería chilena, debido a la complejidad de su ciclo de vida y a las implicancias ambientales asociadas a su manejo. Aunque las nanopartículas ofrecen beneficios significativos en términos de eficiencia y reducción de impactos, su gestión sostenible requiere enfoques integrales que aborden tanto la generación de residuos como su reutilización.

Uno de los principales retos radica en la falta de estrategias efectivas para el reciclaje de éstas una vez utilizadas en los procesos mineros. Las nanopartículas, debido a su pequeño tamaño y alta reactividad, son difíciles de recuperar de los flujos residuales, como relaves y aguas procesadas. Esta dificultad aumenta el riesgo de que las partículas se dispersen en el medio ambiente, generando impactos negativos a largo plazo.

Además, la integración de las NTRs en matrices complejas, como minerales de baja ley o residuos sólidos, dificulta su separación y recuperación. En muchos casos, los métodos tradicionales de reciclaje no son aplicables, lo que exige el desarrollo de tecnologías innovadoras que permitan extraer y reutilizar estas partículas de manera eficiente. Estas tecnologías deben ser económicamente viables y ambientalmente seguras para garantizar su adopción a gran escala.

Otro desafío importante es la falta de normativas específicas que regulen la disposición final de los residuos que contienen nanopartículas. En Chile, la gestión de residuos mineros sigue enfocada principalmente en materiales convencionales, como metales y relaves, dejando una brecha regulatoria para los nanomateriales. Esta ausencia de directrices claras dificulta la implementación de prácticas sostenibles y limita la capacidad de las empresas para garantizar un manejo adecuado de los residuos.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, también es crucial considerar el impacto ambiental asociado a la producción de nanopartículas. La síntesis NTRs implica

procesos energéticamente intensivos y el uso de reactivos químicos, lo que contribuye a la generación de emisiones de carbono y residuos peligrosos. La adopción de tecnologías más limpias para su producción es esencial para reducir su huella ambiental y alinearse con los objetivos globales de sostenibilidad.

Desventajas de las nanopartículas de tierras raras en procesos mineros

La síntesis y aplicación de NTRs implica costos significativamente altos debido a la complejidad de los procesos químicos y tecnológicos necesarios para su fabricación. Estos costos incluyen el uso de reactivos especializados, equipos avanzados y energía intensiva, lo que incrementa los gastos operativos de las empresas mineras. Además, las NTRs son hasta 6.2 veces más costosas que otros colectores utilizados en la industria, lo que agrava el desafío económico. La falta de infraestructura local para la producción de NTRs en Chile obliga a depender de importaciones, añadiendo costos de transporte y fluctuaciones en los precios internacionales.

2. Falta de normativas específicas

La ausencia de regulaciones claras y específicas para las NTRs en Chile representa una desventaja tanto para su implementación como para su manejo seguro. Sin un marco normativo adecuado, las empresas enfrentan incertidumbres legales y operativas, lo que puede retrasar la adopción de estas tecnologías. Esto también dificulta el desarrollo de estrategias de manejo y disposición final de residuos, incrementando los riesgos ambientales. La falta de reactivos radio-trazadores para medir la eficiencia de los procesos relacionados con NTRs también limita el monitoreo y control de su impacto.

3. Impactos ambientales y nanotóxicos

A pesar de sus beneficios, las NTRs presentan riesgos ambientales relacionados con su persistencia en el medio y su potencial bioacumulación en organismos vivos. Su tamaño nanométrico facilita su dispersión en el aire, agua y suelo, donde pueden interactuar con ecosistemas sensibles. Además, los efectos nanotóxicos de estas partículas, aunque poco estudiados, plantean preocupaciones sobre su impacto a largo plazo en la biodiversidad y la salud humana. La falta de estudios específicos sobre cómo los óxidos con alta solubilidad (>10 ppm) afectan los recursos hídricos y ecosistemas añade incertidumbre sobre su seguridad.

4. Dificultades en el reciclaje y recuperación

El reciclaje de NTRs una vez utilizadas en procesos mineros es complejo debido a su pequeño tamaño, alta reactividad y integración en matrices complejas. Actualmente, no existen tecnologías eficientes y económicamente viables para la recuperación de estas partículas de flujos residuales o relaves, lo que genera pérdidas económicas y riesgos ambientales asociados a su dispersión. Además, la presencia de nanopartículas en los relaves puede aumentar hasta en un 60% el contenido de tierras raras en estos desechos, complicando aún más su manejo.

5. Complejidad técnica para su implementación

La integración de REE-NP en procesos mineros requiere adaptaciones significativas en las plantas de procesamiento, así como capacitación especializada para el personal. Estas exigencias técnicas aumentan los costos iniciales y complican su adopción en empresas mineras de pequeña y mediana escala, que disponen de recursos limitados para inversiones en innovación tecnológica. Adicionalmente, la capacidad de adsorción de las NTRs es inferior a la de algunas especies de lantánidos presentes en los minerales, lo que incrementa el consumo de reactivos espumantes al inicio de los procesos de flotación.

6. Dependencia del mercado internacional

La producción global de tierras raras está concentrada en unos pocos países, principalmente China, lo que genera vulnerabilidades económicas para las operaciones mineras que dependen de NTRs. Las fluctuaciones en precios y disponibilidad pueden afectar la sostenibilidad de las operaciones, especialmente en un contexto de creciente competencia internacional por estos recursos.

7. Falta de datos sobre efectos a largo plazo

Los estudios actuales sobre el comportamiento y los impactos de las REE-NP son limitados, lo que genera incertidumbres sobre su seguridad y eficacia a largo plazo. Esta falta de datos dificulta la toma de decisiones informadas y limita la confianza de las partes interesadas, incluyendo comunidades locales, reguladores y empresas. La ausencia de investigaciones sobre el comportamiento de NTRs en la etapa de magnetita y su interacción con otros colectores también representa una barrera técnica.

IX. Consideraciones de Seguridad y Regulación

Políticas y regulaciones en Chile y a nivel global

La regulación de las nanopartículas de tierras raras en Chile aún se encuentra en etapas iniciales, lo que genera desafíos tanto para las empresas mineras como para las autoridades encargadas de supervisar su implementación. Actualmente, no existen políticas específicas que regulen el manejo, almacenamiento y disposición de NTRs, dejando un vacío normativo que dificulta su uso seguro y sostenible.

En el ámbito global, países como Estados Unidos, miembros de la Unión Europea y Japón han comenzado a desarrollar lineamientos específicos para los nanomateriales, incluyendo requisitos de etiquetado, monitoreo ambiental y evaluación de riesgos. Estas normativas buscan mitigar los impactos ambientales y proteger la salud humana frente a los riesgos asociados con las nanopartículas. Por ejemplo, la Unión Europea incluye las NTRs en su marco regulatorio REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas), que establece directrices para la evaluación de riesgos y el manejo seguro de nanomateriales.

En Chile, la regulación de los residuos mineros está diseñada principalmente para materiales convencionales, como metales y relaves, lo que deja una brecha en la gestión específica de nanomateriales. Además, las normativas actuales no contemplan los efectos nanotóxicos potenciales ni los riesgos asociados a la dispersión de partículas en el aire y el agua. Esta carencia subraya la necesidad de adoptar estándares internacionales y desarrollar regulaciones nacionales que aborden las particularidades de las NTRs.

Para avanzar en este ámbito, es crucial que Chile fomente la colaboración entre instituciones gubernamentales, la industria minera y centros de investigación. La creación de políticas integradas que consideren tanto los beneficios como los riesgos de las NTRs permitirá garantizar su uso seguro y maximizar su contribución al desarrollo sostenible del sector minero.

Normativas específicas para la gestión de las nanopartículas de tierras raras

El manejo de las nanopartículas de tierras raras requiere normativas específicas que aborden su ciclo de vida completo, desde la producción hasta la disposición final. Estas normativas deben incluir:

1. **Manejo y almacenamiento seguro:**

- Directrices sobre las condiciones de almacenamiento, incluyendo medidas para prevenir la liberación accidental de nanopartículas al medio ambiente.
- Protocolos de seguridad para minimizar la exposición de los trabajadores a las NTRs durante su manipulación.

2. Transporte y etiquetado:

- Requisitos para el etiquetado claro y detallado de los contenedores que almacenen NTRs, indicando sus propiedades fisicoquímicas y riesgos asociados.
- Normativas para el transporte seguro, con énfasis en la prevención de derrames o liberaciones accidentales durante el traslado.

3. Disposición de residuos:

- Regulaciones para la disposición de residuos que contengan NTRs, priorizando métodos que reduzcan su persistencia y toxicidad en el medio ambiente.
- Promoción de tecnologías de reciclaje y reutilización para minimizar la generación de residuos.

4. Monitoreo ambiental y evaluación de riesgos:

- Implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real para evaluar la presencia de NTRs en aire, agua y suelo.
- Evaluaciones periódicas de los riesgos asociados con las NTRs, incluyendo su potencial nanotóxico y bioacumulativo.

5. Capacitación y sensibilización:

- Programas de formación para los trabajadores mineros sobre el manejo seguro de NTRs.
- Campañas de sensibilización para las comunidades locales sobre los beneficios y riesgos asociados a estas tecnologías.

La adopción de estas normativas específicas no solo permitirá mitigar los riesgos ambientales y de salud asociados a las NTRs, sino que también fortalecerá la confianza de las partes interesadas en su implementación, fomentando una minería más segura y sostenible.

Marco Regulatorio Chileno

El marco normativo chileno en torno a la minería de tierras raras presenta importantes limitaciones que afectan tanto la exploración como la explotación y el procesamiento local de estos elementos. Algunos puntos clave incluyen:

1. Constitución y Propiedad Minera:

- La Constitución chilena establece que el Estado es el propietario absoluto de todas las minas, pero excluye las arcillas superficiales del dominio estatal. Este aspecto es especialmente relevante porque muchas tierras raras se encuentran en este tipo de formaciones.
- La Ley 18.097, orgánica constitucional sobre concesiones mineras, no soluciona el problema de propiedad de las tierras raras contenidas en arcillas superficiales, lo que genera vacíos jurídicos y posibles conflictos judiciales.

2. Sustancias Concesibles y No Concesibles:

- Las tierras raras, al estar contenidas en arcillas superficiales, no son consideradas concesibles bajo el marco normativo actual, a menos que se encuentren en relaves o residuos abandonados. Esto limita su explotación dentro del régimen convencional de concesiones mineras.

3. Impacto de los Relaves:

- La Ley 20.551 y el Decreto Supremo 248 regulan el manejo y cierre de relaves, pero no contemplan el reprocesamiento específico para recuperar tierras raras.
- La definición de "tratamiento" y "operación" de relaves excluye explícitamente procesos de reprocesamiento orientados a la recuperación de valor económico.

4. Desafíos Ambientales:

- El marco normativo actual enfrenta críticas por no garantizar adecuadamente la sostenibilidad ambiental del procesamiento local de tierras raras. Los proyectos deben cumplir con numerosas normativas, incluidas las de evaluación de impacto ambiental, pero faltan lineamientos específicos para estos elementos.

5. Propuestas de Reforma:

- Modificar la Constitución para eliminar la excepción de dominio privado sobre las arcillas superficiales o introducir una cláusula especial en caso de concentraciones significativas de tierras raras.
- Reformar la Ley 18.097 y el Código de Minería para adaptarlos a las particularidades de la minería de tierras raras.
- Actualizar el Decreto Supremo 248 y la Ley 20.551 para promover el reprocesamiento de relaves como materia prima de valor.

6. Economía Circular y Minería Secundaria:

- El Plan Nacional de Depósitos de Relaves de 2020 promueve la economía circular, pero carece de un enfoque específico en tierras raras. Las guías de gestión existentes requieren revisiones para abordar estos desafíos (Reveco 2022).

X. Perspectivas futuras y conclusiones

Potencialidades y limitaciones futuras de las nanopartículas de tierras raras en minería

Las tierras raras tienen un gran potencial en la gran minería en la República de Chile, dado que el país cuenta con recursos naturales abundantes y una infraestructura minera sólida. Chile posee depósitos de tierras raras, especialmente en regiones como Atacama y Antofagasta, donde se han identificado recursos en salares y otras formaciones geológicas. Siendo Chile es líder mundial en minería, cuenta con una infraestructura desarrollada que incluye transporte, logística y experiencia técnica, lo que facilita la exploración y extracción de minerales, incluidas las tierras raras. Por otro lado la inversión en tecnologías extractivas y en investigación podría incrementar la producción de tierras raras, lo que sumado a que el interés internacional por estos elementos está creciendo, significa la posibilidad de atraer capital extranjero.

Las NTRs ofrecen un amplio espectro de oportunidades en la minería y el desarrollo tecnológico. Estas nanopartículas poseen propiedades únicas, como alta capacidad de adsorción, conductividad térmica y eléctrica, y reactividad superficial, que pueden revolucionar los procesos de extracción y procesamiento de minerales. En el ámbito minero, su aplicación se proyecta en áreas como la mejora de la eficiencia en la

lixiviación de minerales, la recuperación selectiva de tierras raras y la reducción de impactos ambientales al sustituir reactivos químicos convencionales por procesos más sostenibles (Jouini et al., 2022; Martin & Iles, 2020).

Sin embargo, las limitaciones asociadas con las NTRs también son significativas. Entre los desafíos más destacados se encuentran los altos costos de producción, la necesidad de infraestructura avanzada para su fabricación y manejo, y los riesgos potenciales para la salud y el medio ambiente debido a su reactividad y toxicidad en ciertos contextos (Henriques & Böhm, 2022; Jouini et al., 2022). Además, la regulación de su uso aún está en desarrollo en muchas regiones, lo que limita su implementación a gran escala. Es crucial avanzar en investigaciones que optimicen su producción y evalúen sus impactos a largo plazo para maximizar sus beneficios en la minería y minimizar los riesgos asociados (Martin & Iles, 2020).

Oportunidad Económica para Chile en la Minería de Tierras Raras

Situación Actual de la Minería de Tierras Raras en Chile

En Chile, la minería de tierras raras es un sector emergente con gran potencial, pero que aún enfrenta numerosos desafíos. Desde 2016, cuando el Plan Nacional de Geología del Servicio Nacional de Geología y Minería incluyó a las tierras raras en sus análisis, se han identificado zonas con recursos potenciales, principalmente en la Cordillera de la Costa, en las regiones de Atacama y Biobío. Sin embargo, no existen proyectos operativos consolidados (Reveco 2022).

Potencial Económico del Reprocesamiento de Relaves Mineros

Chile cuenta con 757 tranques de relaves, de los cuales aproximadamente el 14 % están activos, el 63 % inactivos y el 23 % abandonados. Estos representan un potencial significativo para la minería secundaria. Se estima que solo reprocesar un 10 % de los relaves podría incrementar el PIB del país en más de un 1 %, según datos del Ministerio de Minería. Además, los relaves contienen elementos críticos, incluidas tierras raras, que podrían generar un valor agregado considerable si se procesan localmente.

La economía circular emerge como un pilar estratégico en este contexto, promoviendo el reprocesamiento y reutilización de estos residuos mineros. A pesar de su potencial, el desarrollo de esta actividad enfrenta limitaciones tecnológicas, regulatorias y de capital humano especializado (Reveco 2022).

Beneficios Projectados para el PIB mediante Minería Secundaria

El desarrollo de la minería secundaria en Chile, especialmente el reprocesamiento de relaves para extraer tierras raras, podría generar impactos significativos en la economía nacional. Además del incremento directo del PIB, esta actividad contribuiría a:

- Reducir pasivos ambientales, transformando los residuos en recursos valiosos.
- Generar empleos especializados en tecnologías avanzadas de procesamiento.
- Diversificar la matriz minera chilena, disminuyendo la dependencia del cobre y aumentando la competitividad en mercados tecnológicos globales.

Perspectivas Futuras para Chile

El potencial de las tierras raras y las nanopartículas derivadas de éstas en Chile ofrece una oportunidad estratégica para el desarrollo de industrias tecnológicas, de electromovilidad y energías renovables. Entre las perspectivas clave están:

1. **Diversificación Minera:** Chile puede posicionarse como un actor relevante en la producción de tierras raras, ampliando su portafolio minero con elementos críticos de alta demanda global.
2. **Desarrollo Tecnológico y Científico:** Promover la investigación aplicada en nanopartículas de tierras raras podría posicionar al país como un centro de innovación regional en materiales avanzados.
3. **Sostenibilidad Ambiental:** La incorporación de economía circular y tecnologías limpias en el reprocesamiento de relaves puede mitigar impactos ambientales, generando una minería más sostenible.
4. **Atracción de Inversiones:** Un marco normativo robusto y adaptado a las particularidades de la minería de tierras raras podría atraer inversiones extranjeras directas, especialmente de países con experiencia en esta área como China, Estados Unidos y Australia.
5. **Fortalecimiento de Políticas Públicas:** Reformas regulatorias y la promoción de asociaciones público-privadas son esenciales para catalizar el desarrollo de este sector, asegurando beneficios económicos y sociales a largo plazo.

Chile tiene la oportunidad de liderar en América Latina la exploración, explotación y procesamiento de tierras raras, integrando tecnologías avanzadas y sostenibilidad ambiental para maximizar el valor económico y social de estos recursos (Reveco 2022).

Resumen de hallazgos y sugerencias para futuras investigaciones

La revisión de la literatura y los análisis realizados destacan varios puntos clave sobre el estado actual y las perspectivas de las tierras raras y las nanopartículas en la minería:

1. Hallazgos principales:

- Las tierras raras son fundamentales para el desarrollo de tecnologías verdes y avanzadas, como turbinas eólicas, vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos (Jouini et al., 2022; Martin & Iles, 2020).
- Chile posee un potencial significativo en recursos de litio y tierras raras, aunque enfrenta desafíos técnicos y ambientales para su explotación sostenible (Henriques & Böhm, 2022; Jouini et al., 2022).
- Las NPs-REEs presentan una capacidad prometedora para transformar los procesos mineros hacia prácticas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente (Martin & Iles, 2020).

2. Sugerencias para futuras investigaciones:

- Realizar estudios más detallados sobre la distribución geológica de tierras raras en Chile, con énfasis en depósitos no convencionales y subutilizados (Henriques & Böhm, 2022).
- Desarrollar metodologías avanzadas para la síntesis y aplicación de NPs-REEs en procesos mineros, optimizando su costo-beneficio (Jouini et al., 2022).
- Evaluar de manera integral los impactos toxicológicos y ambientales de las NPs-REEs para garantizar su uso seguro y sostenible (Martin & Iles, 2020).
- Fortalecer la cooperación internacional para compartir conocimientos y tecnologías, enfocándose en la economía circular y la recuperación de tierras raras de fuentes secundarias (Henriques & Böhm, 2022).
- Promover marcos regulatorios claros y específicos para el manejo de NPs-REEs, que consideren tanto su potencial como sus riesgos (Jouini et al., 2022).

El desarrollo de las tierras raras y sus aplicaciones en la minería requiere un enfoque equilibrado que combine innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y regulación efectiva. Estas acciones no solo contribuirán al progreso de la minería en Chile, sino también al fortalecimiento de su papel en la transición energética global (Martin & Iles, 2020; Jouini et al., 2022).

Referencias

- Ahmadi, Mohammad H., Mahyar Ghazvini, Mohammad Alhuyi Nazari, Mohammad Ali Ahmadi, Fathollah Pourfayaz, Giulio Lorenzini, and Tingzhen Ming. 2019. 'Renewable Energy Harvesting with the Application of Nanotechnology: A Review'. *International Journal of Energy Research* 43(4):1387–1410.
- Akah, Aaron. 2023. 'Role of Rare Earths as Catalysts in the Chemical, Petroleum and Transportation Industries'. in *Rare Earth Metals and Minerals Industries: Status and Prospects*.
- Algora Weber, María Dolores. 2020. *EL IMPACTO GEOPOLÍTICO DE LAS TIERRAS RARAS EN EL ORDEN INTERNACIONAL*.
- Al-Kattan, Ahmed, Yury V. Ryabchikov, Tarek Baati, Vladimir Chirvony, Juan F. Sánchez-Royo, Marc Sentis, Diane Braguer, Victor Yu. Timoshenko, Marie-Anne Estève, and Andrei V. Kabashin. 2016. 'Ultrapure Laser-Synthesized Si Nanoparticles with Variable Oxidation States for Biomedical Applications'. *Journal of Materials Chemistry B* 4(48):7852–58. doi: 10.1039/C6TB02623K.
- Alqedra, Mohammed K., Chetan Deshmukh, Shuping Liu, Diana Serrano, Sebastian P. Horvath, Safi Rafie-Zinedine, Abdullah Abdelatif, Lars Rippe, Stefan Kröll, Bernardo Casabone, Alban Ferrier, Alexandre Tallaire, Philippe Goldner, Hugues De Riedmatten, and Andreas Walther. 2023. 'Optical Coherence Properties of Kramers' Rare-Earth Ions at the Nanoscale for Quantum Applications'. *Physical Review B* 108(7). doi: 10.1103/PhysRevB.108.075107.
- Ambaye, Teklit Gebregiorgis, Mentore Vaccari, Francine Duarte Castro, Shiv Prasad, and Sami Rtimi. 2020. 'Emerging Technologies for the Recovery of Rare Earth Elements (REEs) from the End-of-Life Electronic Wastes: A Review on Progress, Challenges, and Perspectives'. *Environmental Science and Pollution Research* 27(29):36052–74.
- Arbab, Ali S. 2011. *Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis, Surface Engineering, Cytotoxicity and Biomedical Applications*.
- Bedoya Londoño, Jheyson Andres. 2022. *Estudio Conceptual Con Simulación Geoestadística Para Valorar Blancos de Exploración de Elementos de Tierras Raras (REE) En El Departamento de Antioquia, Colombia*.
- Bhatti, Rashid, Hadia Shakeel, Kausar Malik, Muhammad Qasim, Mohsin Ahmad Khan, Nadeem Ahmed, and Shajia Jabeen. 2022. 'Inorganic Nanoparticles: Toxic Effects, Mechanisms of Cytotoxicity and Phytochemical Interactions'. *Advanced Pharmaceutical Bulletin* 12(4).
- Biju, Vasudevanpillai, Tamitake Itoh, Abdulaziz Anas, Athiyanathil Sujith, and Mitsuru Ishikawa. 2008a. 'Semiconductor Quantum Dots and Metal Nanoparticles: Syntheses, Optical Properties, and Biological Applications'. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 391(7):2469–95. doi: 10.1007/s00216-008-2185-7.

- Biju, Vasudevanpillai, Tamitake Itoh, Abdulaziz Anas, Athiyanathil Sujith, and Mitsuru Ishikawa. 2008b. 'Semiconductor Quantum Dots and Metal Nanoparticles: Syntheses, Optical Properties, and Biological Applications'. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 391(7):2469–95. doi: 10.1007/s00216-008-2185-7.
- Bil, Damián. 2024. *APROXIMACIÓN A LA DINÁMICA EXPORTADORA DE AUSTRALIA RECIENTE. UN EJERCICIO DE COMPARACIÓN CON ARGENTINA*.
- Bouzigues, Cedric, Thierry Gacoin, and Antigoni Alexandrou. 2011a. 'Biological Applications of Rare-Earth Based Nanoparticles'. *ACS Nano* 5(11):8488–8505.
- Bouzigues, Cedric, Thierry Gacoin, and Antigoni Alexandrou. 2011b. 'Biological Applications of Rare-Earth Based Nanoparticles'. *ACS Nano* 5(11):8488–8505.
- British Geological Survey. 2011. *Rare Earth Elements*.
- Burcher-Jones, Cody, Sfiso Mkhize, Megan Becker, Rahul Ram, and Jochen Petersen. 2018. 'Study of the Deposition of REEs in Ion Adsorption Clays Towards the Development of an In Situ Leaching Strategy'. Pp. 2429–39 in.
- Chomón Pérez, Juan Manuel. 2023. *La Era de Las Tierras Raras: La Cruzada Geopolítica Por Los Metales Estratégicos*. Tecnos.
- Cotton, Simon. 2006. *Lanthanide and Actinide Chemistry*. Wiley.
- Deng, Yang, and Renzun Zhao. 2015. 'Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment'. *Current Pollution Reports* 1(3):167–76.
- Dou, Xinyu, Jin Liu, Xuan Gong, Haoqing Jiang, and Hexiang Deng. 2022. 'Laser Driven Conversion of MOFs to Rare Earth Metal Oxide Nanoparticles'. *APL Materials* 10(4). doi: 10.1063/5.0085497.
- Ealías, Anu Mary, and M. P. Saravanakumar. 2017. 'A Review on the Classification, Characterisation, Synthesis of Nanoparticles and Their Application'. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 263.
- Zappettini, Eduardo O. 2022. *Serie Contribuciones Técnicas Recursos Minerales N° 48*.
- Egbuna, Chukwuebuka, Vijaykumar K. Parmar, Jaison Jeevanandam, Shahira M. Ezzat, Kingsley C. Patrick-Iwuanyanwu, Charles Oluwaseun Adetunji, Johra Khan, Eugene N. Onyeike, Chukwuemelie Zedech Uche, Muhammad Akram, Mervat S. Ibrahim, Nihal M. El Mahdy, Chinaza Godswill Awuchi, Kaliyaperumal Saravanan, Habibu Tijjani, Uchenna Estella Odoh, Mohammed Messaoudi, Jonathan C. Ifemeje, Michael C. Olisah, Nebechi Jane Ezeofor, Chukwudi Jude Chikwendu, and Chinwe Gloria Ibeabuchi. 2021. 'Toxicity of Nanoparticles in Biomedical Application: Nanotoxicology'. *Journal of Toxicology* 2021.
- Escudero, Alberto, Ana I. Becerro, Carolina Carrillo-Carrión, Nuria O. Núñez, Mikhail V. Zyuzin, Mariano Laguna, Daniel González-Mancebo, Manuel Ocaná, and Wolfgang J. Parak. 2017a. 'Rare Earth Based Nanostructured Materials: Synthesis, Functionalization, Properties and Bioimaging and Biosensing Applications'. *Nanophotonics* 6(5):881–921.

- Escudero, Alberto, Ana I. Becerro, Carolina Carrillo-Carrión, Nuria O. Núñez, Mikhail V. Zyuzin, Mariano Laguna, Daniel González-Mancebo, Manuel Ocanã, and Wolfgang J. Parak. 2017b. 'Rare Earth Based Nanostructured Materials: Synthesis, Functionalization, Properties and Bioimaging and Biosensing Applications'. *Nanophotonics* 6(5):881–921.
- Escudero, Alberto, Carolina Carrillo-Carrión, Mikhail V. Zyuzin, and Wolfgang J. Parak. 2016. 'Luminescent Rare-Earth-Based Nanoparticles: A Summarized Overview of Their Synthesis, Functionalization, and Applications'. *Topics in Current Chemistry* 374(4).
- Fajardo, Humberto V., Elson Longo, Luiz F. D. Probst, Antoninho Valentini, Neftalí L. V. Carreño, Michael R. Nunes, Adeilton P. Maclel, and Edson R. Leite. 2008. 'Influence of Rare Earth Doping on the Structural and Catalytic Properties of Nanostructured Tin Oxide'. *Nanoscale Research Letters* 3(5):194–99. doi: 10.1007/s11671-008-9135-3.
- Flores-Contreras, Elda A., Reyna Berenice González-González, José Juan Pablo Pizaña-Aranda, Lizeth Parra-Arroyo, Arath A. Rodríguez-Aguayo, Maricarmen Iñiguez-Moreno, Georgia María González-Meza, Rafael G. Araújo, Diana Ramírez-Gamboa, Roberto Parra-Saldivar, and Elda M. Melchor-Martínez. 2024. 'Agricultural Waste as a Sustainable Source for Nanoparticle Synthesis and Their Antimicrobial Properties for Food Preservation'. *Frontiers in Nanotechnology* 6.
- Golev, Artem, Margaretha Scott, Peter D. Erskine, Saleem H. Ali, and Grant R. Ballantyne. 2014a. 'Rare Earths Supply Chains: Current Status, Constraints and Opportunities'. *Resources Policy* 41(1):52–59. doi: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004.
- Golev, Artem, Margaretha Scott, Peter D. Erskine, Saleem H. Ali, and Grant R. Ballantyne. 2014b. 'Rare Earths Supply Chains: Current Status, Constraints and Opportunities'. *Resources Policy* 41(1):52–59. doi: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004.
- Gupta, C. K. ..., and N. .. Krishnamurthy. 2005. *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press.
- Gupta, Santosh K., K. Sudarshan, and R. M. Kadam. 2021a. 'Optical Nanomaterials with Focus on Rare Earth Doped Oxide: A Review'. *Materials Today Communications* 27. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102277.
- Gupta, Santosh K., K. Sudarshan, and R. M. Kadam. 2021b. 'Optical Nanomaterials with Focus on Rare Earth Doped Oxide: A Review'. *Materials Today Communications* 27. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102277.
- Guricová, Miroslava, Jan Pinc, Juraj Malinčík, Jakub Rak, Martin Kuchař, and Vilém Bartuněk. 2019. 'Rare Earth Nanofluorides: Synthesis Using Ionic Liquids'. *Reviews in Inorganic Chemistry* 39(2):77–90. doi: 10.1515/revic-2018-0016.
- Hamed, Mosaab M., Hasan Hüseyin Turan, and Sondoss Elsayah. 2024. 'Balancing Supply Diversification and Environmental Impacts: A System Dynamics Approach to de-Risk Rare Earths Supply Chain'. *Resources Policy* 92. doi: 10.1016/j.resourpol.2024.105038.

- Henriques, Irene, and Steffen Böhm. 2022. 'The Perils of Ecologically Unequal Exchange: Contesting Rare-Earth Mining in Greenland'. *Journal of Cleaner Production* 349. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131378.
- Hong, Enlv, Lumin Liu, Liming Bai, Chunhui Xia, Lei Gao, Liwen Zhang, and Baiqi Wang. 2019. 'Control Synthesis, Subtle Surface Modification of Rare-Earth-Doped Upconversion Nanoparticles and Their Applications in Cancer Diagnosis and Treatment'. *Materials Science and Engineering C* 105.
- Hossain, M. Khalid, Mohammad Hafez Ahmed, Md Ishak Khan, M. Sazal Miah, and Shahadat Hossain. 2021. 'Recent Progress of Rare Earth Oxides for Sensor, Detector, and Electronic Device Applications: A Review'. *ACS Applied Electronic Materials* 3(10):4255–83.
- Hossain, M. Khalid, Gazi A. Raihan, Md Ali Akbar, Mirza Humaun Kabir Rubel, Mohammad Hafez Ahmed, Md Ishak Khan, Shahadat Hossain, Sapan Kumar Sen, M. I. E. Jalal, and A. El-Denglawey. 2022. 'Current Applications and Future Potential of Rare Earth Oxides in Sustainable Nuclear, Radiation, and Energy Devices: A Review'. *ACS Applied Electronic Materials* 4(7):3327–53.
- Huang, Haiping, and Jun Jie Zhu. 2019. 'The Electrochemical Applications of Rare Earth-Based Nanomaterials'. *Analyst* 144(23):6789–6811.
- Ismael, Mohammed. 2023. 'Environmental Remediation and Sustainable Energy Generation via Photocatalytic Technology Using Rare Earth Metals Modified G-C3N4: A Review'. *Journal of Alloys and Compounds* 931.
- Issa, Bashar, Ihab M. Obaidat, Borhan A. Albiss, and Yousef Haik. 2013. 'Magnetic Nanoparticles: Surface Effects and Properties Related to Biomedicine Applications'. *International Journal of Molecular Sciences* 14(11).
- Jean-Claude G. Bunzli, and Vitalij K. Pecharsky. 2019. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. Vol. 56.
- Jia, Jian, Yanmin Wang, Meiling Xu, Mei li Qi, Yanling Wu, and Gang Zhao. 2020. 'MOF-Derived the Direct Z-Scheme g-C3N4/TiO2 with Enhanced Visible Photocatalytic Activity'. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 93(1):123–30. doi: 10.1007/s10971-019-05172-3.
- Joudeh, Nadeem, and Dirk Linke. 2022. 'Nanoparticle Classification, Physicochemical Properties, Characterization, and Applications: A Comprehensive Review for Biologists'. *Journal of Nanobiotechnology* 20(1).
- Kaningini, Amani Gabriel, Aluwani Mutanwa Nelwamondo, Shohreh Azizi, Malik Maaza, and Keletso Cecilia Mohale. 2022. 'Metal Nanoparticles in Agriculture: A Review of Possible Use'. *Coatings* 12(10).
- Karmakar, Srinibas, Neng Wang, Sumanta Acharya, and Kerry M. Dooley. 2013. 'Effects of Rare-Earth Oxide Catalysts on the Ignition and Combustion Characteristics of Boron

Nanoparticles'. *Combustion and Flame* 160(12):3004–14. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.030.

Krishnamurthy, N. ., Gupta, C. K. ., 2016. 'Extractive Metallurgy of Rare Earths. CRC Press'.

Labrador-Páez, Lucía, Erving C. Ximendes, Paloma Rodríguez-Sevilla, Dirk H. Ortgies, Ueslen Rocha, Carlos Jacinto, Emma Martín Rodríguez, Patricia Haro-González, and Daniel Jaque. 2018. 'Core-Shell Rare-Earth-Doped Nanostructures in Biomedicine'. *Nanoscale* 10(27):12935–56.

Liu, Chunyan, Yi Hou, and Mingyuan Gao. 2014a. 'Are Rare-Earth Nanoparticles Suitable for in Vivo Applications?' *Advanced Materials* 26(40):6922–32. doi: 10.1002/adma.201305535.

Liu, Chunyan, Yi Hou, and Mingyuan Gao. 2014b. 'Are Rare-Earth Nanoparticles Suitable for in Vivo Applications?' *Advanced Materials* 26(40):6922–32. doi: 10.1002/adma.201305535.

Liu, Jian, Paul F. Martin, and B. Peter McGrail. 2021. 'Rare-Earth Element Extraction from Geothermal Brine Using Magnetic Core-Shell Nanoparticles-Techno-Economic Analysis'. *Geothermics* 89. doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101938.

Lu, An-Hui, E. L. Salabas, and Ferdi Schüth. 2007. 'Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application'. *Angewandte Chemie International Edition* 46(8):1222–44. doi: 10.1002/anie.200602866.

Lu, Yangfan, Jiang Li, Tian-Nan Ye, Yasukazu Kobayashi, Masato Sasase, Masaaki Kitano, and Hideo Hosono. 2018. 'Synthesis of Rare-Earth-Based Metallic Electride Nanoparticles and Their Catalytic Applications to Selective Hydrogenation and Ammonia Synthesis'. *ACS Catalysis* 8(12):11054–58. doi: 10.1021/acscatal.8b03743.

Lutz, Thomas, Lucile Veissier, Philip J. T. Woodburn, Rufus L. Cone, Paul E. Barclay, Wolfgang Tittel, and Charles W. Thiel. 2018. 'Modification of Relaxation Dynamics in Tb³⁺: Y₃Al₅O₁₂ Nanopowders'. *Physical Review B* 98(5). doi: 10.1103/PhysRevB.98.054308.

Mahmud, Md Zobair Al. 2023. 'A Concise Review of Nanoparticles Utilized Energy Storage and Conservation'. *Journal of Nanomaterials* 2023.

Mathew, S., Amit D. Saran, Bishwajeet Singh Bhardwaj, Santhi Ani Joseph, P. Radhakrishnan, V. P. N. Nampoore, C. P. G. Vallabhan, and Jayesh R. Bellare. 2012. 'Size Dependent Optical Properties of the CdSe-CdS Core-Shell Quantum Dots in the Strong Confinement Regime'. *Journal of Applied Physics* 111(7). doi: 10.1063/1.3702430.

Moldoveanu, Georgiana A., and Vladimiro G. Papangelakis. 2012. 'Recovery of Rare Earth Elements Adsorbed on Clay Minerals: I. Desorption Mechanism'. *Hydrometallurgy* 117–118:71–78. doi: 10.1016/j.hydromet.2012.02.007.

Mor, Ori Ezra, Tal Ohana, Adrien Borne, Yael Diskin Posner, Maor Asher, Omer Yaffe, Abraham Shanzer, and Barak Dayan. 2021. 'Nanofibers Coated with Rare-Earth Complexes'.

- Mourdikoudis, Stefanos, Roger M. Pallares, and Nguyen T. K. Thanh. 2018. 'Characterization Techniques for Nanoparticles: Comparison and Complementarity upon Studying Nanoparticle Properties'. *Nanoscale* 10(27):12871–934. doi: 10.1039/C8NR02278J.
- Natalia E. Gómez Gabás. 2020. 'Consecuencias Geoestratégicas de La Hegemonía China En El Mercado de Las Tierras Raras'. *Global Strategy Reports*.
- Neil G. Connelly. 2005. *Nomenclature of Inorganic Chemistry (IUPAC Recommendations 2005)*.
- Obaidat, Ihab M., Bashar Issa, and Yousef Haik. 2014. 'Magnetic Properties of Magnetic Nanoparticles for Efficient Hyperthermia'. *Nanomaterials* 5(1).
- Oskam, Gerko, and Felipe de Jesús Peet Poot. 2006. 'Synthesis of ZnO and TiO₂ Nanoparticles'. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 37(3):157–60. doi: 10.1007/s10971-005-6620-3.
- Panov, Nikita, Riccardo Marin, and Eva Hemmer. 2018. 'Microwave-Assisted Solvothermal Synthesis of Upconverting and Downshifting Rare-Earth-Doped LiYF₄ Microparticles'. *Inorganic Chemistry* 57(23):14920–29. doi: 10.1021/acs.inorgchem.8b02697.
- Parashar, Mritunjaya, Vivek Kumar Shukla, and Ranbir Singh. 2020. 'Metal Oxides Nanoparticles via Sol–Gel Method: A Review on Synthesis, Characterization and Applications'. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 31(5):3729–49. doi: 10.1007/s10854-020-02994-8.
- Ram, Rahul, Megan Becker, Joël Brugger, Barbara Etschmann, Cody Burcher-Jones, Daryl Howard, Patricia J. Kooyman, and Jochen Petersen. 2019. 'Characterisation of a Rare Earth Element- and Zirconium-Bearing Ion-Adsorption Clay Deposit in Madagascar'. *Chemical Geology* 522:93–107. doi: 10.1016/j.chemgeo.2019.05.011.
- Ramprasad, C., Willis Gwenzi, Nhamo Chaukura, Nur Izyan Wan Azelee, Anushka Upamali Rajapaksha, M. Naushad, and S. Rangabhashiyam. 2022. 'Strategies and Options for the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements from Electrical and Electronic Waste'. *Chemical Engineering Journal* 442.
- Reveco, Rafael Plaza. 2022. 'Legal-Economic Incentives for Mining and Local Processing of Rare Earths'. *Revista de Derecho Ambiental(Chile)* 1(17):129–56. doi: 10.5354/0719-4633.2022.66408.
- Rezić, Iva. 2022. 'Nanoparticles for Biomedical Application and Their Synthesis'. *Polymers* 14(22):4961. doi: 10.3390/polym14224961.
- Reboredo, Ricardo Prego. 2021. 'Las Tierras Raras, Una Pieza Clave En El Puzle de La Energía'.
- Rosa Fernández. 2024. 'Distribución Porcentual de Tierras Raras Producidas a Nivel Mundial En 2023, Por Países'. *Statista*.
- Saviano, Lorenzo, Antonios Apostolos Brouziotis, Edith Guadalupe Padilla Suarez, Antonietta Siciliano, Marisa Spampinato, Marco Guida, Marco Trifuoggi, Donatella Del Bianco,

- Maurizio Carotenuto, Vincenzo Romano Spica, Giusy Lofrano, and Giovanni Libralato. 2023a. 'Catalytic Activity of Rare Earth Elements (REEs) in Advanced Oxidation Processes of Wastewater Pollutants: A Review'. *Molecules* 28(17).
- Saviano, Lorenzo, Antonios Apostolos Brouziotis, Edith Guadalupe Padilla Suarez, Antonietta Siciliano, Marisa Spampinato, Marco Guida, Marco Trifuoggi, Donatella Del Bianco, Maurizio Carotenuto, Vincenzo Romano Spica, Giusy Lofrano, and Giovanni Libralato. 2023b. 'Catalytic Activity of Rare Earth Elements (REEs) in Advanced Oxidation Processes of Wastewater Pollutants: A Review'. *Molecules* 28(17).
- Sebastián Palma. 2014. '¿Qué Son Las "Tierras Raras" y Por Qué Chile Se Posiciona Como Un Actor Clave Para Un Futuro Sostenible?' *La Tercera*.
- Serrano, Elena, Guillermo Rus, and Javier García-Martínez. 2009. 'Nanotechnology for Sustainable Energy'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9):2373–84.
- Shubayev, Veronica I., Thomas R. Pisanic, and Sungho Jin. 2009. 'Magnetic Nanoparticles for Theragnostics'. *Advanced Drug Delivery Reviews* 61(6).
- Skripka, Artiom, Vitalijus Karabanovas, Greta Jarockyte, Riccardo Marin, Vivienne Tam, Marta Cerruti, Ricardas Rotomskis, and Fiorenzo Vetrone. 2019. 'Decoupling Theranostics with Rare Earth Doped Nanoparticles'. *Advanced Functional Materials* 29(12). doi: 10.1002/adfm.201807105.
- Song, Hyo Won, Na Young Kim, Ji Eun Park, Jae Hyeon Ko, Robert J. Hickey, Yong Hyun Kim, and So Jung Park. 2017. 'Shape-Controlled Syntheses of Metal Oxide Nanoparticles by the Introduction of Rare-Earth Metals'. *Nanoscale* 9(8):2732–38. doi: 10.1039/c6nr07555j.
- Song, Xiaoyan, Nianduan Lu, Xuemei Liu, Qingmei Lu, Lixian Sun, Markus Rettenmayr, Fuxing Yin, Jiuxing Zhang, and Meiling Zhou. 2008. 'Preparation and Characterization of Nano Rare Earths'. *New Journal of Physics* 10. doi: 10.1088/1367-2630/10/2/023024.
- Srikant, Vipin Kumar Sharma, Vinod Kumar, Ravinder Singh Joshi, Sidharth Jain, and Pardeep Kumar. 2021. 'A Review of Recent Research on Rare Earth Particulate Composite Materials and Structures with Their Applications'. *Transactions of the Indian Institute of Metals* 74(11):2569–81.
- Trepka, Kai, and Ye Tao. 2020. 'Magnetic Characterization of Rare-Earth Oxide Nanoparticles'. *Applied Physics Letters* 117(12). doi: 10.1063/5.0023466.
- Valton Legrá, C. Elaine. 2021. 'Geopolítica y Geoeconomía: Una Visión Sistémica'.
- Wei, Peng, Shixin Zhao, Lei Zhuang, Hulei Yu, Yexia Qin, and Yanhui Chu. 2024. 'Chemical Co-Precipitation Synthesis of High-Entropy Rare-Earth Silicate Nanopowders'. *Journal of the American Ceramic Society* 107(5). doi: 10.1111/jace.19667.
- Xu, An Wu, Yuan Gao, and Han Qin Liu. 2002. 'The Preparation, Characterization, and Their Photocatalytic Activities of Rare-Earth-Doped TiO₂ Nanoparticles'. *Journal of Catalysis* 207(2):151–57. doi: 10.1006/jcat.2002.3539.

- Xu, Lili, Man Wang, Qing Chen, Jiajia Yang, Wubin Zheng, Guanglei Lv, Zewei Quan, and Chunxia Li. 2019. 'Rare Earth Hydroxide as a Precursor for Controlled Fabrication of Uniform β -NaYF₄ Nanoparticles: A Novel, Low Cost, and Facile Method'. *Molecules* 24(2). doi: 10.3390/molecules24020357.
- Yan, Qiuting, Xiaoyu Lin, Zhibiao Chen, and Zuliang Chen. 2023. 'Biosynthesis of Bionanomaterials Using *Bacillus Cereus* for the Recovery of Rare Earth Elements from Mine Wastewater'. *Journal of Environmental Management* 329. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117098.
- Yu, Hongyue, Wenxing Wang, Minchao Liu, Tiancong Zhao, Runfeng Lin, Mengmeng Hou, Yufang Kou, Liang Chen, Ahmed A. Elzatahry, Fan Zhang, Dongyuan Zhao, and Xiaomin Li. 2022. *Versatile Synthesis of Dendritic Mesoporous Rare Earth-Based Nanoparticles*. Vol. 8.
- Yu, Zhenfeng, Yuanyuan He, Timo Schomann, Kefan Wu, Yang Hao, Ernst Suidgeest, Hong Zhang, Christina Eich, and Luis J. Cruz. 2022. 'Rare-Earth-Metal (Nd³⁺, Ce³⁺ and Gd³⁺)-Doped CaF₂: Nanoparticles for Multimodal Imaging in Biomedical Applications'. *Pharmaceutics* 14(12). doi: 10.3390/pharmaceutics14122796.
- Zavorin, A. V., V. L. Kuznetsov, S. I. Moseenkov, Tsog-Ochir Tsendsuren, V. A. Volodin, P. S. Galkin, and A. V. Ishchenko. 2020. 'Chemical Vapor Deposition of Silicon Nanoparticles on the Surface of Multiwalled Carbon Nanotubes'. *Journal of Structural Chemistry* 61(4):617–27. doi: 10.1134/S0022476620040162.
- Zhan, Wangcheng, Yun Guo, Xueqing Gong, Yanglong Guo, Yanqing Wang, and Guanzhong Lu. 2014. 'Current Status and Perspectives of Rare Earth Catalytic Materials and Catalysis'. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis* 35(8):1238–50.
- Zhang, Hongtao, and Yongfeng Gao. 2023. 'Polymeric Materials for Rare Earth Elements Recovery'. *Gels* 9(10).
- Zhang, Qize, Stephen O'brien, and Jan Grimm. 2022. 'Biomedical Applications of Lanthanide Nanomaterials, for Imaging, Sensing and Therapy'. *Nanotheranostics* 6(2):184–94.
- Zhao, Zhihuan, Xiao Zhang, Jimin Fan, Dongfeng Xue, Bing Zhang, and Shu Yin. 2018. 'N-TiO₂/g-C₃N₄/Up-Conversion Phosphor Composites for the Full-Spectrum Light-Responsive DeNO_x Photocatalysis'. *Journal of Materials Science* 53(10):7266–78. doi: 10.1007/s10853-018-2056-3.