

Una perspectiva global de las tierras raras

A global perspective of rare earths

A. D. Toache-Pérez ^{a,*}, A. M. Bolarín-Miró ^b, F. Sánchez-De Jesús ^b, G. T. Lapidus-Lavine ^c

^a Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Tlaxcala, Instituto Politécnico Nacional, 90000, Tlaxcala, Tlaxcala, México.

^b Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^c Depto. Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana, Alc. Iztapalapa, 09340. Ciudad de México, México.

Resumen

Los elementos de tierras raras han sido considerados por diversos países como elementos críticos (Jowitt, Werner, Weng & Mudd, 2018) debido a su importancia tecnológica que impulsa al mundo moderno, además, aunque las tierras raras pueden encontrarse en la mayor parte del mundo, en la actualidad existe un desabasto a nivel mundial, debido a la cada vez menor cantidad de yacimientos minerales que pueden ser económicamente rentables para su extracción y producción. En este sentido, poco más del 50% de la cantidad de tierras raras que se comercializan a nivel mundial, provienen de China (Favot & Massarutto, 2019), quien ha creado un monopolio en la producción y exportación de dichos elementos, de igual manera es importante mencionar que aunque ciertos elementos de tierras raras son indispensables para las nuevas tecnologías, sus procesos de extracción generan gases y efluentes peligrosos para el medio ambiente y el ser humano, razón por la cual diversos países han implementado políticas que encarecen el procedimiento de producción de tierras raras, encaminando a buscar alternativas que sean amigables con el ambiente y al mismo tiempo sean económicamente rentables (Kalantzakos, 2020).

Palabras Clave:

Tierras raras, Elementos críticos, Extracción minera, Geopolíticas, Nuevas tecnologías.

Abstract

Rare earth elements have been considered by various countries as critical elements (Jowitt, Werner, Weng & Mudd, 2018), due to their technological importance that drives the modern world, in addition, although rare earths can be found in most of the world, there is currently a global shortage, due to the decreasing number of mineral deposits that can be economically profitable for their extraction and production. In this sense, little more than 50% of the amount of rare earths that are commercialized worldwide, come from China (Favot & Massarutto, 2019), which has created a monopoly in the production and export of said elements, in the same way it is important to mention that although certain elements of rare earths are essential for new technologies, their extraction processes generate gases and effluents that are dangerous for the environment and human beings, which is why various countries have implemented policies that make the production of rare earths more expensive, aiming to seek alternatives that are friendly to the environment and at the same time are economically profitable (Kalantzakos, 2020).

Keywords:

Rare earths, Critical elements, Mining extraction, Geopolitical, New technologies.

1. Introducción

En la actualidad existe una fuerte tendencia hacia las energías verdes y por lo tanto hacia el uso de tecnologías más eficientes y menos dañinas al medio ambiente y al ser humano (Cobelo-García et al., 2015). Sin duda alguna, para lograr este objetivo, es necesario el uso de materiales novedosos que permitan la transición a un futuro donde la prioridad será nuestro planeta y sus cuidados (Song, Fisher & Kwoh, 2019). En este sentido, los elementos de tierras raras (REEs, por sus siglas en inglés) son considerados como elementos o componentes críticos debido a su

protagonismo en la producción de tecnologías que impulsan al mundo moderno, las cuales incluyen la generación de energías renovables, la eficiencia energética, la electrónica y/o la industria aeroespacial (Cobelo-García et al., 2015; Ganguli & Cook, 2018).

Las tierras raras son en total 17 elementos, dentro de los cuales están los lantanidos (Z=57 hasta 71): Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometio (Pm), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disprobio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb), Lutecio (Lu), y por último el Itrio (Y, Z= 39) y el Escandio (Sc= 21) (Balaram, 2019). Sin embargo, estos elementos pueden clasificarse según la IUPAC en elementos de tierras raras ligeras (LREEs)

*Autor para la correspondencia: astrid.toache@gmail.com

Correo electrónico: astrid.toache@gmail.com (Astrid Delfina Toache Pérez), anabolarin@msn.com (Ana María Bolarín Miró), fsanchez@uaeh.edu.mx (Félix Sánchez De Jesús), gtl_2000@yahoo.com (Gretchen Terri Lapidus Lavine).

comprendidas desde el La hasta el Eu y los elementos desde el Gd al Lu y el Y son llamados elementos de tierras raras pesadas (HREEs) (Binnemans, Jones, Müller & Yurramendi, 2018). Estos elementos tienen propiedades químicas y físicas únicas además de muy parecidas entre ellos (Akhtar, Siddiqa, Nazir, & Khan, 2020). Son utilizados en un amplio rango de aplicaciones tales como los vehículos eléctricos, baterías recargables, turbinas eólicas, diodos de emisión de luz, lámparas fluorescentes compactas, paneles de pantallas, superimanes y muchas tecnologías médicas y militares, lo que ha generado un aumento exponencial en la demanda de estos elementos (Takaya et al., 2018), en este sentido, la demanda de REEs únicamente para las aplicaciones en vehículos eléctricos híbridos alcanzará las 315 toneladas, lo que representa el 22% de la producción mundial durante el período del 2018-2030 siendo el Nd, Dy, Ce y Pr los elementos con mayor demanda (Li, Ge, Chen & Wang, 2019). Al mismo tiempo, las características físicas y químicas de este grupo de elementos han hecho muy complicado poder sustituir su aplicación con otros elementos que pudieran desplazar el uso de tierras raras en las aplicaciones tecnológicas más novedosas (Omodara et al., 2019) y, por último, en la actualidad, el suministro de los REEs se ve comprometido por su disponibilidad, su dificultad de extracción y separación y su actual monopolio liderado por China (Patel, Zhang & Ren, 2018; Favot & Massarutto, 2019).

Por lo anterior es que los REEs se han vuelto parte muy importante para la producción de nuevas tecnologías principalmente por sus diversas aplicaciones para la generación de energías limpias, para la producción de vehículos eléctricos más eficientes, en la mayoría de los productos electrónicos y en el fuselaje de aviones de alto rendimiento. Sin embargo, el mercado mundial de estos elementos es de \$9 mil millones (dólares), con un consumo anual aproximado de 150000 toneladas de óxidos de tierras raras, a pesar de esto, la verdadera razón por la cual las tierras raras han adoptado un papel primordial en las nuevas tecnologías es, precisamente, porque los REEs son insumos críticos para bienes con valor de \$7 billones (dólares) (Rajive & Douglas, 2018).

Aun con todo el desarrollo tecnológico que nos han permitido el uso de tierras raras (Cheisson & Schelter, 2019), principalmente para la generación de energías y tecnología verde, su extracción y/o recuperación presentan peligros ambientales y de salud humana (Balaram, 2019), desde el proceso de minería, los aparatos electrónicos que no han sido debidamente tratados para su desecho, la falta de diseño de los productos para poder ser reutilizados o reciclados una vez que se han convertido en obsoletos y al momento de su recuperación ya sea a partir de efluentes mineros, industriales o, actualmente, a partir de desechos electrónicos (Balaram, 2019). La tabla 1 enlista algunas de las aplicaciones más comunes que tienen cada uno de los REEs.

2. Extracción de REEs

La extracción de los elementos de tierras raras a partir de la minería se da cuando se tienen minerales con un contenido de estos elementos que pueda ser redituable económicamente para su extracción, en este sentido, la monacita, la xenotima y la alanita son minerales de REEs en sentido estricto porque los lantánidos (La...Lu) y el itrio son constituyentes críticos en ellos (Engi, 2017). Otros minerales a partir de los cuales se puede extraer REEs son los que se muestran en la tabla 2 y aunque parecen ser muchos, la realidad es que la cantidad de yacimientos explotables o rentables cada vez son menos y pueden encontrarse solo en ciertas áreas geográficas (Kamenopoulos & Agioutantis, 2019), sin embargo, los recursos naturales de tierras raras continúan

como la principal fuente de las mismas. Otro dato importante es que estos elementos no se encuentran en los recursos naturales como metales individuales debido a su alta reactividad y por lo tanto se encuentran en varios minerales, no obstante, entre todos los minerales de tierras raras identificados hasta la fecha, solo unos pocos como la bastnasita, la monacita y la xenotima son utilizadas comercialmente para producir REEs (Carrillo García, Latifi, Amini & Chaouki, 2020). Actualmente la bastnasita es considerado como el principal mineral en el mundo para la producción de elementos de tierras raras debido a su abundancia y a sus altos porcentajes de óxidos de tierras raras que alcanzan aproximadamente un 75% (Batapola et al., 2020).

Tabla 1: Aplicaciones de los elementos de Tierras Raras.

REE	Application	Reference
La	Sensores, MOSFET, catálisis, biocatálisis, memorias no volátiles, aislantes, CMOS, fotoluminiscencia.	(Dabhane, Ghotekar, Tambade & Medhane, 2020)
Ce	Catálisis, aplicaciones químicas, fotocátalisis, sensores biológicos, colorantes y vidrios dopados.	(Sciré & Palmisano, 2020)
Pr	Imanes, iluminación, óptica, optoelectrónica	(Jowitt, Werner, Weng & Mudd, 2018; Jusza et al., 2019)
Nd	Imanes, cerámicos, baterías, catálisis, aditivos en vidrios, pulido.	(Ciacci, Vassura, Cao, Liu & Passarini, 2019)
Pm	Optoelectrónica, baterías nucleares.	(Cardoso et al., 2019)
Sm	Sensores, imanes permanentes, láseres ópticos, catálisis.	(Andreev, Ivanov, Gorshkov, Miodushevskiy, & Andreev, 2016; Asadollahzadeh M., Torkaman, Torab-Mostaedi, & Moazami, 2020)
Eu	Lámparas fluorescentes, monitores de computadora, televisores.	(Kumari, Kumar Jha, Deo Pathak, Chakravarty & Lee, 2018)
Gd	Baterías móviles, combustibles nucleares, electrónica, industria médica.	(Asadollahzadeh, Torkaman & Torab-Mostaedi, 2020)
Tb	Sistemas ópticos (láseres, fibras ópticas, imágenes médicas, tubos de rayos catódicos, pantallas de cristal líquido.	(Wei, Salih, Hamza, Rodríguez Castellón & Guibal, 2021)
Dy	Manufactura de imanes permanentes de Nd-Fe-B.	(De Vargas Briao, Gurgel da Silva & Adeodato Vieira, 2021)
Ho	Aplicaciones médicas, fibras láser, Refrigeración magnética.	(Knudsen, 2019; Terada & Mamiya, 2021)
Er	Energía nuclear, fibra óptica y colorantes de vidrio.	(Singh et al., 2018; Zaki Rashed et al., 2019)
Tm	X-rays (uso médico) and láseres.	(Carmignani et al., 2019)
Yb	Optoelectrónica, aplicaciones médicas y fotocatalíticas	(Moon et al., 2019)

Lu	Medicina nuclear (cáncer), fibra óptica.	(Baharom et al., 2019; Vogel, Van der Marck & Versleijen, 2021)
Sc	Aleaciones de aluminio, iluminación y cerámicas, aplicaciones en pilas de combustible.	(Ricketts, 2019)
Y	Energía renovable, lámparas fluorescentes, paneles de pantallas de plasma, lentes ópticos y baterías, láseres, superconductores, reactores nucleares y electrónica.	(Favot & Massarutto, 2019)

control de la cadena de valor global de los REEs (Kamenopoulos & Agioutantis, 2019).

Sin embargo, aunque China lidera la producción de REEs (Favot & Massarutto, 2019), la realidad es que existen preocupaciones ecológicas sobre la contaminación de las minas de tierras raras en todo el mundo, un ejemplo es el conflicto social y ambiental que rodeó el desarrollo de la Planta de Materiales Avanzados de Lyna (LAMP) en Kuantan Malasia, dando lugar a un gran activismo internacional sobre la injusticia ambiental y social que generaba este tipo de plantas (Ali, 2014).

El proceso de extracción de tierras raras varía según el tipo de mineral que se procesa y la gama de elementos acompañantes que también se extraerán, sin embargo, en general su extracción y procesamiento se realiza de manera destructiva en el medio ambiente (Arshi, Vahidi & Zhao, 2018). La literatura existente proporciona cierta información sobre estos impactos negativos al medio ambiente, principalmente en el uso de reactivos necesarios para la correcta separación de los REEs y además en la cantidad de desechos y residuos a los que no se les da un adecuado tratamiento (Arshi, Vahidi & Zhao, 2018).

Tabla 2: Minerales de Tierras Raras y sus fórmulas. (Batapola et al., 2020; Garside, 2022)

Mineral de REEs	Fórmula
Allanita	$(Y, Ln, Ca)_2(Al, Fe^{3+})_3(SiO_4)_3(OH)$
Apatita	$(Ca, Ln)_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
Bastnasita	$(Ln, Y)(CO_3)F$
Eudialita	$Na_4(Ca, Ln)_2(Fe^{2+}, Mn^{2+}, Y)ZrSi_8O_{22}(OH, Cl)_2$
Fergusonita	$(Ln, Y)NbO_4$
Gittinsita	$CaZrSi_2O_7$
Limoriita	$Y_2(SiO_4)(CO_3)$
Kainosita	$Ca_2(Y, Ln)_2Si_4O_{12}(CO_3)H_2O$
Loparita	$(Ln, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3$
Monazita	$(Ln, Th)PO_4$
Mosandrita	$(Na, Ca)_3Ca_3Ln(Ti, Nb, Zr,)(Si_2O_7)_2(O, OH, F)_4$
Parasite	$Ca(Ln)_2(CO_3)_3F_2$
Pirocloro	$(Ca, Na, Ln)_2Nb_2O_6(OH, F)$
Rinkita	$(Ca, Ln)_4Na(Na, Ca)_2Ti(Si_2O_7)_2(O, F)_2$
Steenstrupine	$Na_{14}Ln_6Mn_2Fe_2(Zr, Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_73H_2O$
Sinquisita	$Ca(Ln)(CO_3)_2F$
Xenotima	YPO_4
Zircón	$(Zr, Ln)SiO_4$
Davidita	$(Ce, Ln)(Y, U)(Ti, Fe^{3+})20O_{38}$

En relación a la distribución mundial de los yacimientos de tierras raras, existe un notable líder en la extracción y comercialización de tierras raras, por ejemplo, en el año 2021, China produjo más de la mitad de la producción mineral mundial de REEs, seguido de Estados Unidos con un porcentaje del 15.52%. En términos del volumen de producción de tierras raras, la cuota de producción de China ascendió a 168,000 toneladas métricas del equivalente de óxidos de tierras raras en el año 2021 (Garside, 2022) (Ver Tabla 3). En el año 2021, el total de reservas mundiales de minerales de tierras raras ascendió a 120 millones de toneladas métricas, así mismo, China tiene la mayor cantidad de reservas, seguido de Vietnam (22,000,000 toneladas métricas), Rusia y Brazil (21,000,000 toneladas métricas cada país). Con todos estos datos es posible deducir que China sigue teniendo el

Por ejemplo para la producción de 1 kg de Neodimio (Nd), se producen 100 kg de CO₂, se contaminan 10 L de agua dulce y 10 L de agua marina se eutrofizan, además, porque los minerales de tierras raras suelen contener un porcentaje de material radiactivo como torio (Th) y uranio (U) (Ver Tabla 4), existe una radiación ionizante equivalente a 0.003 kg de ²³⁵U, también sucede una acidificación terrestre equivalente a un kg de SO₂ y también se genera un grado de ecotoxicidad terrestre (Marx, Schreiber, Zapp & Walachowicz, 2018). En la Figura 1 se muestra un diagrama general del proceso de obtención de óxidos de tierras raras (Zaimes, Hubler, Wang & Khanna, 2015). Uno de los principales contaminantes en este proceso es la utilización de ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Mwewa, Tadie, Ndlovu, Simate & Matinde, 2022), empleado para el proceso de digestión del mineral molido (utilizando un molino de bolas) y a temperaturas entre 200 y 220 °C, lo cual genera grandes cantidades de sulfatos ácidos dando como resultado un alto nivel de contaminación tanto del agua como de emisiones a la atmósfera (Pillai, 2007) sin embargo, aunque se han propuesto otros reactivos para la digestión y/o calcinación del mineral molido tales como ácido clorhídrico (HCL), ácido nítrico (HNO₃), hidróxido de sodio (NaOH) o aun con ácido sulfúrico (H₂SO₄) a bajas molaridades, es necesario aumentar el tiempo del proceso o incluso aumentar por lo menos al doble la temperatura de la digestión o calcinación del mineral (Suwanmanee & Ratthanapra, 2019; Ji, Li, Huang & Zhang, 2021) y esto a su vez genera mayor cantidad de contaminantes al agua, a la tierra y a la atmósfera.

En la actualidad la producción de REEs de alta calidad y a gran escala es compleja debido a varios factores, dentro de los cuales están las propiedades químicas de los mismos, la falta de recursos de REEs, altos gastos de capital y de operación, los precios y demandas del mercado y por último, preocupaciones ambientales, de salud y seguridad (Hidayah & Abidin, 2018). Por todo lo anterior, se han buscado diversas modificaciones en el proceso de producción de REEs a partir de minerales (Wanhala et al., 2019), por ejemplo en la fase de extracción, que está después del proceso de lixiviación (ver Figura 1), se ha optado, en algunos procesos, la extracción líquido-líquido utilizando solventes inmiscibles que permitan una recuperación selectiva de los diferentes REEs que se encuentren en las soluciones de lixiviación (Hidayah & Abidin, 2018). Sin embargo, para aplicar este proceso, es necesario estudiar y determinar correctamente la composición de los elementos patrón, las concentraciones individuales de REEs, los

estados de oxidación y el factor de separación del extractante (Quijada-Maldonado & Romero, 2021).

Tabla 3: Producción Minera mundial y reserva de Tierras Raras (Garside, 2022; Hou, Liu, Wang, & Wu, 2018)

País	Producción Minera (%)	Reservas (ton métricas)
China	60.33	44,000,000
Estados Unidos	15.52	1,800,000
Myanmar	9.38	ND
Australia	7.94	4,000,000
Tailandia	2.89	ND
Madagascar	1.15	ND
India	1.05	6,900,000
Rusia	0.97	21,000,000
Brazil	0.18	21,000,000
Vietnam	0.14	22,000,000
Burundi	0.04	ND
Groenlandia	ND	1,500,000
Tanzania	ND	890,000
Sur África	ND	790,000
Resto del Mundo	0.31	280,000

Otros métodos más novedosos involucran la recuperación sólido-líquido es decir, a partir de la solución de lixiviación rica en REEs, se agregan extractantes sólidos obteniendo, de igual manera, complejos sólidos de tierras raras y estos, posteriormente, son separados de la fase acuosa por medio de una centrifugación (Wang Y. et al., 2018). Sin embargo, el desarrollo de métodos de extracción económicamente y ambientalmente viables sigue siendo el principal desafío que enfrenta la minería de REEs además de que es necesario crear prácticas de protección ambiental con respecto a la extracción y uso a largo plazo de estos elementos, lo que traerá importantes beneficios sociales, financieros y ambientales (Bielawski, 2020).

3. Geopolíticas.

En relación a los procesos convencionales acerca de la extracción de REEs en el mundo, a la distribución de los yacimientos minerales en cada país y a su cada vez mayores aplicaciones en las nuevas tecnologías y en la producción de energía verde y renovable, es que los países han generado diversas estrategias políticas en relación a la extracción minera de estos elementos y a los factores económicos, sociales y ambientales que esta actividad implica. En este sentido, al encontrarse estos elementos en ciertas áreas geográficas, se crean puntos conflictivos, especialmente en partes inestables del mundo (Kamenopoulos & Agioutantis, 2019) y a medida que las transformaciones económicas se aceleran, el asegurar el acceso a los REEs tendrá un impacto y, al mismo tiempo, ayudará a modificar y a formar la geopolítica en los años venideros (Kalantzakos, 2020). En la actualidad la geopolítica destacó la enorme importancia de estos elementos en las políticas económicas de cada país, transformándolos de simples insumos industriales en materiales de importancia estratégica y económica

dignos de los titulares mundiales; esta nueva perspectiva y al mismo tiempo preocupación, surgió en el año 2010 cuando China impuso un embargo de tierras raras a Japón, lo que provocó una inquietud sobre que China pudiera utilizar su posición cada vez más dominante en los mercados mundiales de tierras raras como una herramienta de política exterior (Overland, 2019; Kalantzakos, 2020).

Tabla 4: Composición típica de algunos minerales (Pillai, 2007).

	Composición (%)			
	TREO	U ₃ O ₈	ThO ₂	P ₂ O ₅
Monazita, Australia	61.33	0.34	6.55	26.28
Monazita, India	59.68	0.37	9.58	26.23
Monazita, Malasia	59.65	0.24	5.90	25.70
Monazita, Tailandia	60.20	0.44	5.76	26.52
Monazita, Rep. de Corea	60.20	0.45	5.76	26.52
Monazita, DPRK	42.65	0.18	4.57	18.44
Bastoesita	58-74	-	0.11-0.2	0.64-0.94
Xenotima, Malasia	54.00	0.81	0.83	26.20
Gadolinita	32-46	-	arriba de 2	-

Sin embargo, la realidad es que los REEs no son tan escasos como su nombre lo hace creer, de hecho, son geológicamente muy abundantes en la corteza terrestre, por ejemplo, el cerio (Ce) es más común que el plomo (Pb) y su abundancia es muy similar a la del cobre (Cu), los elementos de tierras raras consideradas como ligeras (La, Ce, Pr, Nd, Sm y Eu) son las más comunes a excepción del Pm, no obstante, este no es utilizado en las tecnologías de energías renovables (Overland, 2019). Lo que es cierto es que todos los elementos de tierras raras se encuentran principalmente en bajas concentraciones, lo que hace que su proceso de extracción sea muy complicado y muy costoso. En China logran acaparar la mayor parte del mercado mundial de REEs pues es un país con bajos costos de mano de obra, estándares ambientales laxos y buenos conocimientos para las ganancias en cualquier proceso (Ganguli & Cook, 2018; Overland, 2019; Swain & Mishra, 2019; Kalantzakos, 2020).

Bajo estas circunstancias, China ha tenido el poder para afectar los precios mundiales de las tierras raras, ha logrado incrementar su producción alrededor de 140% del 2018 al 2021 (Garside, 2022), tan sólo en una década, al mismo tiempo se puede esperar que una caída en las exportaciones de REEs de China resulte en un aumento de los precios. Bajo este panorama, EE UU ha anunciado su compromiso para producir imanes de NdFeB con insumos obtenidos desde dentro del país (Werker, Wulf, Zapp, Schreiber & Marx, 2019), por su parte Japón ha estado mirando hacia otras naciones como Kazajistán y Vietnam para conseguir suministros de óxidos de tierras raras, pues les son indispensables para su producción y exportación de tecnología de alta gama (lo cual es un 22% más de lo que produce y exporta EE UU) (Schmid, 2019) y algunos países, entre ellos India y Japón están explorando el fondo del mar para la extracción de minerales de tierras raras (Takaya et al., 2018) (Ganguli & Cook, 2018).

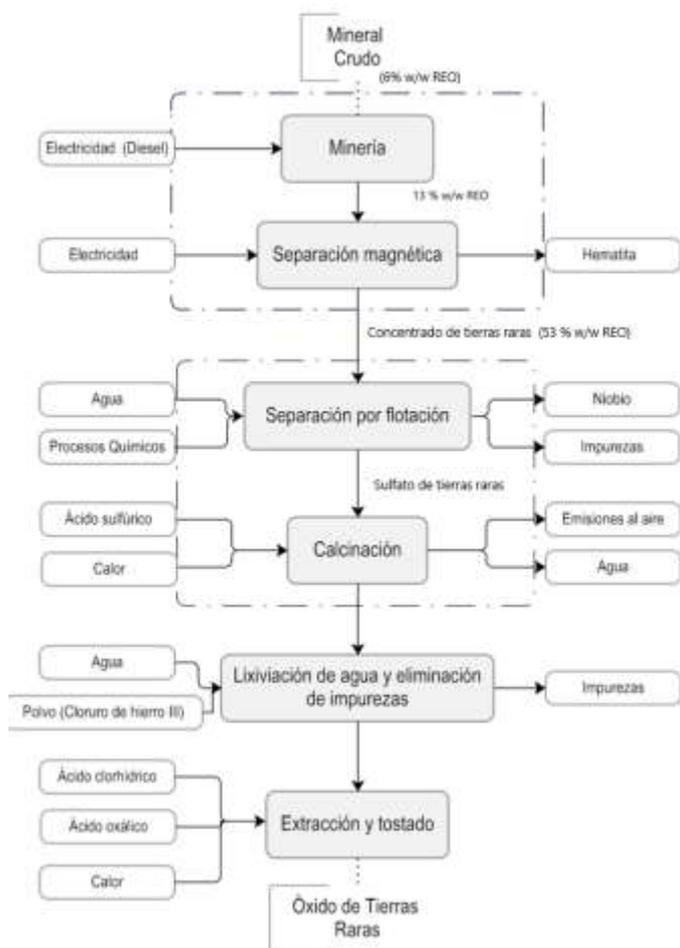


Figura 1. Cadena de proceso de óxido de tierras raras (REO) (Zaimes, Hubler, Wang & Khanna, 2015)

Es posible resumir lo anterior en los seis principales problemas del mercado de tierras raras: modelos político-económicos en competencia, nacionalismo de recursos, opacidad del mercado, falta de confianza, cooperación débil, enfoques a corto y largo plazo y la orientación a las ganancias económicas proceso (Ganguli & Cook, 2018).

4. Conclusiones

Las tierras raras juegan un papel muy importante en la vida moderna y, por lo mismo, han sido el foco de atención mundial en los últimos años, debido principalmente a su creciente uso en la producción de tecnologías verdes y energías renovables, empero en la actualidad existe un desabasto en la producción de REEs (Wang, Guo, Liu & Wei, 2020), además de la existencia monopólica de China tanto en la producción como en la exportación de estos elementos, debido principalmente a la cantidad de yacimientos que se encuentran en su territorio y a sus estándares ambientales.

En conjunto los actuales métodos de extracción (Ganguli & Cook, 2018) a partir de los minerales ricos en REEs, los cuales en su mayoría generan grandes cantidades de contaminantes y efluentes, han generado que algunos países interpongan políticas que impidan que la actividad minera de tierras raras pueda ser rentable en dichos lugares. Todas estas problemáticas para la extracción y producción de REEs, generan una expectativa de

incertidumbre (Lee & Wen, 2018) para el cambio hacia una vida más sustentable, pues la mayoría de los productos de tecnologías verdes, utilizan dentro de sus insumos algunos REEs, pero las naciones, en el afán de tener un mayor poder y control político y económico a nivel mundial generan políticas que no siempre ven el beneficio ecológico y social (Ganguli & Cook, 2018). Es por estas razones que es indispensable la búsqueda de nuevos yacimientos de REEs como, por ejemplo, en el fondo del mar como es el caso de Japón e India, y al mismo tiempo la búsqueda de procesos menos contaminantes y, simultáneamente, rentables para la producción de tierras raras, tratando de competir con los precios que ofrece China. Por todo lo anterior surge la necesidad de buscar aún más alternativas (Royer-Lavallée, Neculita & Coudert, 2020) para evitar un desabasto mayor a medida que las tecnologías y energías verdes van en aumento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del programa Prodep para el desarrollo de este proyecto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Akhtar, M., Siddiqua, H., Nazir, M., & Khan, M. (2020). Preparations and tailoring of structural, magnetic properties of rare earths (REs) doped nanoferrites for microwave high frequency applications. *Ceramics International*, 46(17), 26521-26529. doi:10.1016/j.ceramint.2020.07.118
- Ali, S. (2014). Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries. *Resources*, 3, 123-134. doi:10.3390/resources3010123
- Andreev, O., Ivanov, V., Gorshkov, A., Miodushevskiy, P., & Andreev, P. (2016). Chemistry and Technology of Samarium Monosulfide. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 18, 55-65. doi:10.18321/ectj396
- Arshi, P., Vahidi, E., & Zhao, F. (2018). Behind the scenes of clean energy – the environmental footprint of rare earth products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(3), 3311-3320. doi:10.1021/acssuschemeng.7b03484
- Asadollahzadeh, M., Torkaman, R., & Torab Mostaedi, M. (2020). Recovery of gadolinium ions based on supported ionic liquid membrane: parametric optimization via central composite design approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762-020-02743-8
- Asadollahzadeh, M., Torkaman, R., Torab-Mostaedi, M., & Moazami, F. (2020). Estimation of Performance with the Two Truncated Probability Density Functions, Case Study: Using Mixco Column to Extract Samarium and Gadolinium. *SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 1-12. doi:10.1080/01496395.2020.1757713.
- Baharom, M., Rahman, M., Latif, A., Wang, P., Arof, H., & Harun, S. (2019). Lutetium oxide film as a passive saturable absorber for generating Q switched fiber laser at 1570 nm wavelength. *Optical Fiber Technology*, 50, 82-86. doi:10.1016/j.yofte.2019.03.003
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10, 1285-1303. doi:10.1016/j.gsf.2018.12.005
- Batapola, N., Dushyantha, N., Premasiri, H., Abeysinghe, A., Rohitha, L., Ratnayake, N., . . . Dharmaratne, P. (2020). A comparison of global rare earth element (REE) resources and their mineralogy with REE prospects in Sri Lanka. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 1-15. doi:10.1016/j.jseae.2020.104475.
- Bielawski, R. (2020). Rare Earth Elements – a Novelty in Energy Security. *Journal of Ecological Engineering*, 21(4), 134-149. doi:10.12911/22998993/119810
- Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T., & Yurramendi, L. (2018). Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(1). doi:10.1007/s40831-018-0162-8

- Cardoso, C., Almeida, J., Lopes, C., Trindade, T., Vale, C., & Pereira, E. (2019). Recovery of Rare Earth Elements by Carbon-Based Nanomaterials—A Review. *Nanomaterials—A Review*, 9(6), 814. doi:10.3390/nano9060814
- Carmignani, L., Clementi, M., Signorini, C., Motta, G., Nazzani, S., & Palmisano, F. (2019). Safety and feasibility of thulium laser transurethral resection of prostate for the treatment of benign prostatic enlargement in overweight patients. *Asian Journal of Urology*, 6(3), 270-274. doi:10.1016/j.ajur.2018.05.004
- Carrillo García, A., Latifi, M., Amini, A., & Chaouki, J. (2020). Separation of Radioactive Elements from Rare Earth Element-Bearing Minerals. 10(11), 1524. doi:10.3390/met10111524
- Cheisson, T., & Schelter, E. (2019). Rare earth elements: Mendeleev's bane, modern marvels. *Science*, 363(6426), 489-493. doi:10.1126/science.aau7628
- Ciacci, L., Vassura, I., Cao, Z., Liu, G., & Passarini, F. (2019). Recovering the "new twin": Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. *Resources, Conservation & Recycling*, 142, 143-152. doi:10.1016/j.resconrec.2018.11.024
- Cobelo-García, A., Filella, M., Croot, P., Frazzoli, C., Du Laing, G., Ospina-Alvarez, N., . . . Zimmermann, S. (2015). COST action TD1407: network on technology-critical elements (NOTICE)—from environmental processes to human health threats. *Environmental Science and Pollution Research*, 15188-15194. doi:10.1007/s11356-015-5221-0
- Dabhane, H., Ghotekar, S., Tambade, P., & Medhane, V. (2020). Plant mediated green synthesis of lanthanum oxide (La₂O₃) nanoparticles: A review. *Asian Journal of Nanoscience and Materials*, 3, 291-299. doi:10.26655/AJNANOMAT.2020.4.3
- De Vargas Briao, G., Gurgel da Silva, M., & Adeodato Vieira, M. (2021). Expanded vermiculite as an alternative adsorbent for the dysprosium recovery. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 127, 228-235. doi:10.1016/j.jtice.2021.08.022
- Engi, M. (2017). Petrochronology Based on REE-Minerals: Monazite, Allanite, Xenotime, Apatite. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 83, 365-418. doi:10.2138/rmg.2017.83.12
- Favot, M., & Massarutto, A. (2019). Rare-earth elements in the circular economy: The case of yttrium. *Journal of Environmental Management*, 240, 504-510. doi:10.1016/j.jenvman.2019.04.002
- Ganguli, R., & Cook, D. (2018). Rare earths: A review of the landscape. *MRS Energy & Sustainability*, 5, 1-16. doi:10.1557/mre.2018.7
- Garside, M. (2022, Marzo 4). Statista. Retrieved Mayo 27, 2022, from <https://www.statista.com/statistics/270277/mining-of-rare-earths-by-country/>
- Hidayah, N., & Abidin, S. (2018). The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using liquid-liquid extraction: A review. *Minerals Engineering*, 121, 146-157. doi:10.1016/j.mineng.2018.03.018
- Hou, W., Liu, H., Wang, H., & Wu, F. (2018). Structure and patterns of the international rare earths trade: A complex network analysis. *Resources Policy*, 55, 133-142. doi:10.1016/j.resourpol.2017.11.008
- Ji, B., Li, Q., Huang, Q., & Zhang, W. (2021). Enhanced leaching recovery of rare earth elements from a phosphatic waste clay through calcination pretreatment. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128654. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128654
- Jowitt, S., Werner, T., Weng, Z., & Mudd, G. (2018). Recycling of the rare earth elements. *Green and Sustainable Chemistry*, 13, 1-7. doi:10.1016/j.cogsc.2018.02.008
- Jusza, A., Lipińska, L., Baran, M., Olszyna, A., Jastrzębska, A., Gil, M., . . . Piramidowicz, R. (2019). Praseodymium doped nanocrystals and nanocomposites for application in white light sources. *Optical Materials*, 95, 109247. doi:10.1016/j.optmat.2019.109247
- Kalantzas, S. (2020). The Race for Critical Minerals in an Era of Geopolitical Realignments. *The International Spectator*, 1-16. doi:10.1080/03932729.2020.1786926
- Kamenopoulos, S., & Agioutantis, Z. (2019). Geopolitical Risk Assessment of Countries with Rare Earth Element Deposits. *Mining, Metallurgy & Exploration*. doi:10.1007/s42461-019-00158-9
- Knudsen, B. (2019). Laser Fibers for Holmium:YAG Lithotripsy: What Is Important and What Is New. *Urologic Clinics*, 46(2), 185-191. doi:10.1016/j.ucl.2018.12.004
- Kumari, A., Kumar Jha, M., Deo Pathak, D., Chakravarty, S., & Lee, J.-c. (2018). Processes developed for the separation of europium (Eu) from various resources (Eu) from various resources. *Separation & Purification Reviews*, 1-31. doi:10.1080/15422119.2018.1454959
- Li, X.-Y., Ge, J.-P., Chen, W.-Q., & Wang, P. (2019). Scenarios of rare earth elements demand driven by automotive electrification in China: 2018–2030. *Resources, Conservation & Recycling*, 145, 322-331. doi:10.1016/j.resconrec.2019.02.003
- Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., & Walachowicz, F. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(5), 5858-5867. doi:10.1021/acssuschemeng.7b04165
- Moon, B., Jin Kim, S., Lee, S., Lee, A., Lee, H., Lee, D., . . . Lee, S.-K. (2019). Rare-Earth-Element-Ytterbium-Substituted Lead-Free Inorganic Perovskite Nanocrystals for Optoelectronic Applications. *Advanced Materials*, 1901716. doi:10.1002/adma.201901716
- Mwewa, B., Tadie, M., Ndlovu, S., Simate, G., & Matinde, E. (2022). Recovery of rare earth elements from acid mine drainage: A review of the extraction methods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 117704. doi:10.1016/j.jece.2022.107704
- Omodara, L., Pitkäaho, S., Turpeinen, E.-M., Saavalainen, P., Oravisjärvi, K., & Keiski, R. (2019). Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117573. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.048
- Overland, I. (2019). The geopolitics of renewable energy: Debunking four emerging myths. *Energy Research & Social Science*, 49, 36-40. doi:10.1016/j.erss.2018.10.018
- Patel, K., Zhang, J., & Ren, S. (2018). Rare-earth-free high energy product manganese based magnetic materials. *Nanoscale*, 10(25), 11701-11718. doi:10.1039/C8NR01847B
- Pillai, P. (2007). Naturally occurring radioactive material (NORM) in the extraction and processing of rare earths. In I. A. Agency (Ed.), *Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V)* (pp. 197-221). Sevilla, España: International Atomic Energy Agency Vienna.
- Quijada-Maldonado, E., & Romero, J. (2021). Solvent extraction of rare-earth elements with ionic liquids: Toward a selective and sustainable extraction of these valuable elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 27, 100428. doi:10.1016/j.cogsc.2020.100428
- Rajive, G., & Douglas, R. (2018). Rare earths: A review of the landscape. *MRS Energy & Sustainability*, 5, 1-16. doi:10.1557/mre.2018.7
- Ricketts, N. J. (2019). Scandium Solvent Extraction. *Data Mining, Light Metals 2019*, 1395-1401. doi:10.1007/978-3-030-05864-7_174
- Royer-Lavallée, A., Neculita, C., & Coudert, L. (2020). Removal and potential recovery of rare earth elements from mine water. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 47-57. doi:10.1016/j.jiec.2020.06.010
- Schmid, M. (2019). Mitigating supply risks through involvement in rare earth projects: Japan's strategies and what the US can learn. *Resources Policy*, 63, 101457. doi:10.1016/j.resourpol.2019.101457
- Scirè, S., & Palmisano, L. (2020). Cerium and cerium oxide: A brief introduction. In S. Scirè, & L. Palmisano, *Cerium Oxide (CeO₂): Synthesis, Properties and Applications* (pp. 1-12). doi:10.1016/B978-0-12-815661-2.00001-3
- Singh, K., Harish, S., Kristy, A., Shivani, V., J., A., Navaneethan, M., & Shimomura, M. (2018). Erbium doped TiO₂ interconnected mesoporous spheres as an efficient visible light catalyst for photocatalytic applications. *Applied Surface Science*, 449, 755-763. doi:10.1016/j.apsusc.2018.01.279
- Song, M., Fisher, R., & Kwoh, Y. (2019). Technological challenges of green innovation and sustainable resource management with large scale data. *Technological Forecasting & Social Change*, 44, 361-368. doi:10.1016/j.techfore.2018.07.055
- Suwanmanee, U., & Rattanapra, D. (2019). Life Cycle Assessment of Separation Methods of Cerium Oxide from Monazite Ore. *The Italian Association of Chemical Engineering*, 74, 907-912. doi:10.3303/CET1974152
- Swain, N., & Mishra, S. (2019). A review on the recovery and separation of rare earths and transition metals from secondary resources. *Journal of Cleaner Production*, 220, 884-898. doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.094
- Takaya, Y., Yasukawa, K., Kawasaki, T., Fujinaga, K., Ohta, J., Usui, Y., . . . Chang, Q. (2018). The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Scientific Reports*, 8(1), 1-8. doi:10.1038/s41598-018-23948-5
- Terada, N., & Mamiya, H. (2021). High-efficiency magnetic refrigeration using holmium. *Nature Communications*, 12(1212). doi:10.1038/s41467-021-21234-z
- Vogel, W., Van der Marck, S., & Versleijen, M. (2021). Challenges and future options for the production of lutetium-177. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 48(8), 2329-2335. doi:10.1007/s00259-021-05392-2
- Wang, J., Guo, M., Liu, M., & Wei, X. (2020). Long-term outlook for global rare earth production. *Resources Policy*, 65, 101569. doi:10.1016/j.resourpol.2019.101569
- Wang, Y., Guo, X., Bi, Y., Su, J., Kong, W., & Sun, X. (2018). Enrichment of trace rare earth elements from leaching liquor of ion-absorption minerals by solid complex centrifugal separation process. *Green Chemistry*, 20(9), 1998-2006. doi:10.1039/C7GC03674D
- Wanhala, A., Doughty, B., Bryantsev, V., Wu, L., Mahurin, S., Jansone-Popova, S., . . . Stack, A. (2019). Adsorption mechanism of alkyl hydroxamic acid onto bastnäsite: Fundamental steps toward rational

- collector design for rare earth elements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 553, 210-219. doi:10.1016/j.jcis.2019.06.025
- Wei, Y., Salih, K., Hamza, M., Rodríguez Castellón E., Guibal, E. (2021). Novel phosphonate-functionalized composite sorbent for the recovery of lanthanum (III) and terbium (III) from synthetic solutions and ore leachate. *Chemical Engineering Journal*, 424. doi:10.1016/j.cej.2021.130500
- Werker, J., Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., & Marx, J. (2019). Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets. *Sustainable Production and Consumption*. doi:10.1016/j.spc.2019.07.006
- Zaimes, G., Hubler, B., Wang, S., & Khanna, V. (2015). Environmental Life Cycle Perspective on Rare Earth Oxide Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(2), 237-244. doi:10.1021/sc500573b
- Zaki Rashed, A., F. Tabbour, M., El-Meadawy, S., Anwar, T., Sarlan, A., Yupapin, P., & Amiri, I. (2019). The effect of using different materials on erbium-doped fiber amplifiers for indoor applications. *Results in Physics*, 15, 1-12. doi:10.1016/j.rinp.2019.102650