

Revista Latinoamericana de Difusión Científica
Volumen 8 – Número 14
Depósito Legal ZU2019000058 - ISSN 2711-0494

Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 14
Enero – Junio 2026
Maracaibo – Venezuela

Las tierras raras y su valor en la basura electrónica

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18421695>

P. A. Martínez-Montoya*
M. L. Carrera-Jota**
M. Corea***
A. de J. Morales-Ramírez****

RESUMEN

Este trabajo recopila y analiza los últimos reportes sobre los elementos de tierras raras, reflexionando sobre su importancia estratégica, aplicaciones tecnológicas, criticidad y riesgos asociados a su suministro. El trabajo consistió en una revisión bibliográfica de literatura científica, informes técnicos y reportes de organismos internacionales, considerando aspectos importantes como, abundancia, las limitaciones para su explotación, la distribución geopolítica de la producción y el creciente interés por fuentes secundarias. Los resultados evidencian que, los elementos de tierras raras no son escasos, presentan una elevada criticidad debido al limitado número de productores, y a la concentración de la producción por China, que concentra más del 80 % del mercado global. Su relevancia se manifiesta en aplicaciones indispensables para la industria tecnológica, en especial en dispositivos electrónicos, lo que ha convertido su disponibilidad en un indicador de poder económico y geopolítico. Finalmente, la revisión destaca el desarrollo de estrategias alternativas como la *minería urbana*, entendida como la recuperación de estos metales a partir de residuos eléctricos y electrónicos, propuesta que surge como vía complementaria para mitigar los riesgos de suministro.

PALABRAS CLAVE: Ciencias de la Tierra, Elementos de tierras raras, Minería urbana, Basura electrónica.

*Candidato a Doctor. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, ESIQIE-IPN. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Laboratorio de Investigación en Polímeros y Nanomateriales, Ciudad de México, México. E-mail: adrianpedrom@gmail.com

**Profesora. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, ESIQIE-IPN, Departamento de Ingeniería Metalúrgica UPALM S/N Col. Lindavista, Gustavo A. Madero Cd. de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6376-3553>. E-mail: mcarreraj@ipn.mx

***Profesora. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, ESIQIE-IPN, Laboratorio de Investigación en Polímeros y Nanomateriales, UPALM S/N Col. Lindavista, Gustavo A. Madero Cd. de México, México. E-mail: mcoreat@yahoo.com.mx

**** Profesor. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, ESIQIE-IPN. Departamento de Ingeniería Metalúrgica; Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, CIITEC-IPN, México. E-mail: amoralesra@ipn.mx

Recibido: 26/09/2025

Aceptado: 12/11/2025

Rare Earths and Their Value in Electronic Waste

ABSTRACT

This work compiles and analyzes the latest reports on rare earth elements, reflecting on their strategic importance, technological applications, criticality, and risks associated with their supply. The work consisted of a bibliographic review of scientific literature, technical reports, and reports from international organizations, considering important aspects such as abundance, limitations on their exploitation, the geopolitical distribution of production, and the growing interest in secondary sources. The results show that rare earth elements are not scarce, but they are highly critical due to the limited number of producers and the concentration of production in China, which accounts for more than 80% of the global market. Their relevance is evident in applications that are indispensable to the technology industry, especially in electronic devices, which has made their availability an indicator of economic and geopolitical power. Finally, the review highlights the development of alternative strategies such as urban mining, understood as the recovery of these metals from electrical and electronic waste, a proposal that emerges as a complementary way to mitigate supply risks.

KEYWORDS: Earth sciences, Rare earth elements, Urban mining, Electronic waste.

Introducción

¿Qué son las tierras raras?

Es la pregunta que se plantea para definir y reflexionar sobre su importancia estratégica, aplicaciones tecnológicas, criticidad y riesgos asociados a su suministro. Recopilando y analizando los últimos reportes sobre los elementos de tierras raras. A través de una revisión bibliográfica de literatura científica, informes técnicos y reportes de organismos internacionales, se ha podido comenzar definiéndolas, ya que, a pesar de su nombre, las tierras raras (TR) no son “tierras” y tampoco son “raras”. La palabra “raras” hace referencia a su dificultad para ser obtenidas, y no por su escasez, ya que de hecho su abundancia es mayor a la de otros metales como el plomo o incluso el cobre (Algora Weber, 2021; Echeverri L et al., 2019).

El nombre “tierras raras” fue acuñado a finales del siglo XVIII. En 1787, el químico sueco Carl Axel Arrhenius descubrió un mineral negro inusual en las minas de Ytterby, Suecia, denominado inicialmente iterbita (que posteriormente se llamaría, gadolinita). En

1794, Johan Gadolin analizó químicamente una muestra y aisló un óxido desconocido al que llamó “itria”, considerado como la primera “tierra rara” descubierta (Xia et al., 2020).

En el contexto puramente químico, a partir del siglo XVIII, el término "tierra" hacía referencia a óxidos no metálicos que eran disueltos en ácido, y "rara" reflejaba su aparente escasez. El químico Johan Gadolin describió la itria como una nueva “tierra” por tratarse de un óxido desconocido en ese momento. En 1803, el cerio (Ce) fue aislado por Berzelius y Klaproth a partir del mineral cerita, como nueva “tierra” metálica. En 1839, Carl Gustav Mosander logró separar el óxido de cerio en un nuevo óxido que llamó lantana, convirtiéndose en el primero en diferenciar claramente otro elemento después del cerio (Kragh, 2016).

Actualmente las tierras raras son conformadas por un grupo de 17 elementos de la tabla periódica, que se pueden enlistar de la siguiente manera: itrio (Y), cerio (Ce), lantano (La), erbio (Er), terbio (Tb), holmio (Ho), tulio (Tm), escandio (Sc), samario (Sm), gadolinio (Gd), iterbio (Yb), disprosio (Dy), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), europio (Eu), lutecio (Lu), prometio (Pm). La Tabla 1 muestra con más detalle el año en que se descubrió, el descubridor y el método con el que se obtuvieron. Se observa que, desde el descubrimiento del itrio en 1794, a lo largo de casi 150 años (hasta 1945 con el prometio) fue un esfuerzo constante de un grupo de investigadores para aislar los elementos que hoy conocemos como tierras raras, cuyas propiedades desconcertaban a los científicos de la época, lo que resultó en los diversos métodos que se utilizaron para ser aislados.

Tabla 1.- Elementos de tierras raras, descubridor, método y año.

Elemento	Numero atomico	Simbolo	Descubridor	Método	Año
Itrio	39	[Y]	Johan Gadolin	Procedente del mineral gadolinita, de una cantera de Ytterby, Suecia.	1794
Cerio	58	[Ce]	Martin Heinrich Klaproth, Jöns Jakob Berzelius y Wilhelm Hisinger.	Se descubrió procedente del mineral cerita.	1803
Lantano	57	[La]	Carl Gustav Mosander.	Mosander separó el lantano del nitrato de cerio.	1839
Erbio	68	[Er]	Carl Gustaf Mosander	Mosander separó el erbio de la itria mediante métodos químicos.	1842

Terbio	65	[Tb]	Carl Gustaf Mosander	Mosander descubrió el terbio como fracción del mineral itria, mediante técnicas de separación química.	1843
Holmio	67	[Ho]	Marc Delafontaine y Jacques-Louis Soret, Per Teodor Cleve.	Se identificó mediante análisis espectroscópico de residuos de óxido de erbio.	1878
Iterbio	70	[Yb]	Jean Charles Galissard de Marignac	Se separó del mineral iterbio mediante técnicas de separación química.	1878
Tulio	69	[Tm]	Per Teodor Cleve.	Se separó del mineral erbia mediante análisis químico	1879
Escandio	21	[Sc]	Lars Fredrik Nilson.	Se descubrió en los minerales euxenita y gadolinita.	1879
Samario	62	[Sm]	Paul Émile Lecoq de Boisbaudran.	Se descubrió en el mineral samarskita mediante análisis espectroscópico.	1879
Gadolinio	64	[Gd]	Jean Charles Galissard de Marignac	Se descubrió en el mineral gadolinita mediante análisis espectroscópico.	1880
Disproso	66	[Dy]	Paul Émile Lecoq de Boisbaudran.	Se separó del óxido de holmio mediante métodos espectroscópicos.	1886
Praseodimio	59	[Pr]	Carl Auer von Welsbach.	Welsbach separó el praseodimio de una mezcla de tierras raras mediante cristalización fraccionada.	1885
Neodimio	60	[Nd]	Carl Auer von Welsbach.	Además del praseodimio, el neodimio se separó mediante cristalización fraccionada.	1885
Europio	63	[Eu]	Eugène-Anatole Demarçay.	Demarçay separó el europio de los concentrados de samario-gadolinio mediante métodos espectroscópicos.	1896
Lutecio	71	[Lu]	Georges Urbain, Carl Auer von Welsbach y Charles James.	Se identificó mediante la separación del iterbio mediante cristalización fraccionada y análisis espectroscópico.	1907
Prometio	61	[Pm]	Jacob A. Marinsky, Lawrence E. Glendenin y Charles D. Coryell.	Se identificó en los productos de fisión del uranio.	1945

Los 17 elementos de tierras raras (TR) se agrupan por sus propiedades químicas y físicas similares, 8 en la categoría de tierras raras ligeras (TRL) y 7 en la categoría de tierras raras pesadas (TRP). Estos materiales consisten en 15 lantánidos, más escandio e itrio. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) considera los elementos de [La] a [Eu] como TRL y aquellos de [Gd] a [Lu] e [Y] como TRP. Por el contrario, en Europa, los elementos de [La] a [Sm] a menudo se agrupan como TRL y [Eu] a [Lu] más [Y] como pesados; en China, [Sm] se considera un TRP. La clasificación de [Gd] varía entre los dos grupos, según la IUPAC y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Además, en algunos casos [Sc] tampoco se describe como una TR y a menudo se trata por separado como un elemento de transición (Binnemans et al., 2018a, 2018b; Han, 2020, 2021).

1. Abundancia geológica

Aunque los elementos de tierras raras son más abundantes que incluso algunos metales como el cobre ($\text{Cu} \approx 28 \text{ ppm}$) o el plomo ($\text{Pb} \approx 17 \text{ ppm}$) (B. Zhou et al., 2017), su distribución geológica y las bajas concentraciones en depósitos económicamente explotables hacen que sean considerados estratégicos, aunque no fáciles de extraer debido a sus cantidades comparativamente bajas en lugares que no permiten una minería redituable.

La concentración media estimada de TR en la corteza terrestre oscila entre unos 130-240 $\mu\text{g/g}$, que son valores significativamente superiores a las de otros elementos comúnmente explotados y mucho mayor que sus respectivas abundancias (Rudnick et al., 2013). La Tabla 2 presenta las abundancias medias de elementos de tierras raras en $\mu\text{g/g}$ reportada por diferentes autores en los últimos años.

2. Exploración y explotación

Actualmente, las reservas mundiales de TR de países principales como China, Brasil, Vietnam, Rusia e India, ascienden a alrededor de 130 millones de toneladas. Estos recursos provienen principalmente de cuatro entornos geológicos: carbonatitas, sistemas ígneos alcalinos, depósitos de arcilla por adsorción de iones y depósitos de placer con monacita-xenotima. China, con aproximadamente 35% de las reservas mundiales de TR, sigue siendo el líder mundial en exploración y producción de TR (Balaram, 2019a). La Figura 1 muestra la localización de yacimientos a nivel mundial

Tabla 2.- Abundancia de elementos de tierras raras en la corteza terrestre

Elemento	Balaram V (2019)	Dang et al. (2021)	^a Barrat y Bayon (2024)
	(Balaram, 2019a)	(Rudnick et al., 2013)	(Barrat et al., 2024)
Abundancia (µg/g)			
La	39	35	32.2
Ce	66.5	63	87.29
Pr	9.2	9	10.1
Nd	41.5	40	36.98
Sm	7.05	7	6.90
Eu	2	1	1.18
Gd	6.2	6	5.95
Tb	1.2	0.9	0.89
Dy	5.2	5	5.27
Ho	1.3	1.2	1.07
Er	3.5	3	3.09
Tm	0.52	0.3	0.46
Yb	3.2	2.8	3.02
Lu	0.8	0.5	0.43
Y	33	33	32.2
Sc	22	22	*

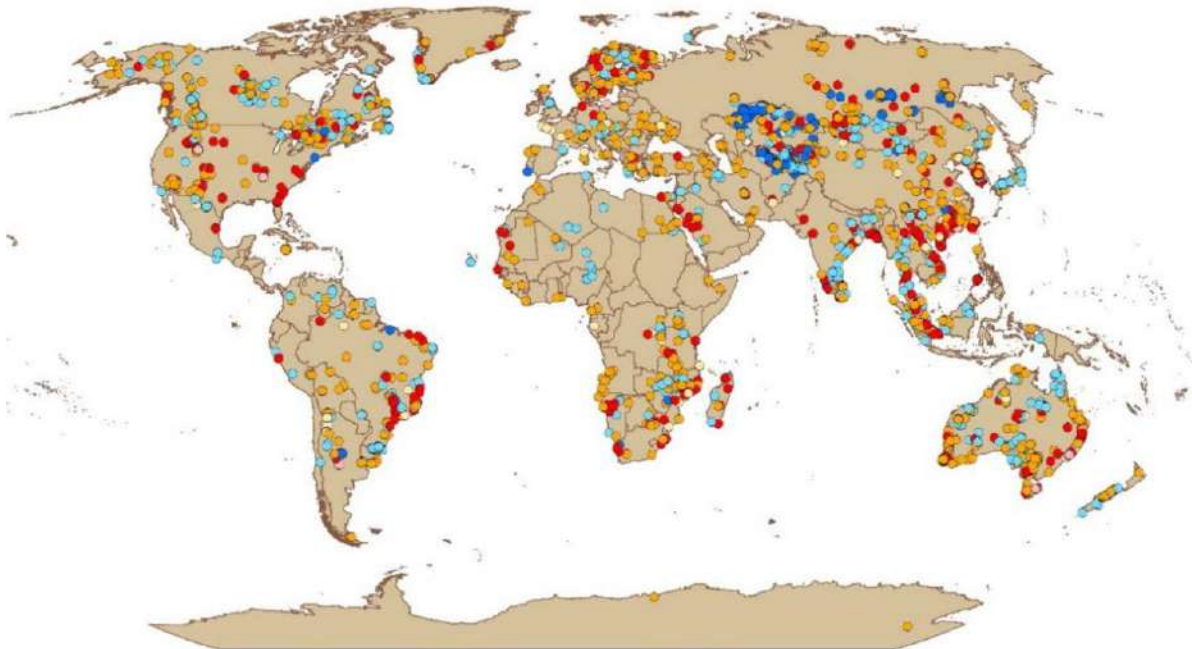
**no reportado. ^a Valores promedio de sedimentos.*

Estados Unidos (EE. UU.) tiene importantes reservas de tierras raras y fue el mayor productor hasta el inicio de la década de 1990. Molycorp Inc., la empresa propietaria de la mina de Mountain Pass, hasta fines de la década de 1980 fué la mayor productora global, pero la mina en el 2002. El cierre, oficialmente se debió a inundaciones, al daño ambiental (especialmente por filtraciones de aguas residuales con sulfatos y metales pesados al desierto de Mojave) y a los costos demasiado altos de producción de los óxidos; lo que ha dejado a EE. UU. sin una producción propia (Actualmente, el país importa el 80% de sus TR de China (DoE, 2023), incluyendo el 100% de los elementos pesados como disprosio y terbio, críticos para defensa y energías limpias) pero, al mismo tiempo, se ha hecho parte de la política de EE. UU tendiente a conservar las reservas mineras estratégicas (Guo, 2020).

Figura 1.- Localización de depósitos y yacimientos mundiales de tierras raras(Bedekar et al., 2016)

Notas: Los puntos rojos (claros) se refieren a yacimientos con producción, reservas o recursos conocidos sin tener en cuenta el tamaño. Los puntos naranjas (claros) se refieren a posibles yacimientos, es decir zonas sin producción, reservas o recursos conocidos.

Los puntos de color azul (claro) se refieren a zonas en las que existe mineralización de TR pero la cantidad no se considera interesante, no se ha estudiado o casi no se dispone de información. Fuente: USGS (2022).



Sudáfrica es una de las regiones particularmente rica de tierras raras y aquí, como en Kazajistán, se instalan empresas para implantar su extracción (Johnson, 2017). En Australia, *Lynas Corporation*, empresa minera que cotiza en la Bolsa australiana con base en Sidney, es propietaria de la mina de tierras raras de *Mount Weld* e instalaciones (en construcción) en Malasia. La mina de *Mount Weld* es uno de los mayores depósitos de tierras raras, fue fundada en 1983 como mina para la extracción de oro, pero en el 2001 vendió la división de oro para concentrarse en las tierras raras. En 2009, la minera China *Non-ferrous Metal Mining Group* (Minería de Metales No-Ferrosos de China) ofreció \$252 millones de dolares por el 51.6% de la empresa, pero el acuerdo no obtuvo la autorización

de la *Foreign Investment Review Board* (Junta de Revisión de Inversión Extranjera) del gobierno australiano (Guo, 2020) (Tzili Apango, 2014). La Figura 2 ilustra los principales países productores de tierras raras según una estimación del 2023, la Figura 3, muestra el porcentaje de participación de estos países a nivel mundial.

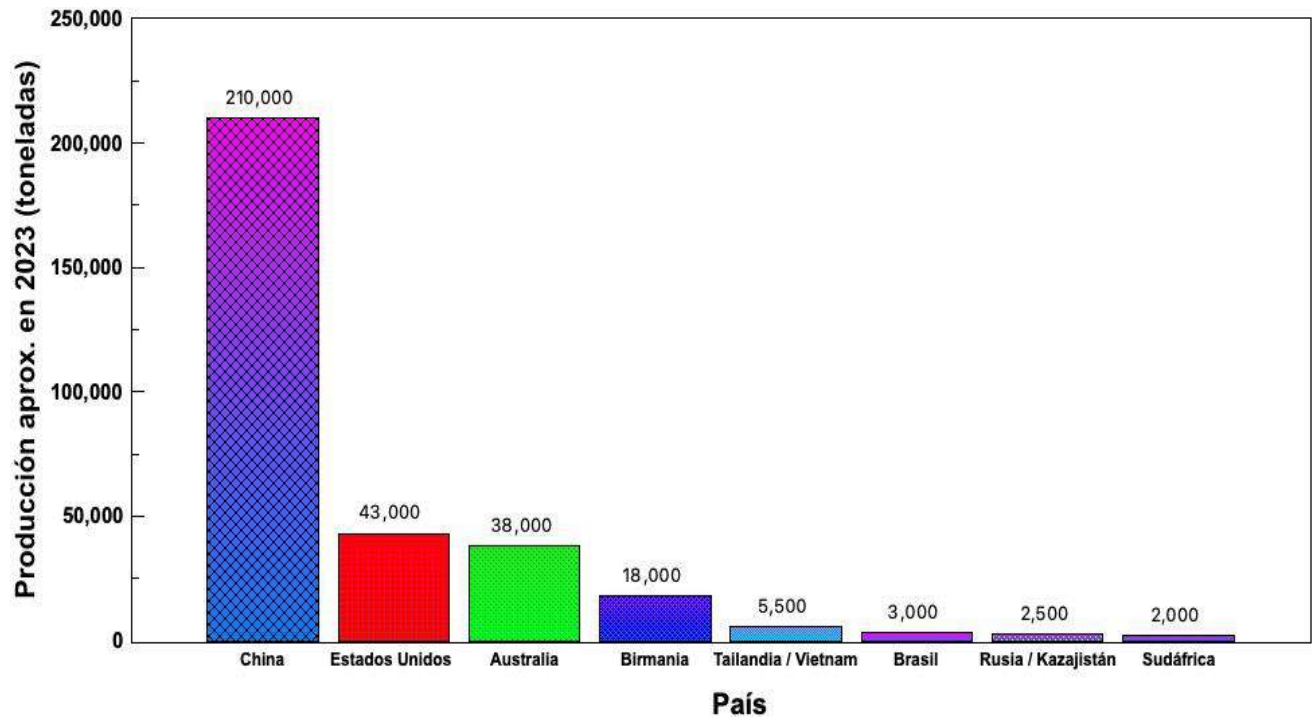


Figura 2.-Producción estimada en 2023 de los principales países productores de tierras raras datos. Datos tomados de *Mineral Commodity Summaries 2024, Rare Earths, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2021 & actualizaciones 2023)* (*Mineral Commodity Summaries 2024 – Rare Earths*, n.d.; *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2021 & actualizaciones 2023)*, n.d.).

*Nota: Los porcentajes se basan en una producción global estimada en aproximadamente 330,000 toneladas en 2023. Birmania y Vietnam no reportan cifras claras.

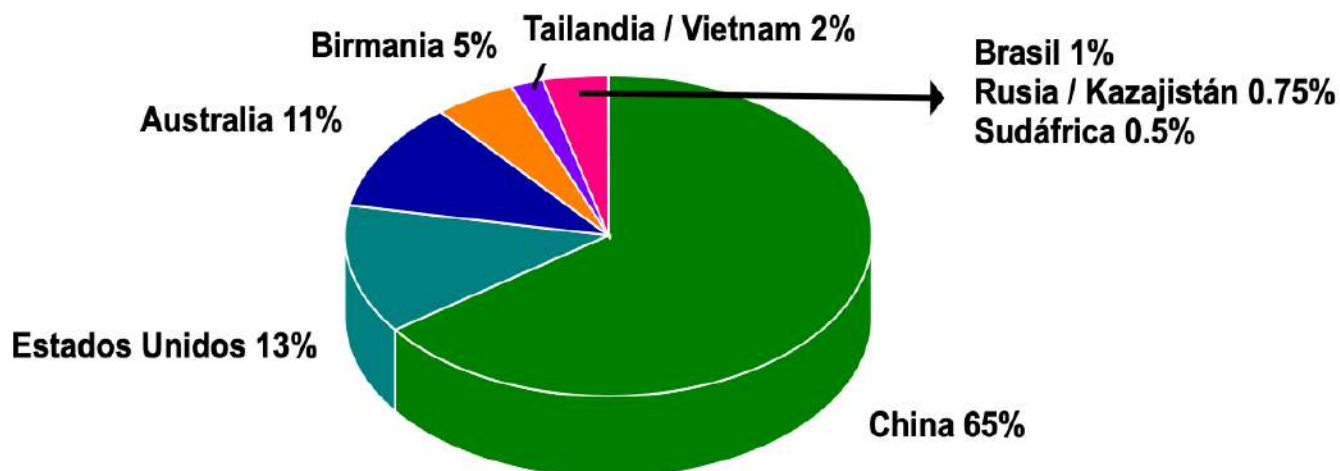


Figura 3.- Porcentaje de participación a nivel mundial en la producción de tierras raras (Mineral Commodity Summaries 2024 – Rare Earths, n.d.; The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2021 & actualizaciones 2023), n.d.).

En Brasil, donde se encuentran las mayores minas de niobio, se calcula que la *Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração* produce por sí sola el 80% mundial. En septiembre de 2011, cinco empresas chinas compraron el 15% de la empresa por US\$1.950 millones. La compañía *Vale*, el mayor productor mundial de minerales de hierro y níquel, anunció, en octubre de 2011, el descubrimiento de un gran depósito de tierras raras situado en su mina de cobre de Salobo, en el estado de Pará. Para el desarrollo de esta mina que promete ser de gran extensión y capacidad, *Vale* está organizando una asociación con *Petrobras* y ha establecido contactos con las grandes empresas mineras *BHP Billiton* y *Rio Tinto*. Las tierras raras se encuentran también en minas de Vietnam, India, Estonia, España, Colombia, Perú, Argentina, Bolivia, Chile, Congo y otros varios países africanos. Muchos son yacimientos potenciales que todavía no se explotan, pero el alza internacional del valor de estos recursos hace que la industria minera de los países desarrollados ponga atención en ellos. (Guo, 2020)

3. Materiales críticos

El 16 de marzo de 2023, la Comisión Europea dio un paso importante al presentar el documento “*Critical Raw Materials Act (CRM Act)*”, una propuesta clave para asegurar que la Unión Europea (UE) cuente con un suministro seguro, sostenible y competitivo de materias primas críticas. Se trata de materiales indispensables para fabricar tecnologías fundamentales en la transición energética, como turbinas eólicas, baterías, vehículos eléctricos, paneles solares o equipos electrónicos avanzados. La Figura 4 muestra la relación de riesgo de suministro respecto a la importancia económica según el informe de la comisión europea, donde, como se observa, ambos grupos de tierras raras aparecen, demostrando su papel estratégico y la importancia de tener fuentes primarias o secundarias de extracción.

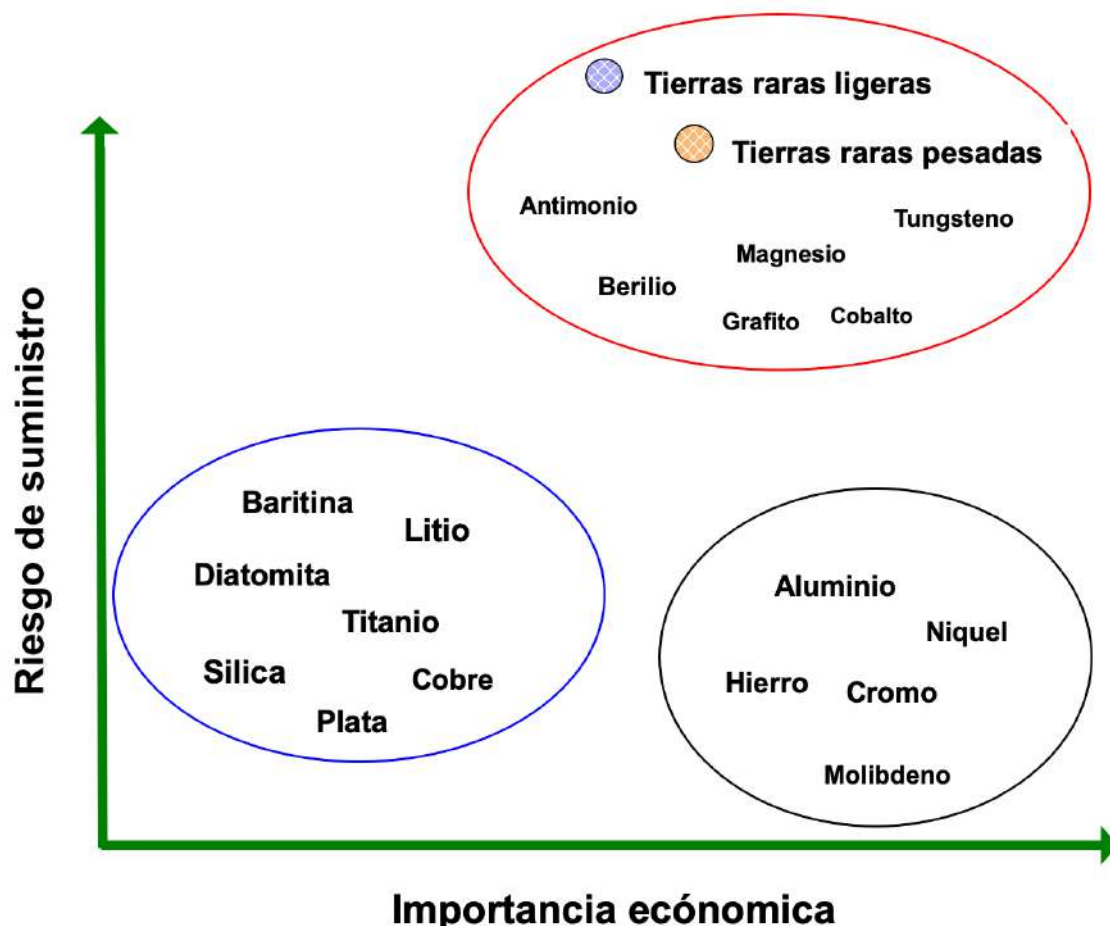


Figura 4.- Metales y materiales catalogados como materias primas críticas según el informe de la Comisión Europea. (Binnemans et al., 2013) (Regueiro y González Barros, 2014).

Esta iniciativa llega en un momento de gran tensión geopolítica, en el que Europa busca reducir su dependencia de países como China, que actualmente concentra una parte significativa de la producción y procesamiento de estos recursos estratégicos. El objetivo es evitar repetir errores del pasado, como la fuerte dependencia energética que Europa mantuvo del gas y petróleo rusos. En 2022, la presidencia de la Comisión advirtió :“*El litio y las tierras raras pronto serán más importantes que el petróleo y el gas. Solo nuestra demanda de tierras raras se quintuplicará para 2030.*” (Real, n.d.)

Con el desarrollo de nuevas tecnologías, existe una carrera mundial por las materias primas críticas, que son esenciales para el funcionamiento de una amplia gama de ecosistemas industriales (Favot et al., 2019). Estas materias primas consisten, entre otros, en elementos de tierras raras (ETR), que se utilizan en la producción de componentes tecnológicamente avanzados (Strzałkowska, 2022).

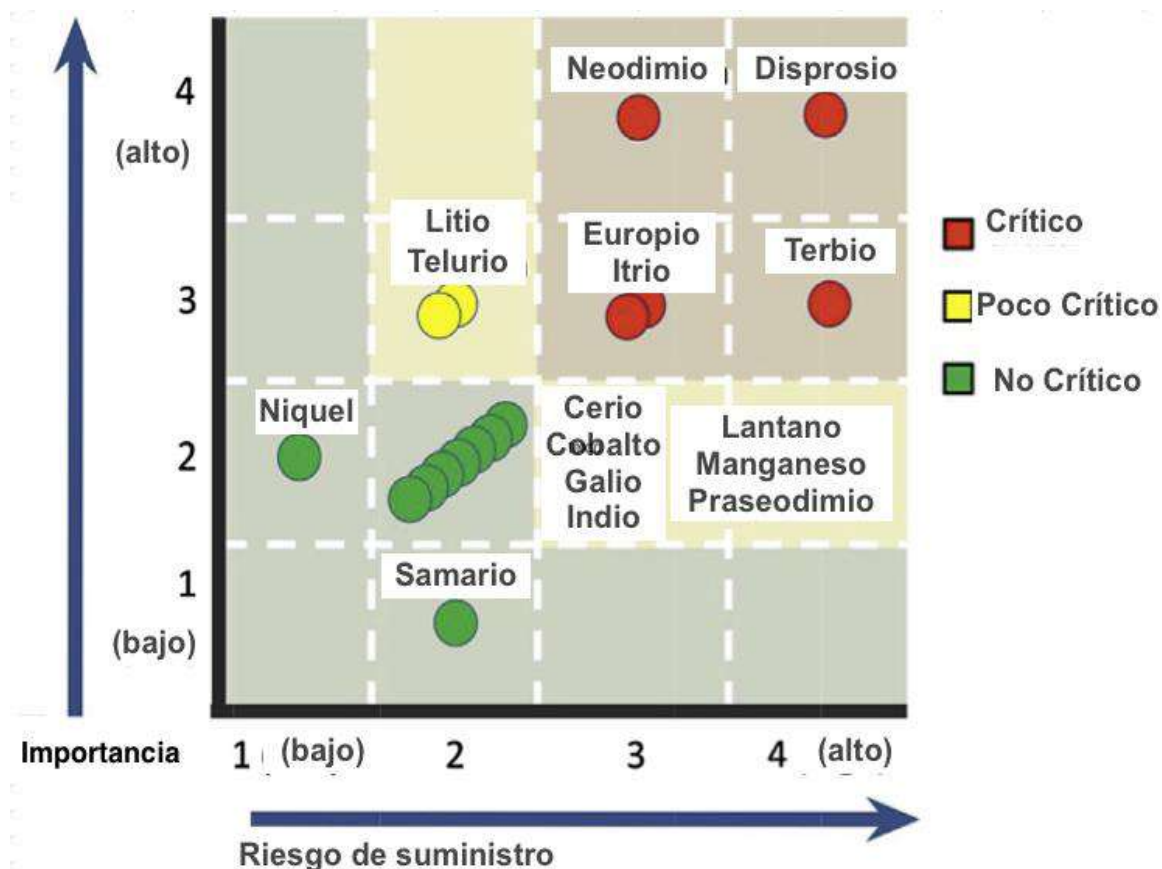


Figura 5.-Matriz de criticidad a mediano plazo para los principales elementos de tierras raras. (2015 a 2025) | Español. (European Commission, 2017)

4. Aplicaciones

Su historia de uso comienza a finales del siglo XIX, cuando Auer von Welsbach descubrió que ciertos óxidos de tierras raras podían usarse para mejorar la iluminación con mantos incandescentes (Szabadvary, 1988). Este avance marcó el inicio de una revolución tecnológica basada en las propiedades especiales de estos elementos. Como resultado, una extensa investigación global se centra en el desarrollo de novedosas aplicaciones tecnológicas que satisfacen las rigurosas demandas tanto cotidianas como de vanguardia (Kiran et al., 2025a), como se muestra en la Figura 6.



Figura 6.- Aplicaciones de las tierras raras

Uno de los campos donde las tierras raras han tenido un impacto significativo es en la industria del vidrio. Elementos como el cerio y el lantano se usan para filtrar la radiación ultravioleta y mejorar las propiedades ópticas del vidrio, siendo esenciales para las lentes de cámaras, microscopios y pantallas (Balaram, 2019a). Además, otros elementos como el neodimio o el erbio aportan colores distintivos a vidrios especiales utilizados en joyería o láseres (Liu et al., 2025a).

En la industria cerámica, las tierras raras mejoran la estabilidad de materiales como la zirconia, utilizada tanto en sensores como en joyería sintética. Además, desempeñan un papel crucial en cerámicos electrónicos y celdas de combustible, apuntando hacia una tecnología más limpia y eficiente (Scherzer et al., 1978).

En metalurgia, estos elementos mejoran la resistencia de los metales a la corrosión. También se emplean en la fabricación de aleaciones especiales con propiedades magnéticas o electroquímicas, como los imanes de neodimio que encontramos en motores eléctricos y discos duros (Zhang et al., 2025a).

La catálisis heterogénea es otra aplicación industrial clave (Ishida et al., 2006). En la refinación del petróleo, las tierras raras estabilizan catalizadores tipo zeolita, y en la industria automotriz, el cerio y el lantano permiten reducir las emisiones contaminantes en los convertidores catalíticos de los vehículos.

La luminiscencia es uno de los campos donde las tierras raras destacan de forma asombrosa, y no solo en sentido figurado: literalmente emiten luz. Este fenómeno ocurre cuando ciertos materiales absorben energía y luego la liberan en forma de radiación visible. En este contexto, elementos como el europio, el terbio y el cerio son protagonistas clave, ya que poseen propiedades electrónicas únicas que les permiten emitir luz de colores específicos y brillantes al ser excitados. Por ejemplo, el europio es ampliamente valorado por su capacidad para emitir luz roja intensa, el terbio genera tonos verdes vibrantes, y el cerio puede emitir luz azulada o incluso ultravioleta, dependiendo de su estado químico y del entorno en que se encuentre. Esta precisión en la emisión de colores puros es posible gracias a su configuración electrónica, particularmente los electrones en la capa 4f, que están protegidos de influencias externas por capas más externas, permitiendo transiciones electrónicas muy definidas (Parauha et al., 2025a).

Gracias a estas características, los compuestos de tierras raras son esenciales en la fabricación de tecnologías modernas de iluminación y visualización. Se utilizan en lámparas fluorescentes, tubos catódicos, pantallas LED y OLED, proyectores, dispositivos láser, e incluso en equipos de diagnóstico médico como tomógrafos y escáneres (Balaram, 2019b; Y. Zhou et al., 2024). Además, su uso ha sido fundamental para el desarrollo de pantallas de alta resolución en televisores, monitores y teléfonos inteligentes, donde la fidelidad del color y la eficiencia energética son prioritarias (Kiran et al., 2025b).

Sin estos elementos, muchas de las tecnologías que hoy consideramos cotidianas, como ver una película en ultra alta definición o contar con iluminación eficiente en casa, simplemente no serían posibles. Por eso, aunque no suelen ser visibles ni ampliamente conocidos por el público, las tierras raras desempeñan un papel crucial en la vida moderna, brillando desde el corazón de dispositivos que usamos todos los días (Parauha et al., 2025b).

El magnetismo es otra área en la que las tierras raras desempeñan un papel fundamental, y sus aplicaciones han transformado diversos sectores tecnológicos(Liu et al., 2025b). Cuando estos elementos se combinan con metales como el hierro o el cobalto, se obtienen imanes permanentes con propiedades excepcionales. Uno de los ejemplos más conocidos es el imán de neodimio-hierro-boro (NdFeB), que es actualmente uno de los más potentes del mundo en relación con su tamaño(Kumari et al., 2023). Estos imanes destacan por su alta fuerza de atracción, su resistencia a la desmagnetización y su eficiencia en condiciones extremas. Gracias a estas características, los imanes basados en tierras raras se utilizan en una amplia variedad de tecnologías de alto rendimiento. En las turbinas eólicas, por ejemplo, permiten generar electricidad de manera más eficiente, incluso con vientos suaves, lo que resulta clave para el desarrollo de energías renovables. En los vehículos eléctricos, estos imanes se emplean en los motores para aumentar su potencia y reducir su peso, lo cual mejora la autonomía y el rendimiento del automóvil. También están presentes en discos duros, sistemas de frenado magnético, generadores industriales, herramientas eléctricas y sistemas de tracción magnética (Balaram, 2019a) .

Incluso en el mundo del audio y la tecnología médica, su presencia es crucial. En los sistemas de audio de alta fidelidad, los imanes de tierras raras permiten fabricar altavoces compactos con excelente calidad sonora. En los equipos de resonancia magnética (MRI), proporcionan campos magnéticos intensos y estables necesarios para obtener imágenes precisas del interior del cuerpo humano. La capacidad de las tierras raras para mejorar el rendimiento de los imanes ha sido decisiva para la miniaturización de dispositivos, el desarrollo de tecnologías sostenibles y la mejora de la eficiencia energética en muchas aplicaciones modernas (Gaustad et al., 2021).

Aunque menos conocidas, también tienen aplicaciones en pigmentos cerámicos y en biomedicina. Por ejemplo, el praseodimio se usa para obtener pigmentos amarillos estables

a altas temperaturas, mientras que algunos compuestos fluorescentes de tierras raras permiten detectar biomoléculas en análisis clínicos (Zhang et al., 2025b).

Las aplicaciones biológicas de las tierras raras han emergido como un área de investigación dinámica y con gran potencial en los últimos años. Gracias a sus propiedades ópticas, electrónicas y magnéticas, estos elementos son utilizados en diversas técnicas de diagnóstico, imagenología y terapias médicas avanzadas.

Una de las aplicaciones más destacadas se encuentra en el campo del diagnóstico biomolecular, particularmente en la inmunoanálisis (Kiran et al., 2025b; Zhang et al., 2025b). Aquí se emplean criptatos de europio, terbio o samario que emiten fluorescencia de larga duración y alta intensidad. Estos compuestos permiten una detección altamente sensible y específica de biomoléculas como proteínas, ácidos nucleicos y hormonas, lo que resulta fundamental en pruebas clínicas como la detección del VIH, la hepatitis o diversos marcadores tumorales. Además, al utilizar ventanas temporales para la lectura de señales fluorescentes, se reduce significativamente la interferencia de autofluorescencia del entorno biológico, mejorando la relación señal-ruido.

En el ámbito de la imagenología médica, los óxidos de gadolinio se utilizan como agentes de contraste en imágenes por resonancia magnética (IRM)(Rogosnitzky et al., 2016). El gadolinio posee propiedades paramagnéticas que incrementan la relajación de los protones del agua en los tejidos, realzando la calidad de las imágenes y permitiendo una visualización más precisa de tumores, lesiones cerebrales, anomalías vasculares y enfermedades articulares. La Figura 7 muestra el porcentaje de usos de tierras raras en diferentes industrias.

Las tierras raras han revolucionado la tecnología láser gracias a sus propiedades electrónicas únicas. Elementos como el neodimio (Nd), el erbio (Er), el tulio (Tm) y el iterbio (Yb) son comúnmente empleados como "dopantes" en materiales que sirven como medio activo en los láseres. Esto significa que se introducen pequeñas cantidades de estos elementos en cristales o vidrios, como el Nd:YAG (granate de itrio y aluminio dopado con neodimio), para permitir la emisión de luz láser mediante un proceso conocido como emisión estimulada.



Figura 7.- Primera. (2020, November 3). *Entre economía y ecología: Primera estación de procesamiento de tierras raras en Canadá.* RCI | Español.

Cada uno de estos elementos tiene la capacidad de absorber energía (por ejemplo, luz o corriente eléctrica) y luego liberarla en forma de un haz coherente y extremadamente preciso de luz. Dependiendo del tipo de ion y del material huésped, los láseres pueden operar en diferentes longitudes de onda, lo que los hace útiles en múltiples campos.

Los láseres basados en tierras raras se utilizan ampliamente en medicina (por ejemplo, en cirugías oftalmológicas, dermatológicas y dentales), en telecomunicaciones (especialmente en la transmisión de datos por fibra óptica), en la industria (para corte y soldadura de materiales), en defensa (sistemas de guiado y puntería), y en investigaciones científicas avanzadas. La estabilidad, potencia y eficiencia energética que ofrecen estos láseres los hace indispensables en contextos donde se requiere alta precisión.

Otra aplicación estratégica de las tierras raras se encuentra en el campo de las aleaciones metálicas. Al incorporarse en pequeñas cantidades a metales como el hierro, el aluminio, el magnesio o el titanio, las tierras raras mejoran significativamente sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas. Por ejemplo, elementos como el cerio, lantano y neodimio son usados para fabricar aleaciones resistentes a la corrosión, al calor y al desgaste. Estas aleaciones son especialmente útiles en industrias aeroespacial, automotriz y militar, donde se requieren materiales que puedan soportar condiciones extremas sin comprometer la seguridad ni el rendimiento.

Las aleaciones con tierras raras también son esenciales en la construcción de componentes de motores de aviones, partes de misiles, turbinas, trenes de alta velocidad y estructuras expuestas a ambientes agresivos (como en plantas químicas o marinas). Además, su uso en aleaciones de magnesio ha permitido reducir el peso de ciertos componentes sin sacrificar resistencia, algo vital para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes. Asimismo, algunas tierras raras actúan como modificadores en procesos metalúrgicos, facilitando la limpieza del metal fundido, eliminando impurezas y afinando la microestructura del material final.

En definitiva, aunque invisibles a simple vista, las tierras raras son indispensables en la vida moderna. Comprender su importancia es el primer paso para valorar, cuidar y gestionar de forma sostenible los materiales que sustentan gran parte de los avances tecnológicos del presente y del futuro.

5. Basura electrónica

Debido a sus propiedades físico-químicas excepcionales, como sus configuraciones electrónicas únicas, alta susceptibilidad magnética, y capacidades para emitir luz en diferentes longitudes de onda, los elementos de tierras raras, se han convertido en componentes esenciales para una amplia gama de dispositivos eléctricos y electrónicos modernos. Estos elementos son fundamentales en la fabricación de imanes permanentes de alto rendimiento, pantallas de dispositivos móviles, discos duros, motores eléctricos, y sistemas de iluminación eficiente, entre otros (Binnemans et al., 2018b). La Figura 8 se presentan las tres principales industrias que consumen elementos de tierras raras, las cuales producen la mayor cantidad de residuos electrónicos y eléctricos. Los residuos electrónicos (E-waste) mal gestionados pueden ser una fuente potencial de contaminación significativa por TR. La composición química de los E-waste es muy variable; sin embargo, las concentraciones de TR pueden ser bastante altas (Brewer et al., 2022).

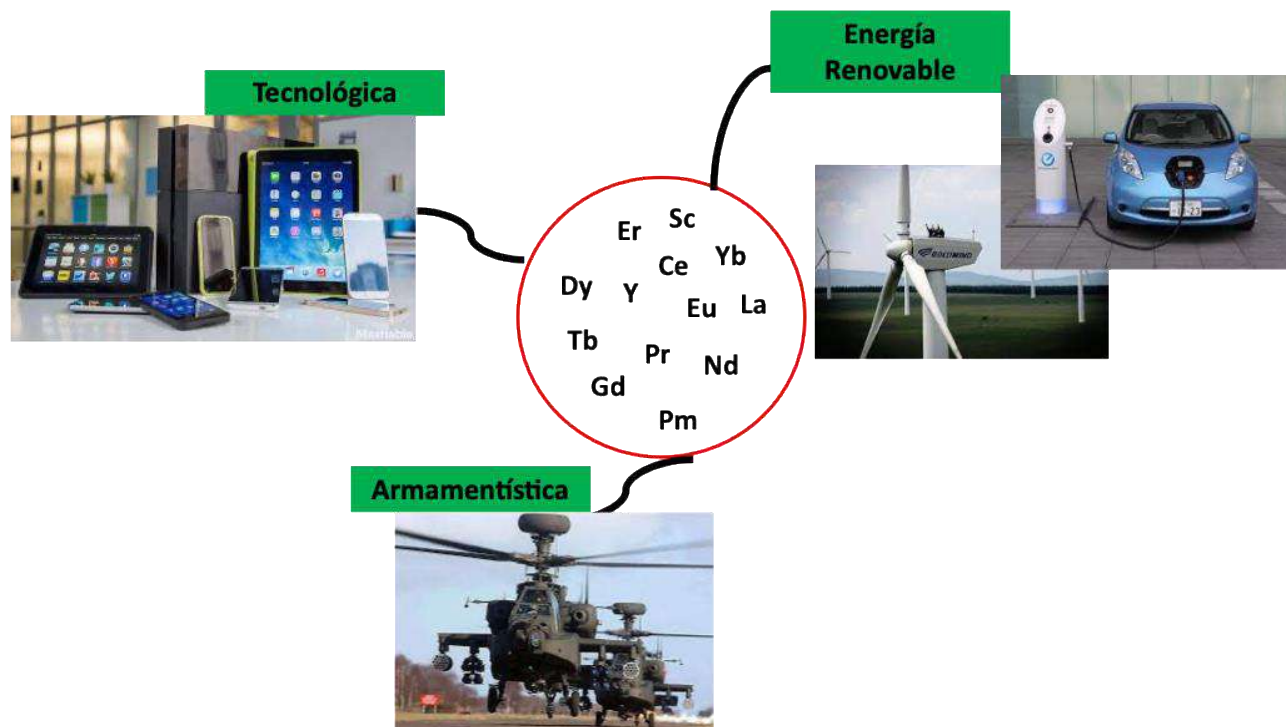


Figura 8.-Usos de tierras raras, (2021), fuente: IGM/ICADE

Como consecuencia de su uso extensivo, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (E-waste) representan una fuente secundaria altamente concentrada de TR. Diversos estudios han demostrado que, en algunos componentes como los imanes de neodimio-hierro-boro (NdFeB) utilizados en discos duros y motores, la concentración de tierras raras puede superar con creces las presentes en muchos minerales primarios, como la bastnasita o la monacita (Andersson et al., 2019; Reck et al., 2012). Por ejemplo, mientras que un mineral típico puede contener entre 0.1% y 5% en peso de TR, ciertos componentes electrónicos pueden albergar hasta un 25–30% en peso de estos elementos en forma de aleaciones o compuestos específicos (Binnemans et al., 2018b) (Tan et al., 2015).

A pesar de este potencial, la industria del reciclaje de residuos electrónicos ha priorizado históricamente la recuperación de metales base (como cobre, aluminio y zinc) y metales preciosos (como oro, plata y paladio), debido a su alto valor económico inmediato y a la infraestructura tecnológica ya establecida para su procesamiento. La recuperación de

TR ha estado limitada por diversas barreras tecnológicas, económicas y logísticas, entre ellas la complejidad en la separación selectiva de estos elementos, la falta de regulaciones específicas y la baja eficiencia de los métodos convencionales de reciclaje. (Tan et al., 2015; Tunsu et al., 2014, 2016)

El creciente interés global por asegurar un suministro sostenible y estratégico de TR ha impulsado la investigación en tecnologías emergentes para su recuperación. Entre estas destacan los procesos hidrometalúrgicos selectivos, la biolixiviación, la extracción con líquidos iónicos y la pirometalurgia avanzada, que buscan maximizar la eficiencia y la sostenibilidad de la recuperación de estos elementos críticos (Binnemans et al., 2018b)(Binnemans et al., 2018c).

6. Hidrometalurgia aplicada a tierras raras

Es el conjunto de procesos metalúrgicos que utilizan soluciones acuosas (ácidos, bases o agentes quelantes) para disolver, separar y purificar tierras raras a partir de minerales, concentrados o residuos (como basura electrónica o imanes NdFeB). Principalmente se usa para separar TR de arcillas iónicas, monacita, bastnasita o fosfatos. Estos procesos se dividen principalmente en: lixiviación, precipitación selectiva, intercambio iónico, y extracción por solventes. Principalmente se utilizan ácidos agresivos y altamente dañinos al medio ambiente como el uso de ácido clorhídrico (HCl) o ácido nítrico (HNO₃) para disolver minerales, seguido de extracción selectiva con solventes tipo D₂EHPA o TBP, que son extractantes orgánicos a base de fosfatos.

7. Biolixiviación (*Bioleaching*)

Estos procesos son biotecnológicos que están basados en microorganismos (como bacterias o hongos) para liberar tierras raras contenidas en minerales o residuos electrónicos, mediante la generación de ácidos orgánicos o inorgánicos, que pretenden sustituir a los ácidos utilizados en los procesos hidrometalúrgicos, pero resultan menos eficientes ya que su aplicación está centrada especialmente en minerales de baja ley (concentraciones bajas de metal), como arcillas lateríticas o polvos de imanes reciclados. Estos procesos tienen ventajas como bajo impacto ambiental y menor consumo de reactivos químicos comparado con los procesos hidrometalúrgicos.

8. Extracción con líquidos iónicos

La técnica de líquidos iónicos es un proceso emergente que utiliza sales orgánicas líquidas a temperatura ambiente, llamadas líquidos iónicos, para disolver y separar tierras raras de forma más selectiva y ecológica que los disolventes orgánicos tradicionales. Son capaces de reemplazar disolventes convencionales en la separación de TR con menor volatilidad y toxicidad. Estos métodos presentan alta selectividad entre TRL y TRP.

9. Pirometalurgia avanzada

Estos procesos son un conjunto de etapas que utilizan altas temperaturas para fundir, reducir o volatilizar compuestos de tierras raras con el fin de obtener un concentrado. Son utilizados principalmente para la recuperación de TR de residuos industriales.

La separación y procesamientos como los anteriormente descritos necesitan técnicas especiales y procesos elaborados. Los recursos y procesos actuales basados en la minería para las TR tienen un gran impacto en el medio ambiente y en cuestiones técnicas y económicas. Sumando a esto también se pierde una gran cantidad de TR debido a las tasas marginales de reciclaje (20%) de los residuos electrónicos al final de su vida útil (Patil et al., 2021).

Zhen Li y colaboradores realizaron un interesante estudio sobre la recuperación de metales valor a partir de basura electrónica, donde se compara la recuperación de oro, plata respecto a los elementos de tierras raras recuperados de basura electrónica (Tabla 3).

Tabla 3.- Peso e ingreso de la recuperación de metales (Li et al., 2019).

Metal	Hidrometalurgia		Pirometalurgia	
	Peso (kg)	Precio (%)	Peso (kg)	Precio (%)
Oro	1	91.02	1	75.53
Plata	5	5.85	4.57	4.43
Tierras raras	3.54	0.52	3.67	0.45
Acero	395.8	0.13	407.11	0.11
Cobre scrap	181.25	2.48	-	-

10. Discusión

Desde 1992, el líder de la República Popular China, *Deng Xiaoping*, anticipaba el papel estratégico que desempeñarían los elementos de tierras raras al declarar: "*Oriente Medio tiene petróleo. China tiene tierras raras.*"

Con esta frase *Xiaoping* predecía el papel geopolítico de estos elementos, fundamentales para el desarrollo tecnológico, la defensa y la transición energética global. Hoy, las tierras raras no solo son el pilar de tecnologías emergentes, sino que también se han convertido en activos estratégicos capaces de definir el equilibrio entre paz y guerra, el desarrollo industrial de un país o el rumbo de la innovación global de toda una región.

El poder de estos elementos se refleja especialmente en el sector militar: los imanes permanentes hechos con neodimio (Nd), samario (Sm) o disprosio (Dy) se emplean en sistemas de guiado de misiles, motores para submarinos, drones y radares de alta precisión. A nivel civil, medios como *Xataka* o *El Cronista* han advertido que a diario dependemos de ellos: sin terbio (Tb), no existirían las pantallas de los celulares inteligentes; sin disprosio (Dy), los motores de vehículos eléctricos como *Tesla* dejarían de funcionar. Así, la movilidad, la comunicación y gran parte de la economía digital actual reposan sobre estos elementos.

Sin embargo, la creciente demanda ha generado dos desafíos clave: aumentar la disponibilidad de tierras raras para abastecer industrias críticas; y gestionar el incremento de residuos eléctricos y electrónicos, que se han convertido en una fuente secundaria altamente atractiva para recuperar estos elementos.

La basura electrónica se ha convertido en un yacimiento urbano de tierras raras, en una fuente secundaria para el reabastecimiento de estos elementos. La basura eléctrica y electrónica proveniente de aparatos como teléfonos móviles, discos duros, turbinas eólicas o computadoras contienen concentraciones de tierras raras significativamente mayores que muchos minerales naturales. Por ejemplo, en promedio, 1 tonelada de basura electrónica y eléctrica puede contener entre 2 y 5 kg de elementos de tierras raras, dependiendo del tipo de dispositivo. Se ha estimado que solo en Europa se desechan anualmente más de 9 millones de toneladas de basura electrónica, lo que equivale a más de 25,000 toneladas potenciales de TR recuperables.

Globalmente, la ONU ha advertido que la "*minería urbana*" de residuos electrónicos alcanza más de 62 millones de toneladas al año (2022), con un crecimiento de 2.6 millones

de toneladas anuales. Esta "*minería urbana*" no solo representa un desafío ambiental, sino también una oportunidad estratégica para reducir la dependencia de la minería tradicional, especialmente en contextos donde China controla más del 80% de la producción y refinado global (Giese, 2022; Yuksekdog et al., 2022).

Como una posible solución, se han desarrollado en los últimos años nuevas tecnologías para extraer y separar tierras raras de fuentes secundarias. A medida que crece el interés por la recuperación de TR desde residuos, también surgen tecnologías más eficientes y sostenibles. Entre las más prometedoras destacan la **biolixiviación** (*bioleaching*), que es el uso de bacterias o hongos para disolver tierras raras de placas electrónicas, discos duros o imanes. Esta técnica reduce el uso de ácidos agresivos (Barmettler et al., 2016; Shi et al., 2023). También destaca la **lixiviación con líquidos iónicos y disolventes verdes**, la cual usa sustancias como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) o líquidos iónicos basados en colina, que se están utilizando para extraer selectivamente TR con menor impacto ambiental que los disolventes tradicionales (Virolainen et al., 2019; Wu et al., 2023) . Otra reciente opción es el uso de **materiales sólidos** como membranas selectivas y extracción con resinas funcionalizada que permiten separar elementos individuales como neodimio, praseodimio o itrio y europio, sin necesidad de múltiples etapas químicas, reduciendo energía y residuos (Belkhouche et al., 2010; İnan et al., 2018; Martínez-Montoya, del Río, et al., 2023; Martínez-Montoya, Sanchez-Alvarado, et al., 2023; Metwally et al., 2013). **Procesos hidrometalúrgicos avanzados** como nuevas variantes del método tradicional (lixiviación, separación, precipitación) emplean tecnologías como microondas, ultrasonido o electroquímica para acelerar las reacciones y mejorar el rendimiento (Rasoulnia et al., 2021; Rybak et al., 2021; Wu et al., 2023), y son opciones más verdes y con menos impacto al medio ambiente,

El futuro de las tierras raras no está solo en las minas profundas o a cielo abierto, sino también en nuestra basura, muchas veces tenemos cajones llenos de teléfonos viejos o computadoras en desuso, discos duros obsoletos, incluso motores eléctricos en desuso empolvándose en el garaje. Darle un valor secundario esta basura electrónica y eléctrica es un recurso estratégico, que no solo responde a la urgencia ambiental, sino que también permite a muchos países acceder a un suministro más sostenible, diversificado y seguro de estos elementos críticos como es el caso de América Latina.

Conclusiones

Las tierras raras son un grupo de elementos químicos esenciales para muchas de las tecnologías que usamos a diario: teléfonos móviles, pantallas, autos eléctricos, turbinas eólicas. Aunque su nombre sugiere lo contrario, no son tan escasas en la tierra, pero sí es difícil encontrarlas en concentraciones que permitan una extracción rentable y sostenible. Gran parte de la producción mundial depende de unos pocos países, lo que hace que su disponibilidad sea incierta y estratégica para muchas economías.

En este contexto, los residuos electrónicos se presentan como una fuente alternativa valiosa. Muchos de estos aparatos contienen tierras raras en cantidades mucho mayores que las que se encuentran en minerales naturales. Sin embargo, hasta ahora, el reciclaje se ha enfocado principalmente en metales como el oro, la plata o el cobre, dejando de lado a las tierras raras por la dificultad técnica que implica su recuperación.

Aprovechar estos desechos como fuente secundaria de tierras raras no solo ayuda a reducir la presión sobre el medio ambiente y los recursos naturales, sino que también fortalece la seguridad del suministro de materiales clave para el futuro. Para lograrlo, es fundamental invertir en nuevas metodologías de reciclaje y adoptar políticas que promuevan una economía circular, donde nada se desperdicie y todo se reutilice.

Referencias

Algora Weber, M. D. (2021). El impacto geopolítico de las tierras raras en el orden internacional. *Economía Industrial*, ISSN 0422-2784, No 420, 2021 (Ejemplar Dedicado a: *Geoeconomía Industrial*), Págs. 47-58, 420.

Andersson, M., Ljunggren Söderman, M., & Sandén, B. A. (2019). Challenges of recycling multiple scarce metals: The case of Swedish ELV and WEEE recycling. *Resources Policy*, 63. doi: 10.1016/j.resourpol.2019.101403

Balaram, V. (2019a). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4). doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005

Balaram, V. (2019b). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285–1303. doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005

Barmettler, F., Castelberg, C., Fabbri, C., & Brandl, H. (2016). Microbial mobilization of rare earth elements (Ree) from mineral solids—a mini review. In *AIMS Microbiology* (Vol. 2, Issue 2). doi: 10.3934/MICROBIOL.2016.2.190

Barrat, J. A., & Bayon, G. (2024). Practical guidelines for representing and interpreting rare earth abundances in environmental and biological studies. In *Chemosphere* (Vol. 352). doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141487

Bedekar, V., Morway, E. D., Langevin, C. D., & Tonkin, M. J. (2016). MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW. In *Groundwater Resources Program*.

Belkhouche, N. E., & Didi, M. A. (2010). Extraction of Bi(III) from nitrate medium by D2EHPA impregnated onto Amberlite XAD-1180. *Hydrometallurgy*, 103(1–4). doi: 10.1016/j.hydromet.2010.02.015

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 51). doi: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T., & Yurramendi, L. (2018a). Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? In *Journal of Sustainable Metallurgy* (Vol. 4, Issue 1). doi: 10.1007/s40831-018-0162-8

Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T., & Yurramendi, L. (2018b). Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? In *Journal of Sustainable Metallurgy* (Vol. 4, Issue 1). doi: 10.1007/s40831-018-0162-8

Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T., & Yurramendi, L. (2018c). Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? In *Journal of Sustainable Metallurgy* (Vol. 4, Issue 1). doi: 10.1007/s40831-018-0162-8

Brewer, A., Dror, I., & Berkowitz, B. (2022). Electronic waste as a source of rare earth element pollution: Leaching, transport in porous media, and the effects of nanoparticles. *Chemosphere*, 287. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132217

Echeverri L, F., & Parra B., J. J. (2019). Los lantánidos: ni tierras ni raras. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(167). doi: 10.18257/raccefyn.917

European Commission. (2017). *Methodology for establishing the EU list of Critical Raw Materials*. Publications Office of the European Union.

Favot, M., & Massarutto, A. (2019). Rare-earth elements in the circular economy: The case of yttrium. *Journal of Environmental Management*, 240. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.002

Gaustad, G., Williams, E., & Leader, A. (2021). Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 167). doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105213

Giese, E. C. (2022). E-waste mining and the transition toward a bio-based economy: The case of lamp phosphor powder. *MRS Energy and Sustainability*, 9(2). doi: 10.1557/s43581-022-00026-y

Guo, C. (2020). 70 años de los estudios latinoamericanos en China: una perspectiva del desarrollo institucional. *Orientando*, 19. doi: 10.25009/orientando.v0i19.2639

Han, K. N. (2020). Characteristics of precipitation of rare earth elements with various precipitants. *Minerals*, 10(2). doi: 10.3390/min10020178

Han, K. N. (2021). Editorial for special issue “leaching of rare earth elements from various sources.” In *Minerals* (Vol. 11, Issue 2). doi: 10.3390/min11020164

İnan, S., Tel, H., Sert, Çetinkaya, B., Sengül, S., Özkan, B., & Altaş, Y. (2018). Extraction and separation studies of rare earth elements using Cyanex 272 impregnated Amberlite XAD-7 resin. *Hydrometallurgy*, 181. doi: 10.1016/j.hydromet.2018.09.005

Ishida, S., Suzuki, S., Hayano, T., Furuno, H., & Inanaga, J. (2006). Heterogeneous catalysis of novel polymeric rare earth complexes under solvent-free conditions: Zero-emission synthesis of β -amino alcohols. *Journal of Alloys and Compounds*, 408–412, 441–443. doi: 10.1016/j.jallcom.2004.12.079

Johnson, P. R. (2017). Mineral Deposits of North Africa (Mohammed Bouabdellah and John F. Slack, eds.). *Economic Geology*, 112(8). doi: 10.5382/econgeo.112.8.br02

Kiran, R., Kamath, N., Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., & Kamath, S. D. (2025a). A review of recent developments in rare earth-doped nanophosphors for emerging technological applications. *RSC Advances*, 15(25), 20040–20060. doi: 10.1039/D5RA03126E

Kiran, R., Kamath, N., Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., & Kamath, S. D. (2025b). A review of recent developments in rare earth-doped nanophosphors for emerging technological applications. *RSC Advances*, 15(25), 20040–20060. doi: 10.1039/D5RA03126E

Kragh, H. (2016). The Lost Elements: The Periodic Table’s Shadow Side. *Ambix*, 63(1). doi: 10.1080/00026980.2016.1201303

Kumari, A., & Sahu, S. K. (2023). A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet. *Separation and Purification Technology*, 317, 123527. doi: 10.1016/j.seppur.2023.123527

Li, Z., Diaz, L. A., Yang, Z., Jin, H., Lister, T. E., Vahidi, E., & Zhao, F. (2019). Comparative life cycle analysis for value recovery of precious metals and rare earth elements from electronic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 149. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.05.025

Liu, Q., Qian, M., & Huang, Y. (2025a). Studies on the preparation of rare-earth-doped alkaline borosilicate glass and its optical properties. *Next Materials*, 9, 100969. doi: 10.1016/j.nxmate.2025.100969

Liu, Q., Qian, M., & Huang, Y. (2025b). Studies on the preparation of rare-earth-doped alkaline borosilicate glass and its optical properties. *Next Materials*, 9, 100969. doi: 10.1016/j.nxmate.2025.100969

Martínez-Montoya, P. A., del Río, J. M., de J. Morales-Ramirez, A., & Corea, M. (2023). Europium recovery process by means of polymeric nanoparticles functionalized with acrylic acid, curcumin and fumaramide. *Journal of Rare Earths*. doi: 10.1016/j.jre.2023.11.006

Martínez-Montoya, P. A., Sanchez-Alvarado, R. G., Medina-Velazquez, D. Y., Carrera-Jota, M. L., Garnica-Chávez, P., & Morales-Ramirez, A. de J. (2023). Solid-liquid extraction for yttrium recovery using porous polymeric resin (XAD-7) functionalized with D2EHFA. *Journal of Rare Earths*. doi: 10.1016/j.jre.2023.10.026

Metwally, S. S., Hassan, M. A., & Aglan, R. F. (2013). Extraction of copper from ammoniacal solution using impregnated amberlite XAD-7 resin loaded with LIX-54. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3). doi: 10.1016/j.jece.2013.05.002

Mineral Commodity Summaries 2024 – Rare Earths. (n.d.).

Parauha, Y. R., Kalyani, N. T., & Dhoble, S. J. (2025a). Recent trends in rare earth doped luminescent materials: A review. *Journal of Molecular Structure*, 1347, 143190. doi: 10.1016/j.molstruc.2025.143190

Parauha, Y. R., Kalyani, N. T., & Dhoble, S. J. (2025b). Recent trends in rare earth doped luminescent materials: A review. *Journal of Molecular Structure*, 1347, 143190. doi: 10.1016/j.molstruc.2025.143190

Patil, A. B., Tarik, M., Struis, R. P. W. J., & Ludwig, C. (2021). Exploiting end-of-life lamps fluorescent powder e-waste as a secondary resource for critical rare earth metals. *Resources, Conservation and Recycling*, 164. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105153

Rasoulnia, P., Barthen, R., Puhakka, J. A., & Lakaniemi, A. M. (2021). Leaching of rare earth elements and base metals from spent NiMH batteries using gluconate and its potential bio-oxidation products. *Journal of Hazardous Materials*, 414. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125564

Real, A. B. (n.d.). MATERIALES CRÍTICOS Y SOSTENIBILIDAD: LAS TIERRAS RARAS Y LOS IMANES QUE POSIBILITARÁN UNA EUROPA MÁS VERDE.

Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in metal recycling. In *Science* (Vol. 337, Issue 6095). doi: 10.1126/science.1217501

Regueiro y González Barros, M. (2014). Minerales críticos en Europa : metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. *Macla. Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*.

Rogosnitzky, M., & Branch, S. (2016). Gadolinium-based contrast agent toxicity: a review of known and proposed mechanisms. *BioMetals*, 29(3), 365–376. doi: 10.1007/s10534-016-9931-7

Rudnick, R. L., & Gao, S. (2013). Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition (Vol. 4)*. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6

Rybak, A., & Rybak, A. (2021). Characteristics of some selected methods of rare earth elements recovery from coal fly ashes. *Metals*, 11(1). doi: 10.3390/met11010142

Scherzer, J., & Ritter, R. E. (1978). Ion-Exchanged Ultrastable Y Zeolites. 3. Gas Oil Cracking over Rare Earth-Exchanged Ultrastable Y Zeolites. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 17(3), 219–223. doi: 10.1021/i360067a008

Shi, S., Pan, J., Dong, B., Zhou, W., & Zhou, C. (2023). Bioleaching of Rare Earth Elements: Perspectives from Mineral Characteristics and Microbial Species. In *Minerals (Vol. 13, Issue 9)*. doi: 10.3390/min13091186

Strzałkowska, E. (2022). Rare earth elements and other critical elements in the magnetic fraction of fly ash from several Polish power plants. *International Journal of Coal Geology*, 258. doi: 10.1016/j.coal.2022.104015

Szabadvary, F. (1988). Chapter 73 The history of the discovery and separation of the rare earths (pp. 33–80). doi: 10.1016/S0168-1273(88)11005-2

Tan, Q., Li, J., & Zeng, X. (2015). Rare Earth Elements Recovery from Waste Fluorescent Lamps: A Review. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology (Vol. 45, Issue 7)*. doi: 10.1080/10643389.2014.900240

The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2021 & actualizaciones 2023). (n.d.).

Tunsu, C., Ekberg, C., & Retegan, T. (2014). Characterization and leaching of real fluorescent lamp waste for the recovery of rare earth metals and mercury. *Hydrometallurgy*, 144–145. doi: 10.1016/j.hydromet.2014.01.019

Tunsu, C., Petranikova, M., Ekberg, C., & Retegan, T. (2016). A hydrometallurgical process for the recovery of rare earth elements from fluorescent lamp waste fractions. *Separation and Purification Technology*, 161. doi: 10.1016/j.seppur.2016.01.048

Tzili Apango, E. (2014). Reseña del libro: Estudios sobre China desde Latinoamérica : geopolítica, religión e inmigración, por Susan Chen Mok, Jorge Bartels Villanueva y Ricardo Martínez Esquivel , eds., San José: Universidad de Costa Rica, 2013. *Estudios Internacionales*, 46(178). doi: 10.5354/0719-3769.2014.32524

Virolainen, S., Repo, E., & Sainio, T. (2019). Recovering rare earth elements from phosphogypsum using a resin-in-leach process: Selection of resin, leaching agent, and eluent. *Hydrometallurgy*, 189. doi: 10.1016/j.hydromet.2019.105125

Wu, Z., Chen, Y., Wang, Y., Xu, Y., Lin, Z., Liang, X., & Cheng, H. (2023). Review of rare earth element (REE) adsorption on and desorption from clay minerals: Application to formation and mining of ion-adsorption REE deposits. *Ore Geology Reviews*, 157. doi: 10.1016/j.oregeorev.2023.105446

Xia, W., Pei, Z., Leng, K., & Zhu, X. (2020). Research Progress in Rare Earth-Doped Perovskite Manganite Oxide Nanostructures. In *Nanoscale Research Letters* (Vol. 15, Issue 1). doi: 10.1186/s11671-019-3243-0

Yuksekdag, A., Kose-Mutlu, B., Zeytuncu-Gokoglu, B., Kumral, M., Wiesner, M. R., & Koyuncu, I. (2022). Process optimization for acidic leaching of rare earth elements (REE) from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5). doi: 10.1007/s11356-021-16207-0

Zhang, B., Liu, K., Li, J., Chen, B., Huang, C. J., & Soboleva, N. (2025a). A comprehensive review on the rare earth elements improving microstructure and properties of laser cladded coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 1036, 181761. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.181761

Zhang, B., Liu, K., Li, J., Chen, B., Huang, C. J., & Soboleva, N. (2025b). A comprehensive review on the rare earth elements improving microstructure and properties of laser cladded coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 1036, 181761. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.181761

Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017). Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. In *Minerals* (Vol. 7, Issue 11). doi: 10.3390/min7110203

Zhou, Y., Zhu, Y., Chen, P., & Li, X. (2024). Effect of rare earth-transition metal electronic interaction on magnetism in FeCoEr alloys. *Journal of Rare Earths*. doi: 10.1016/j.jre.2024.12.008

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

Los autores declaran que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La Revista Latinoamericana de Difusión Científica declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

