Potenciales impactos medioambientales de la explotación de tierras raras en arcillas iónicas

Experiencia internacional en la explotación de tierras raras

Autor

Enrique Vivanco Font
Email: evivanco@bcn.cl
Tel.: (56) 32 226 3195

Nº SUP: 157222

Resumen

El informe aborda la explotación de tierras raras alojadas en arcillas de adsorción iónica, considerando sus características, métodos de recuperación y aspectos ambientales asociados. Estas arcillas se forman por la meteorización prolongada de rocas, proceso que permite que las tierras raras queden débilmente adsorbidas en minerales arcillosos y puedan ser recuperadas mediante intercambio iónico.

A diferencia de la minería convencional de roca dura, su explotación considera la remoción selectiva del horizonte arcilloso y su contacto con una solución lixiviante, cuyos iones desplazan las tierras raras retenidas en la arcilla. La solución obtenida es posteriormente procesada para recuperar estos elementos y producir un concentrado. Este tipo de explotación se ha desarrollado principalmente en China y también presenta experiencias en Myanmar, Australia y Brasil.

Desde el punto de vista ambiental, la lixiviación presenta riesgos que dependen de factores como el reactivo utilizado, el diseño del sistema de recuperación y las condiciones hidrogeológicas del sitio. En este contexto, existe evidencia de que el uso de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) podría reducir los riesgos asociados al amonio frente al sulfato de amonio.

Asimismo, experiencias con sulfato de amonio y lixiviación *in situ* han registrado impactos como inestabilidad del terreno y presencia de nitrógeno residual con potencial de afectar las aguas subterráneas. Estos antecedentes refuerzan la importancia de una adecuada planificación, evaluación ambiental, control y fiscalización. En consecuencia, con una gestión apropiada de estos factores, este tipo de proyectos puede ser evaluado considerando tanto su potencial productivo como sus riesgos ambientales.

Introducción

El documento responde a la solicitud de información sobre la exploración de tierras raras en arcillas iónicas, materia que ha cobrado interés en Chile a partir de recientes proyectos desarrollados en la Región de Ñuble. En este contexto, el informe presenta antecedentes generales sobre las tierras raras, con especial énfasis en aquellas presentes en arcillas iónicas, sus principales métodos de explotación y los potenciales impactos ambientales asociados.

La información presentada se basa en fuentes públicas y especializadas, debidamente citadas a lo largo del informe.

Traducciones del autor.

¿Qué son las tierras raras?

Las tierras raras corresponden a un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica: los 15 lantánidos, que van desde el lantano (La) hasta el lutecio (Lu), además del escandio (Sc) y el itrio (Y)[1]. Estos elementos presentan propiedades físicas y químicas similares, especialmente por su comportamiento como metales y por sus características magnéticas, ópticas, eléctricas y catalíticas. Sin embargo, cada uno posee propiedades particulares que determinan sus distintos usos tecnológicos. Entre los más conocidos se encuentran el cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio y disprosio, entre otros[2].

En cuanto a su abundancia, aunque las tierras raras no son necesariamente escasas en la corteza terrestre, suelen encontrarse dispersas y en bajas concentraciones. Esta varía desde aproximadamente 60 ppm[3] para el cerio (Ce) hasta 0,5 ppm para el tulio (Tm) y el lutecio (Lu). En estado elemental, son metales generalmente blandos, maleables, dúctiles y reactivos, cuyas propiedades particulares permiten su uso en diversas aplicaciones tecnológicas[4].

De igual manera, las tierras raras poseen propiedades magnéticas, ópticas, eléctricas y químicas particulares que permiten su utilización en diversas aplicaciones tecnológicas. Entre ellas destacan los imanes permanentes, equipos electrónicos, catalizadores, baterías, sistemas de iluminación y láseres, además de tecnologías vinculadas con vehículos eléctricos y energías renovables. Su importancia depende de las propiedades específicas de cada elemento y de las características de la aplicación en que se utiliza[5].

---

[1] El escandio (Sc) y el itrio (Y) son elementos químicos metálicos que forman parte del grupo de las tierras raras, aunque no pertenecen a los lantánidos. La clasificación –como perteneciente al grupo de tierras raras- responde principalmente a sus similitudes químicas y a que suelen encontrarse asociados a los lantánidos en los depósitos minerales. Por ello, cuando se habla de las 17 tierras raras, se incluyen los 15 lantánidos más el escandio y el itrio.
[2] U.S. Geological Survey. (2018). Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply (Professional Paper 1802).
[3] Partes por millón, es decir, 60 ppm de cerio equivale a 60 unidades de cerio por cada millón de unidades de material.
[4] U.S. Geological Survey. (s/f). Rare earths statistics and information.
[5] Ibídem.

Depósitos de arcillas iónicas

A nivel internacional, el interés por las arcillas de adsorción iónica se debe a su concentración de tierras raras pesadas, cuya oferta es más limitada. Según el USGS (s/f), los depósitos del sur de China han sido una fuente relevante de estos elementos. En este escenario, el crecimiento de la demanda de imanes permanentes de alto rendimiento ha impulsado la exploración de yacimientos similares en otros países, buscando diversificar su suministro[6].

Respecto de estas formaciones, las arcillas iónicas son depósitos superficiales formados por la meteorización[7] prolongada de rocas, generalmente graníticas. Durante este proceso, las tierras raras se liberan de los minerales originales y quedan débilmente adsorbidas en partículas de arcilla, como la caolinita y la haloisita[8]. En este marco, de acuerdo a lo publicado por Interferencia (2026) el interés por estos depósitos también se ha extendido a Chile, particularmente a la Región de Ñuble, donde se han desarrollado iniciativas de exploración orientadas a evaluar su potencial[9].

Explotación de los depósitos de arcillas iónicas

Por lo indicado anteriormente, esta característica –liberación de las tierras raras desde rocas por eventos de meteorización prolongados- permite extraerlas mediante un proceso distinto de la minería convencional de roca dura. En términos generales, se remueve selectivamente el horizonte arcilloso, se pone en contacto con una solución lixiviante[10] y se produce un intercambio iónico: los iones de la solución desplazan a las tierras raras adsorbidas en la arcilla. La solución resultante contiene tierras raras disueltas y posteriormente se procesa para obtener un concentrado de tierras raras. Finalmente, las tierras raras pueden separarse en productos individuales, como neodimio, praseodimio, disprosio y terbio[11].

En los depósitos de arcillas iónicas, la arcilla actúa principalmente como una matriz que retiene o adsorbe los elementos de tierras raras. Por ello, el objetivo de la extracción y el procesamiento no es comercializar la arcilla, sino recuperar las tierras raras asociadas a ella y producir un concentrado. En Penco, el expediente ambiental define el proyecto como una faena minera y planta de procesamiento de arcillas con presencia de tierras raras, cuyo objetivo es producir dicho concentrado[12].

Complementando lo anterior, este método se ha utilizado principalmente en el sur de China, donde las arcillas de adsorción iónica constituyen una fuente histórica de tierras raras pesadas. También se ha

---

6 U.S. Geological Survey. (s/f). Rare earth element accumulation processes resulting in high-value metal enrichments in regolith.

7 La meteorización es el proceso prolongado mediante el cual las rocas se descomponen y alteran gradualmente por la acción del agua, cambios de temperatura y otros factores ambientales, liberando los minerales y elementos que contienen.

8 U.S. Geological Survey. (2014). Rare earth elements—Critical resources for a high-tech world

9 Interferencia (2026, 12 de septiembre). La nueva avanzada de las tierras raras: solicitudes mineras y fondos de inversión tras el rastro de Minería Activa.

10 La solución lixiviante es un líquido que contiene sustancias químicas capaces de disolver o extraer determinados componentes de un material sólido, como un mineral. En minería, se utiliza para poner en contacto el mineral con el líquido y solubilizar el metal de interés, que luego puede recuperarse mediante procesos posteriores.

11 Op.cit. U.S. Geological Survey. (2014).

12 Servicio de Evaluación Ambiental. (2024). Proyecto de desarrollo minero de extracción de arcillas para producción de concentrado de tierras raras: Antecedentes del proyecto Módulo Penco [Expediente ambiental].

aplicado en el norte de Myanmar, especialmente en el estado de Kachin, desde donde se han enviado concentrados hacia China. No obstante, en Myanmar la explotación ha sido cuestionada por sus posibles efectos sobre los suelos, las aguas y los ecosistemas, debido al uso de lixiviantes y a la limitada información pública sobre las condiciones de operación[13].

Asimismo, en Australia Meridional existen depósitos de tierras raras alojadas en arcillas iónicas, cuya explotación considera la remoción selectiva de arcillas superficiales y procesos de lixiviación o desorción iónica para liberar las tierras raras. Posteriormente, estas son recuperadas desde la solución obtenida y procesadas para generar un concentrado o producto mixto. Además, los reactivos utilizados, el diseño de las instalaciones y los potenciales impactos ambientales dependen de las características y condiciones particulares de cada proyecto[14,15].

Finalmente, este método también se ha desarrollado en Brasil, particularmente en el depósito Serra Verde, en Goiás, donde las tierras raras se recuperan desde arcillas iónicas mediante lixiviación y posterior procesamiento de la solución para obtener un concentrado mixto. De este modo, Brasil constituye un antecedente relevante de la explotación de tierras raras alojadas en arcillas iónicas mediante lixiviación y procesamiento de la solución obtenida[16].

Potenciales impactos medio ambientales

A continuación, se describen potenciales impactos ambientales asociados a la explotación de arcillas iónicas, considerando antecedentes de casos estudiados y las características de los métodos utilizados.

- Contaminación de aguas subterráneas y superficiales: el lixiviante puede movilizar amonio, sulfatos, tierras raras y metales pesados si no se recupera y trata adecuadamente. En estudios sobre depósitos chinos se han registrado concentraciones elevadas de sulfato de amonio en aguas subterráneas[17].
- Alteración del suelo y pérdida de fertilidad: la infiltración de soluciones puede modificar el pH, aumentar la salinidad y alterar la estructura y composición química del suelo. La lixiviación en pilas también puede dejar residuos ácidos y dificultar la recuperación de la vegetación[18,19].
- Eutrofización y toxicidad: la liberación de amonio y nitrógeno puede afectar cursos de agua y favorecer procesos de eutrofización. Además, la movilización de metales y sales puede generar efectos ecotoxicológicos sobre organismos acuáticos y terrestres[20].
- Erosión, deslizamientos y pérdida de biodiversidad: la remoción de cobertura vegetal, la apertura de caminos y las excavaciones pueden aumentar la erosión y la inestabilidad de laderas. En el

[13] University of Warwick. (2024). Rare earth mining in Myanmar: A primer.
[14] Department for Energy and Mining. (2023). Rare earths.
[15] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation,CSIRO. (2024). Supplementary report: Rare earths. From minerals to materials: Assessment of Australia's critical mineral mid-stream processing capabilities.
[16] Serra Verde Group. (2024, 11 de enero). Serra Verde enters commercial production.
[17] Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022). Environmental impacts of rare earth production.
[18] Op.cit Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022).
[19] Yang, X., et al. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation.
[20] Op.cit. Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022).

sur de China se han documentado pérdida de vegetación, degradación de ecosistemas y deslizamientos asociados a antiguas prácticas de explotación[21].

- Residuos y radionúclidos naturales: aunque las arcillas iónicas suelen presentar menor radioactividad que minerales como la monacita, el procesamiento puede concentrar uranio, torio o sus descendientes en determinadas corrientes. Por eso, se requieren análisis radiológicos específicos y una gestión diferenciada cuando corresponda[22,23].

A continuación, la Tabla 1 presenta algunos casos documentados de explotación y procesamiento de tierras raras que permiten identificar impactos medio ambientales efectivos o potenciales, así como los antecedentes disponibles sobre su evaluación y gestión ambiental.

Tabla 1. Casos documentados de explotación y procesamiento de tierras raras e impactos medio ambientales asociados

Caso	Impacto medio ambiental identificado, efectivo o potencial	Evaluación medio ambiental
Sur de China[24,25]	En diferentes etapas de explotación se utilizó minería superficial, lixiviación en pilas y lixiviación *in situ*. Los principales problemas y causante de impacto medio ambiental fueron el uso excesivo de reactivos, infiltración de soluciones, contaminación de aguas, erosión, pérdida de vegetación y deslizamientos. También, se describe en la zona, minería ilegal o con bajos estándares ambientales.	Existían mecanismos de autorización y normas ambientales, pero numerosos sitios operaron históricamente con fiscalización insuficiente o fuera del marco legal. El problema no fue sólo la existencia o no de una evaluación medio ambiental, sino la baja calidad del control, la operación ilegal y la falta de restauración efectiva.
Myanmar, estado de Kachin[26]	La explotación mediante lixiviación *in situ* ha sido cuestionada por la inyección de soluciones en el suelo, la contaminación de cursos de agua, la deforestación, la erosión y la falta de transparencia sobre reactivos, residuos y monitoreo	No se dispone de evidencia relevante y pública suficiente de evaluaciones ambientales completas y sistemáticas para gran parte de las operaciones. La debilidad institucional, el contexto de conflicto y la informalidad dificultan la evaluación medio ambiental previa, la participación ciudadana y la fiscalización.
Lynas, Malasia[27]	El problema principal no fue una mina de arcillas iónicas, sino el procesamiento de concentrado de roca	Sí hubo evaluación y revisión radiológica. Sin embargo, la IAEA recomendó fortalecer el análisis de efluentes hacia el río Balok, la

[21] Gao, Y., et al. (2023). Evaluation study of ecological resilience in southern red soil mining areas considering rare earth mining process. Sustainability, 15(3), 2258. Disponible en: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2258 (octubre 2026).
[22] Op.cit. Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022).
[23] International Atomic Energy Agency, IAEA. (2015). Report of the International Post-Review Mission on the Radiation Safety Aspects of the Operation of a Rare Earth Processing Facility and Assessment of the Implementation of the 2011 Mission Recommendations.
[24] Op.cit. Yang, X., et al. (2013).
[25] Op.cit. Gao, Y., et al. (2023).
[26] Op.cit. University of Warwick. (2024).
[27] Op.cit. IAEA. (2015).

	dura procedente de Mount Weld, Australia. Se generaron residuos de purificación con radionúclidos naturales, especialmente torio, y se cuestionó la solución de almacenamiento y disposición de largo plazo. La IAEA también observó que la evaluación radiológica debía mejorar el análisis de impactos sobre aguas superficiales y subterráneas	modelación de aguas subterráneas y la definición de una instalación permanente para los residuos. En consecuencia, el estudio medio ambiental presentó aspectos que debían complementarse.
Serra Verde, Brasil[28]	El proyecto utiliza arcillas iónicas y cuenta con explotación a cielo abierto y planta de procesamiento. Los riesgos identificados fueron: manejo de aguas, biodiversidad, residuos, calidad del agua superficial y estabilidad de instalaciones. La evaluación de debida diligencia clasificó el proyecto como de categoría ambiental y social alta por involucrar una mina a gran escala.	Se elaboró una evaluación ambiental y social, además de auditorías de las operaciones existentes. La documentación identificó riesgos y estableció planes de acción y condiciones operacionales.

Fuente: elaboración propia sobre la base de las fuentes citadas en cada caso.

En atención a lo anterior, la lixiviación de arcillas iónicas no sería, de forma aislada, un proceso intrínsecamente peligroso, ya que sus riesgos dependen principalmente del reactivo utilizado, del diseño del sistema de recuperación y de las condiciones hidrogeológicas del sitio[29].

En este sentido, existe evidencia de que estos riesgos pueden reducirse mediante la selección del reactivo utilizado. Por ejemplo, el uso de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) en reemplazo del sulfato de amonio permite reducir los riesgos asociados a la presencia de amonio y puede contribuir a un mayor control ambiental del proceso[30,31].

Por otro lado y para tener en consideración, cuando se utiliza la técnica basada en sulfato de amonio y lixiviación *in situ*, sí se han documentado impactos medio ambientales relevantes. Entre ellos se encuentran problemas de inestabilidad geotécnica del terreno y la presencia de concentraciones

[28] U.S. International Development Finance Corporation. (2025). Environmental and social impact assessment for the Serra Verde Pesquisa e Mineracao Ltda, Brazil.
[29] Op.cit Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022).
[30] Mohamad Sobri, N. A., Harun, N., & Mohd Yunus, M. Y. (2025). Enhancing rare earth elements stability in ion adsorption clays during ion-exchange leaching with salt solutions: A thermodynamic approach through Pourbaix diagrams.
[31] Yin, S., Pei, J., Jiang, F., Li, S., Peng, J., Zhang, L., Ju, S., & Srinivasakannan, C. (2018). Ultrasound-assisted leaching of rare earths from the weathered crust elution-deposited ore using magnesium sulfate without ammonia-nitrogen pollution.

elevadas de nitrógeno residual en los relaves, que pueden permanecer en profundidad y representar un riesgo para las aguas subterráneas incluso años después del cierre de la faena[32,33].

En consecuencia, la lixiviación de arcillas iónicas no implicaría por sí misma un riesgo determinado, ya que sus posibles impactos dependen principalmente del reactivo utilizado, del diseño del sistema de recuperación, de las condiciones hidrogeológicas del sitio y del monitoreo durante la operación y después del cierre. Por ello, la evaluación debe centrarse en las condiciones concretas de cada proyecto y en su capacidad para prevenir, controlar y monitorear los posibles impactos durante todo su ciclo de vida[34,35,36,37].

Referencias

- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO. (2024). Supplementary report: Rare earths. From minerals to materials: Assessment of Australia's critical mineral mid-stream processing capabilities. Disponible en: https://www.csiro.au/-/media/Science-Connect/Futures/Minerals-to-materials/CMRDD_Rare-Earths_FINAL.pdf (octubre 2026).
- Department for Energy and Mining. (2023). Rare earths. Government of South Australia. Disponible en: https://www.energymining.sa.gov.au/industry/minerals-and-mining/mineral-commodities/rare_earths (octubre 2026).
- Gao, Y., et al. (2023). Evaluation study of ecological resilience in southern red soil mining areas considering rare earth mining process. Sustainability, 15(3), 2258. Disponible en: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2258 (octubre 2026).
- Han, Y.-H., et al., & Chen, Z. (2025). Environmental impacts of rare earth elements mining and strategies for sustainable management: A comprehensive review. Journal of Hazardous

[32] Tao, J.-L., Deng, Y.-C., Ye, D.-X., Chen, B.-F., Zhou, Y., Zhong, J.-G., Wang, X., & Wang, W. (2025). Fine exploration and green development of ion-adsorption type REE deposits in South China using multi-geophysical technology.
[33] Ou, X., Chen, Z., Hong, B., Wang, H., Feng, L., Liu, Y., Zhu, M., & Chen, Z. (2023). Transport and distribution of residual nitrogen in ion-adsorption rare earth tailings.
[34] Han, Y.-H., et al., & Chen, Z. (2025). Environmental impacts of rare earth elements mining and strategies for sustainable management: A comprehensive review.
[35] Op.cit Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022).
[36] Op.cit. Mohamad Sobri, N. A., Harun, N., & Mohd Yunus, M. Y. (2025).
[37] Op.cit. Tao, J.-L., Deng, Y.-C., Ye, D.-X., Chen, B.-F., Zhou, Y., Zhong, J.-G., Wang, X., & Wang, W. (2025).

Materials, 500, Artículo 140400. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140400 (octubre 2026).

- Interferencia (2026, 12 de septiembre). La nueva avanzada de las tierras raras: solicitudes mineras y fondos de inversión tras el rastro de Minería Activa. Interferencia. Comunicaciones OLCA. Disponible en: https://interferencia.cl/articulos/la-nueva-avanzada-de-las-tierras-raras-solicitudes-mineras-y-fondos-de-inversion-tras-el (octubre 2026).
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2015). Report of the International Post-Review Mission on the Radiation Safety Aspects of the Operation of a Rare Earth Processing Facility and Assessment of the Implementation of the 2011 Mission Recommendations. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/lynas-report-20052015.pdf (octubre 2026).
- Mohamad Sobri, N. A., Harun, N., & Mohd Yunus, M. Y. (2025). Enhancing rare earth elements stability in ion adsorption clays during ion-exchange leaching with salt solutions: A thermodynamic approach through Pourbaix diagrams. Jurnal Teknologi, 88. Disponible en: https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v88.23169 (octubre 2026).
- Ou, X., Chen, Z., Hong, B., Wang, H., Feng, L., Liu, Y., Zhu, M., & Chen, Z. (2023). Transport and distribution of residual nitrogen in ion-adsorption rare earth tailings. Environmental Research, 237, Artículo 116975. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116975 (octubre 2026).
- Serra Verde Group. (2024, 11 de enero). Serra Verde enters commercial production. Disponible en: https://www.serraverde.com/2024/01/serra-verde-enters-commercial-production/ (octubre 2026).
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2024). Proyecto de desarrollo minero de extracción de arcillas para producción de concentrado de tierras raras: Antecedentes del proyecto Módulo Penco [Expediente ambiental]. Gobierno de Chile. Disponible en: https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=2024/06/10/b37b-a97d-4bb4-b2b9-fad756a9ba34 (octubre 2026).
- Tao, J.-L., Deng, Y.-C., Ye, D.-X., Chen, B.-F., Zhou, Y., Zhong, J.-G., Wang, X., & Wang, W. (2025). Fine exploration and green development of ion-adsorption type REE deposits in South China using multi-geophysical technology. Frontiers in Earth Science, 13, 1489870. Disponible en: https://doi.org/10.3389/feart.2025.1489870 (octubre 2026).
- U.S. Geological Survey. (2014). Rare earth elements—Critical resources for a high-tech world (Fact Sheet 2014–3078). U.S. Department of the Interior. Disponible en: https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3078/ (octubre 2026).
- U.S. Geological Survey. (2018). Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply (Professional Paper 1802). U.S. Department of the Interior. Disponible en: https://pubs.usgs.gov/publication/pp1802O (octubre 2026).
- U.S. Geological Survey. (s/f). Rare earth element accumulation processes resulting in high-value metal enrichments in regolith. Disponible en: https://www.usgs.gov/centers/geology-energy-and-minerals-science-center/science/rare-earth-element-accumulation (octubre 2026).
- U.S. Geological Survey. (s/f). Rare earths statistics and information. National Minerals Information Center. Disponible en: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information (octubre 2026).

- U.S. International Development Finance Corporation. (2025). Environmental and social impact assessment for the Serra Verde Pesquisa e Mineracao Ltda, Brazil. Disponible en: https://www.dfc.gov/sites/default/files/esia/2025/serraverde/eia_serraverde.html (octubre 2026).
- University of Warwick. (2024). Rare earth mining in Myanmar: A primer. Disponible en: https://warwick.ac.uk/fac/arts/schoolforcross-facultystudies/research/projects/rare_earth_mining_myanmar/briefing_paper_1_rare_earth_mining_in_myanmar_a_primer.pdf (octubre 2026).
- Yang, X., et al. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. Environmental Development, 8, 131–136. Disponible en: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013EnvDe...8..131Y/abstract (octubre 2026).
- Yin, S., Pei, J., Jiang, F., Li, S., Peng, J., Zhang, L., Ju, S., & Srinivasakannan, C. (2018). Ultrasound-assisted leaching of rare earths from the weathered crust elution-deposited ore using magnesium sulfate without ammonia-nitrogen pollution. Disponible en: https://khazna.ku.ac.ae/en/publications/ultrasound-assisted-leaching-of-rare-earths-from-the-weathered-cr/ (octubre 2026).
- Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022). Environmental impacts of rare earth production. MRS Bulletin, 47(3), 267–275. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8929459/ (octubre 2026).