

Artículo original / original article

Tierras Raras, Hegemonía y Soberanía Geotecnológica: Una Estrategia Crítico-Propositiva para el Sur Global y América Latina (2025-2040)

Rare Earths, Hegemony and Geotechnological Sovereignty: A Critical-Propositive Strategy for the Global South and Latin America (2025-2040)

José Wilson Gómez-Cumpa^{1*}; María Margarita Fanning-Balarezo¹

¹Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú

*Autor de correspondencia: jwgomezxxi@gmail.com

Recibido: 14 de noviembre 2025 / Aceptado: 15 de diciembre 2025 / Publicado: 30 de enero 2026

RESUMEN

La transición energética y digital ha convertido a las tierras raras y los materiales críticos en insumos estratégicos del poder tecnológico mundial, mientras el Sur Global permanece en un modelo extractivista que limita la captura de valor. Este ensayo analiza la soberanía geotecnológica, identificando vulnerabilidades en América Latina y el Perú, y proponiendo rutas para superarlas. Se empleó un enfoque cualitativo basado en revisión documental, análisis de cadenas globales de valor y un estudio de caso del Perú. Los hallazgos muestran que el midstream es el principal chokepoint geopolítico, dominado por China, en un contexto de disputa con Estados Unidos y la Unión Europea. En Perú, la falta de política industrial ha derivado en la "Paradoja de Aclara", evidenciando la fuga de valor agregado. Se concluye que la soberanía geotecnológica depende del dominio del know-how de transformación, por lo que el Sur Global requiere estrategias de refinamiento, leapfrogging tecnológico y cooperación regional.

Palabras clave: dependencia económica; desarrollo tecnológico; política industrial

ABSTRACT

The energy and digital transitions have transformed rare earth elements and critical materials into strategic inputs for global technological power, while the Global South remains trapped in an extractive model that limits value capture. This essay analyzes geotechnological sovereignty, identifying vulnerabilities in Latin America and Peru, and proposing pathways to overcome them. A qualitative approach was employed, based on document review, analysis of global value chains, and a case study of Peru. The findings show that the midstream sector is the main geopolitical chokepoint, dominated by China, in a context of dispute with the United States and the European Union. In Peru, the lack of an industrial policy has led to the "Aclara Paradox," highlighting the leakage of added value. The essay concludes that geotechnological sovereignty depends on mastering transformative know-how, and therefore the Global South requires refinement strategies, technological leapfrogging, and regional cooperation.

Keywords: economic dependence; hegemony; technological development; industrial policy



1. Introducción

La economía global se encuentra en una fase de intensa reconfiguración, marcada por dos transiciones simultáneas e interdependientes: la transición energética (hacia matrices de bajo carbono) y la transición digital (impulsada por la Inteligencia Artificial, la computación cuántica y la defensa avanzada) (Comisión Europea, 2023; Funcas, 2025). Este doble imperativo tecnológico ha catalizado un cambio fundamental en la percepción de los recursos naturales. Elementos como el cobre, el litio y, crucialmente, las Tierras Raras (TR), han dejado de ser simples commodities para convertirse en los pilares físicos e insustituibles de la infraestructura de poder del siglo XXI (Funcas, 2025).

El grupo de las TR, compuesto por 17 metales que incluyen los 15 lantánidos, el Escandio y el Ytrio, es el caso de estudio paradigmático (SWI swissinfo.ch, 2025). Su valor no reside en su escasez geológica, sino en sus propiedades fisicoquímicas únicas, que son indispensables para la fabricación de imanes permanentes de alto rendimiento (necesarios para turbinas eólicas, vehículos eléctricos) y aleaciones estratégicas (esenciales para la industria aeroespacial y militar) (Funcas, 2025).

En este contexto de competencia estratégica intensificada (2024-2026), la tesis central de este análisis es que la dependencia extractivista histórica que ha caracterizado la inserción económica del Sur Global ha mutado hacia una forma más profunda: la subordinación geotecnológica. La disputa por la hegemonía global se libra hoy en el control del know-how de procesamiento, el denominado *midstream*, no en la mera extracción de la materia prima. Si el Sur Global, y en particular América Latina, no logra desarrollar una capacidad soberana en estas fases críticas de la cadena de valor, la creciente demanda generada por el "boom verde" solo servirá para incrementar la transferencia de valor y dependencia hacia las potencias que controlan el procesamiento (principalmente China y, en menor medida, Occidente) (Funcas, 2025). El desarrollo impulsado por la transición energética global representa, por lo tanto, un riesgo de extractivismo renovado si no se acompaña de una política industrial activa (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024).

En este contexto, el objetivo de este ensayo es analizar la noción de soberanía geotecnológica en el contexto de los materiales críticos y las tierras raras, evidenciando las vulnerabilidades geopolíticas en América Latina y el Perú, proponiendo rutas estratégicas para superar el extractivismo tradicional.

2. Materiales y métodos

Este ensayo utiliza una metodología cualitativa, analítico-crítica y propositiva, basada en una revisión documental especializada de literatura científica reciente, informes técnicos y documentos de política pública. Se aplica un análisis de la cadena global de valor para identificar asimetrías de poder y *chokepoints* geopolíticos, complementado con un análisis geopolítico comparado entre China, EE. UU., la UE, el BRICS y el Sur Global. Incorpora un estudio de caso instrumental (Perú) y un enfoque diagnóstico-crítico-prospectivo, orientado a proponer estrategias de soberanía geotecnológica, *leapfrogging* tecnológico y cooperación regional.

3. Resultados y discusión

3.1. Fundamentos de la Soberanía Geotecnológica

Para comprender la naturaleza de esta nueva dependencia, es esencial definir el concepto de Soberanía Geotecnológica, como se observa en la **Figura 1**. A diferencia de la soberanía de recursos tradicional, que se limita al control legal y físico sobre la extracción minera, la soberanía geotecnológica se define como la capacidad estatal de participar y capturar valor en las fases de procesamiento (refinamiento, separación de óxidos), metalurgia y, crucialmente, de aplicación (manufactura avanzada e Investigación y Desarrollo - I+D) de aquellos materiales que definen el poder tecnológico, militar y energético.

El fundamento material de esta soberanía se valida al examinar las aplicaciones técnicas de alto valor, un ejercicio que demuestra que el valor real se ubica en la física aplicada y la química de materiales, no simplemente en el contenido de la roca.



Figura 1. Soberanía Geotecnológica: El Poder Real tras las Tierras Raras

Nota: Muestra la dependencia de sectores estratégicos (energía limpia, defensa y tecnología digital) respecto a las tierras raras, componentes esenciales en imanes permanentes y sistemas de alta tecnología. Fuente: Elaboración propia basada en Adamas Intelligence (2024).

3.1.1. Energía y Superconductividad

Las TR como el Itrio, Samario y Neodimio son vitales en la fabricación de superconductores de alta temperatura (HTS) de segunda generación, específicamente los conocidos como REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) (Tian et al., 2023). Estas aleaciones son fundamentales para futuros reactores de fusión compactos (tokamaks) y para la nueva generación de motores eléctricos de alta densidad utilizados en la aviación y la electromovilidad pesada (Tian et al., 2023; Wan et al., 2025).

La barrera para la soberanía geotecnológica en este campo no es el metal en sí, sino el know-how de manufactura. El dominio tecnológico reside en el modelamiento multiescala concurrente y el análisis de comportamiento mecánico para resolver problemas de delaminación y estrés en las bobinas bajo condiciones criogénicas y electromagnéticas extremas (Guo et al., 2025; Tang et al., 2023). Esto demuestra que la brecha de valor que separa al Sur Global de las potencias es fundamentalmente cognitiva e industrial, no meramente geológica.

3.1.2. Almacenamiento Avanzado, Aleaciones Estratégicas y Nanoelectrónica

Las TR como el Itrio, Samario y Neodimio son vitales en la fabricación de superconductores de alta temperatura (HTS) de segunda generación, específicamente los conocidos como REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) (Tian et al., 2023). Estas aleaciones son fundamentales para futuros reactores de fusión compactos (tokamaks) y para la nueva generación de motores eléctricos de alta densidad utilizados en la aviación y la electromovilidad pesada (Tian et al., 2023; Wan et al., 2025).

En el ámbito del almacenamiento de energía, las TR (Lantano, Itrio, Cerio) son empleadas como dopantes claves. Por ejemplo, la sustitución elemental con Itrio (Y^{3+}) en aleaciones tipo A₂B₇ de La-Mg-Ni mejora drásticamente la estabilidad cíclica de las baterías de Níquel-Hidruro Metálico (Ni-MH), reteniendo más del 90% de su capacidad tras 50 ciclos (Verbovytsky & Zavalij, 2025). Asimismo, el dopaje con iones de Lantano (La^{3+}) en cátodos de óxido de

manganeso (Mn_2O_3) mejora el ciclo de vida de las baterías de Zinc-Ion Acuosas (AZIBs) (X. Li et al., 2025).

Respecto a los materiales estructurales, las TR actúan como micro-aleantes esenciales en cantidades mínimas. El dopaje con Disprosio (Dy) y Holmio (Ho) mejora la resistencia a la corrosión de las aleaciones de Magnesio (Mg), críticas para el aligeramiento de estructuras automotrices y aeroespaciales (Karakchieva et al., 2025). De igual modo, el Ytrio (Y) mejora la resistencia a la fragilización por hidrógeno en superaleaciones críticas como el Inconel 718, vitales para la defensa (Guimarães et al., 2024).

En la frontera de la electrónica cuántica, las propiedades luminiscentes de las TR las hacen insustituibles. Iones como el Europio (Eu^{3+}) se utilizan en plataformas de detección inteligente (Zhu et al., 2025), y en la óptica avanzada, el dopaje de nanocristales permite la upconversion (conversión de luz infrarroja a visible) para aplicaciones biomédicas (M. Li et al., 2020). Más estratégicamente, en el campo de la Spintrónica y Orbitrónica, las TR se investigan por su capacidad de generar un "torque de órbita de espín" (spin-orbit torque) colosal, fundamental para el control de estados cuánticos (Zeier et al., 2025).

La conclusión técnica es clara: la soberanía geotecnológica no se logra al poseer la roca, sino al dominar la cadena de I+D que transforma esa roca en tecnología estratégica.

3.2. El Midstream como Chokepoint Geopolítico: La Concentración Global y la Carrera por la Hegemonía

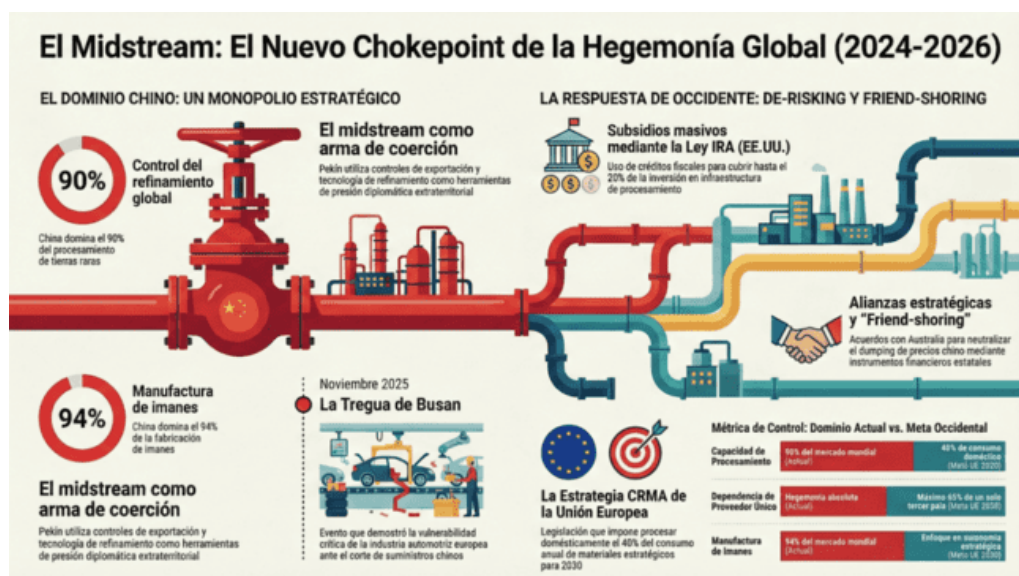


Figura 2. El Midstream: El Nuevo Chokepoint de la Hegemonía Global (2024-2026)

Nota: Muestra la dependencia de sectores estratégicos (energía limpia, defensa y tecnología digital) respecto a las tierras raras. Se resalta su rol crítico en la fabricación de imanes permanentes, fibra óptica y sistemas de guiado. Fuente: Elaboración propia basada en Adamas Intelligence (2024).

El escenario geopolítico actual (2024-2026), como se muestra en la **Figura 2**, está definido por una lucha explícita por la resiliencia de las cadenas de suministro, cuyo punto de estrangulamiento (chokepoint) es el procesamiento (midstream) de los Materiales Críticos (MC) y Tierras Raras (TR).

3.2.1. El Dominio Chino: Concentración, Control y Coerción

La República Popular China ha consolidado una posición hegemónica en las fases de valor agregado de la cadena de suministro global. Aunque su cuota en la minería de TR fluctúa, su control es abrumador en el refinamiento, alcanzando aproximadamente el 90% de la capacidad

mundial, y en la manufactura de imanes permanentes de alto rendimiento, con un dominio de cerca del 94% (Funcas, 2025). Este control de las etapas intermedias y finales le confiere a Pekín un poder de coerción geopolítica irrefutable.

Este poder se manifestó de forma contundente en la escalada de controles de exportación durante 2024 y 2025. Los informes de la Agencia Internacional de Energía (IEA) confirmaron que China amplió sus restricciones en octubre de 2025, abarcando no solo 12 elementos de TR, sino también la tecnología de refinamiento, separación y fabricación de imanes (Dans, 2025; IEA, 2025). Esta medida buscó asegurar que los controles tuvieran una jurisdicción extraterritorial, afectando a componentes fabricados en el extranjero que utilizaran tecnología china (Dans, 2025; IEA, 2025).

La crisis de suministro inminente que esto provocó, especialmente ante la amenaza de paralizar líneas de producción automotriz en la Unión Europea, llevó a una desescalada temporal conocida como la "Tregua de Busan" en noviembre de 2025. Este evento demostró que la dependencia occidental del midstream chino no es un riesgo teórico a largo plazo, sino una vulnerabilidad de seguridad nacional con consecuencias económicas inmediatas, reforzando el concepto del "efecto estrangulamiento" (chokepoint effect) (Dans, 2025).

3.2.2. Políticas Defensivas de Occidente: IRA, CRMA y la Estratégica del Friend-Shoring

La respuesta de Estados Unidos y la Unión Europea ha sido la articulación de políticas industriales defensivas destinadas a realizar el "des-riesgo" (de-risking) de sus cadenas de suministro, buscando la relocalización de la capacidad de procesamiento en territorios propios o aliados (friend-shoring).

3.2.2.1. La Ley de Reducción de la Inflación (IRA) de EE.UU.

La Inflation Reduction Act (IRA) de EE.UU. es fundamentalmente una política industrial que utiliza subsidios masivos y créditos fiscales para relocalizar toda la cadena de suministro de tecnología limpia (U.S. Department of the Treasury, 2023). Programas como el Crédito para Proyectos de Energía Avanzada, que puede cubrir hasta el 30% de la inversión, se dirigen explícitamente a fomentar la construcción de infraestructura de procesamiento en EE.UU. y sus aliados (U.S. Department of the Treasury, 2023).

El pilar de la estrategia de friend-shoring se materializó en octubre de 2025 con la firma de una alianza de minerales críticos con Australia (Ríos Fernández, 2025). Australia, en su rol de proveedor clave, complementó esta alianza con su Critical Minerals Strategy, respaldada por una reserva de A\$1.2 mil millones (aproximadamente USD 782 millones) (Mayra, 2025). Es relevante destacar que esta "reserva" opera como un conjunto de instrumentos financieros, como acuerdos de compraventa a largo plazo (offtake agreements), para dar certeza de precios a los productores y asegurar el financiamiento privado, neutralizando la capacidad de China de ejercer dumping de precios contra competidores emergentes (Mayra, 2025).

3.2.2.2. La Ley de Materias Primas Críticas (CRMA) de la UE

La Critical Raw Materials Act (CRMA), que entró en vigor en mayo de 2024, establece objetivos estratégicos claros para 2030, que dirigen la inversión y el esfuerzo regulatorio (Comisión Europea, 2023; Funcas, 2025). Estos objetivos incluyen alcanzar el 10% del consumo anual de la UE en extracción doméstica, el 25% en reciclaje doméstico, y, críticamente, el 40% del consumo anual de la UE en procesamiento doméstico (Comisión Europea, 2023). Además, la legislación impone un límite de dependencia de no más del 65% del consumo de cualquier material estratégico proveniente de un solo tercer país (Comisión Europea, 2023).

El efecto geo-económico de estas políticas (IRA y CRMA) es que la competencia global por el procesamiento se ha desplazado de la geología a la capacidad financiera de subsidiar el CAPEX y OPEX de las nuevas refinerías. Las potencias occidentales no buscan la autosuficiencia geológica, sino una diversificación del midstream que sea subsidiada por el Estado, generando una demanda artificialmente atractiva de inversión en procesamiento (Ríos Fernández, 2025).

En la **Tabla 1**, se muestra el desequilibrio de la cadena global del valor de ls TR.

Tabla 1. Desequilibrio de la Cadena Global de Valor de Tierras Raras (2025).

Fase de la Cadena	Actividad Principal	Concentración de Capacidad Global (Estimada)	Potencia o Bloque Dominante	Fuente de Poder Geopolítico
Upstream (Extracción)	Minería y Concentración de Mineral	~60%	China / EE.UU. / Australia	Control de la Oferta Bruta
Midstream (Procesamiento)	Refinamiento y Separación de Óxidos	~90% (Tierras Raras)	China	Efecto Estrangulamiento (Chokepoint) (Dans, 2025)
Downstream (Manufactura)	Imanes, Aleaciones, Componentes HTS	~94% (Imanes de alto rendimiento)	China	Control del Know-How Tecnológico
Reciclaje/ Circularidad	Recuperación de E-Waste (HPMS)	Emergente / Creciente	China / UE (Objetivos CRMA)	Suministro Resiliente y Sostenible

Nota: Describe las fases de la cadena (Upstream, Midstream, Downstream), las actividades principales y la concentración de capacidad global, identificando el procesamiento como el punto de mayor control. Fuente: Elaboración propia basada en datos de IEA (2024) y USGS (2024).

Este desequilibrio en la cadena global se representa en la **Figura 3**, donde se evidencia la alta concentración del procesamiento en China.



Figura 3. Desequilibrio en la Cadena Global de Tierras Raras (2025)

Nota: Representación de la concentración del mercado global. Se destaca que China controla aproximadamente el 90% del refinamiento de tierras raras, lo que constituye el principal "cuello

de botella" estratégico para la transición energética global. Fuente: Elaboración propia basada en Adamas Intelligence (2024) y CSIS (2024).

3.3. El Posicionamiento del Sur Global y el Bloque BRICS: De Proveedor de Recursos a Actor Estratégico

La redefinición de las cadenas de suministro por parte de EE.UU. y la UE ofrece una ventana de oportunidad para el Sur Global, pero también presenta el riesgo de reforzar el modelo extractivista a través de nuevas alianzas condicionadas.

3.3.1. BRICS+ como plataforma para la geoeconomía alternativa

El bloque BRICS, ampliado desde enero de 2024 para incluir a países como Argentina, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Irán, Egipto y Etiopía, ha incrementado significativamente su cuota en los recursos minerales y energéticos globales (Diario Abierto, 2023). Esta expansión refuerza el potencial del bloque para negociar colectivamente en las cadenas de suministro y para articular políticas geoeconómicas alternativas (Diario Abierto, 2023; Radio Gráfica, 2025).

El Nuevo Banco de Desarrollo (NDB) del BRICS se presenta como un mecanismo de financiamiento estratégico capaz de inyectar capital en proyectos de infraestructura de valor agregado (refinamiento) en países de América Latina y África, ofreciendo una vía de inversión desvinculada de los condicionamientos regulatorios y geopolíticos impuestos por las políticas occidentales (IRA/CRMA) (Diario Abierto, 2023). La capacidad de Brasil, como miembro fundador, para liderar una política de minerales críticos (poseyendo ya importantes reservas de TR y níquel (TSC, 2025) es fundamental para que el bloque consolide su promesa de ser un contrapeso económico y tecnológico.

3.3.2. América Latina: El desafío de la integración para la industrialización

América Latina posee vastas reservas de MC, lo que la posiciona estratégicamente en la transición energética global (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024; Rivas, 2025). Organismos multilaterales como la CEPAL y la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) han instado a la región a aprovechar la tensión geopolítica para desarrollar capacidades "TOPP" (Técnicas, Operativas, Políticas y Prospectivas) y crear una agenda común para la extracción y elaboración de minerales estratégicos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024; Organización Latinoamericana de Energía, 2024).

El caso del Litio en el denominado Triángulo del Litio (Argentina, Bolivia, Chile) ilustra la complejidad de transformar el potencial geológico en soberanía geotecnológica (Secretaría de Minería, 2025). A pesar de poseer las mayores reservas mundiales, la región enfrenta una profunda fragmentación en sus estrategias regulatorias (UNESCO, 2024). Las políticas de desarrollo tecnológico son insuficientes; por ejemplo, el intento boliviano de desarrollar una base tecnológica propia ha enfrentado obstáculos debido a su debilidad estructural (UNESCO, 2024). Además, la extracción de litio en salmueras está intrínsecamente ligada a desafíos de gobernanza socioambientales críticos, particularmente el conflicto por el uso de recursos hídricos en territorios indígenas, lo que genera resistencia social y retrasa proyectos (Aguilar, 2025; Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2025).

Un riesgo estratégico fundamental para la región es el fenómeno del near-shoring pasivo. La relocalización de cadenas de suministro impulsada por EE.UU. (buscando proveedores confiables cercanos) (Summar, 2025) podría significar que América Latina se convierta en una zona de ensamblaje y manufactura de baja o media tecnología, mientras que la fase crítica de refinamiento (el alto valor) se consolida en EE.UU. y sus aliados más cercanos (como Australia), atraída por los incentivos del IRA. Esto resultaría en una alianza nominal de friend-shoring que, en la práctica, solo refuerza la subordinación geotecnológica a través de la transferencia de recursos primarios a cadenas de valor ajenas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024).

2022b). Es vital señalar que estos depósitos de litio están asociados con concentraciones significativas de Uranio, un factor que complica y encarece el procesamiento metalúrgico debido a los desafíos de manejo de residuos radiológicos y peligrosos. Además del litio, Puno alberga potencial de TR, con proyectos como Cachi Cachi (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), 2022b; Montalva, 2025).

3.4.2. La prueba de Fuego: el fracaso de la política industrial peruana

A pesar del potencial geológico actualizado (Hallazgo Junín), el análisis de la política doméstica peruana revela una inercia estructural que impide la capitalización de esta oportunidad geopolítica. El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) mantiene una visión anclada en el extractivismo (Resolución Ministerial N.º 056-2025-MINEM/DM, 2025). La "Cartera de Proyectos de Inversión Minera 2025" y las proyecciones de inversión (US\$ 6,000 millones en 2025) se centran exclusivamente en la exploración y extracción de commodities tradicionales (cobre, oro) y, secundariamente, litio (Ministerio de Energía y Minas (MINEM), 2025). No existe una estrategia nacional explícita, ni incentivos regulatorios, destinados al refinamiento de Tierras Raras.

3.4.2.1. La paradoja de Aclara y el riesgo del Extractivismo-Aliado

La evidencia más contundente de la falla del ecosistema industrial peruano es la decisión estratégica de Aclara Resources, filial del grupo minero peruano Hochschild, anunciada en octubre de 2025 (Redacción, 2025b).

La Decisión: Aclara invertirá aproximadamente USD 277 millones para construir su primera planta de separación de Tierras Raras Pesadas (HREE) (Minería y Desarrollo, 2025).

La Ubicación Crítica: La planta no se construirá en el Perú, a pesar de sus nuevos yacimientos de HREE en Junín, sino en el estado de Louisiana, Estados Unidos (Minería y Desarrollo, 2025).

La Razón de la Fuga de Capital: La justificación corporativa fue inequívoca: la decisión se basó en la obtención de incentivos fiscales y subvenciones del estado de Louisiana (USD 46.4 millones) y el acceso a un ecosistema industrial maduro (infraestructura química y rapidez regulatoria) (Minería y Desarrollo, 2025).

La "Paradoja de Aclara" demuestra que la inversión estratégica en el midstream ha sido secuestrada por la política de subsidios masivos de Estados Unidos (IRA). El capital de origen peruano está migrando para construir la infraestructura crítica de procesamiento en EE.UU., contribuyendo directamente a la estrategia de de-risking de Washington, mientras que el Perú, que posee el recurso, carece del ecosistema de inversión necesario para retener el valor agregado (Minería y Desarrollo, 2025; U.S. Department of the Treasury, 2023).

En este escenario, el riesgo para el Perú no es simplemente perpetuar el extractivismo, sino transitar hacia un "extractivismo-aliado" (friend-shored) subordinado. El país será valorado como un socio confiable para la extracción, diversificando la fuente de Occidente y reemplazando potencialmente a China en el upstream, pero quedará permanentemente excluido de las fases de alto valor añadido (el 40% del procesamiento y el 90% de la manufactura), consolidando una dependencia geotecnológica en el nuevo orden multipolar (Comisión Europea, 2023; Summar, 2025).



Figura 5. Minerales Críticos en América Latina: Potencial Geológico vs. Vulnerabilidad Industrial

Nota: Esquema propositivo que articula tres ejes para el Sur Global: el refinamiento local (captura de valor en el midstream), el leapfrogging tecnológico (salto hacia industrias de frontera) y la cooperación regional (bloque de negociación frente a hegemonías externas). Fuente: Elaboración propia (2026).

La **Tabla 2**, muestra el potencial geológico y la vulnerabilidad Geotecnológica en América Latina.

Tabla 2. Potencial Geológico y Vulnerabilidad Geotecnológica en América Latina (2026).

País / Región	Mineral(es) Crítico(s) Estratégico(s)	Potencial Geológico Reciente (2025)	Estatus de Política Industrial (Midstream)	Vulnerabilidad/ Desafío Clave
Perú (Junín/Puno)	TR (LREE/HREE), Litio	Nuevo descubrimiento TR L/P en Junín (5,037 ppm TREO) (INGEMMET, 2025)	Ausente / Enfoque Extractivo (MINEM, 2025a)	"Paradoja de Aclara": Fuga de capital procesador hacia EE.UU. por subsidios IRA (Redacción, 2025b)
Triángulo del Litio (ARG/BOL/CHI)	Litio	Mayores reservas mundiales de salmueras (Argentina.gob.ar, 2025)	Divergente / Esfuerzos de nacionalización (Bolivia) (UNESCO, 2024)	Riesgos socioambientales (agua) (Noticias ONU, 2025; CEPAL, 2025a) y fragmentación negociadora (OLADE, 2024)

Brasil	TR, Níquel, Cobre	Vastas reservas, potencial BRICS (Diario Abierto, 2024; TSC.AI, 2025)	Falta de claridad regulatoria e incentivos consistentes (TSC.AI, 2025)	Riesgo de sub-explotación y dependencia extractiva (TSC.AI, 2025)
Indonesia (Modelo Comparado)	TR, Níquel	Vastos depósitos (Swissinfo.ch, 2025)	Creación de una agencia gubernamental para avanzar en la aplicación industrial de TR (Swissinfo.ch, 2025)	Riesgo de cooptación por grandes potencias, pero con un marco institucional activo (Swissinfo.ch, 2025)

Nota: Lista los países o regiones y los minerales estratégicos asociados, como el Litio, Cobalto y Tierras Raras.

3.5. La soberanía geotecnológica como imperativo estratégico: rutas de Leapfrogging y cooperación regional

Para quebrar el ciclo del "extractivismo-aliado" y capitalizar la oportunidad geopolítica que representan los nuevos yacimientos de TR, el Sur Global, con énfasis en América Latina, debe adoptar una estrategia de tipo Diagnóstico-Crítico-Propositivo que sea audaz y se centre en el leapfrogging tecnológico (Figura 6).



Figura 6. Soberanía Geotecnológica: El Futuro de los Minerales Estratégicos en América Latina

Nota: Esquema propositivo que visualiza el tránsito del extractivismo hacia la autonomía tecnológica en la región. Se fundamenta en tres pilares: 1) Gobernanza regional de recursos estratégicos, 2) Desarrollo de capacidades locales de refinamiento (midstream), y 3) Cooperación científica Sur-Sur para el escalamiento industrial. Fuente: Elaboración propia (2026), basada en el marco de Soberanía Tecnológica del Sur Global.

3.5.1. Propuesta 1: La Política Industrial "Refinamiento Primero"

El Estado debe redefinir su papel, pasando de ser un mero facilitador de la inversión extractiva a un socio geotecnológico activo que dirige la inversión hacia el valor agregado (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024).

El imperativo es la creación de un "Plan Nacional/Regional de Minerales Estratégicos y Refinamiento" (Horizonte 2027-2040) que declare el refinamiento, la separación de óxidos y la metalurgia de TR como actividades de prioridad nacional (Organización Latinoamericana de Energía, 2024).

El mecanismo clave de intervención es la implementación de incentivos condicionados. La Inversión Extranjera Directa (IED) para la extracción debe estar condicionada a: la transferencia efectiva de tecnología de procesamiento y la inversión obligatoria en el midstream (refinamiento y separación) en territorio nacional (Organización Latinoamericana de Energía, 2024).

Para competir con el poder de atracción del IRA de EE.UU., se requiere el diseño de un fondo de garantías de precio y un esquema de incentivos fiscales. Este "IRA-ALC" (Inflation Reduction Act - América Latina y el Caribe), ya sea a nivel nacional o regional, debe contrarrestar explícitamente los subsidios extranjeros mediante créditos fiscales y subvenciones directas para la construcción de plantas de procesamiento (Organización Latinoamericana de Energía, 2024; U.S. Department of the Treasury, 2023). El objetivo es asegurar que el capital, tanto nacional como extranjero, que busca el midstream sea incentivado a permanecer en la región.

3.5.2. Propuesta 2: El Leapfrogging Tecnológico y el Refinamiento Verde

Intentar competir con China en el procesamiento hidrometalúrgico tradicional, altamente contaminante y que requiere décadas de know-how consolidado, es una estrategia perdida (Funcas, 2025). La solución reside en el salto tecnológico (leapfrogging) hacia las tecnologías de "Refinamiento Verde" de próxima generación, utilizando la sostenibilidad (ESG) como herramienta de diferenciación geopolítica (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024; Organización Latinoamericana de Energía, 2024).

3.5.2.1. Biomimética y Minería urbana

La inversión en I+D debe concentrarse en dos rutas disruptivas:

Biomimética (Lanmodulina): Inversión en el desarrollo de capacidades para la separación selectiva de TR utilizando péptidos derivados de la proteína Lanmodulina (Perry & Van Veen, 2024). Esta tecnología permite la separación de TR (incluyendo los valiosos Nd, Dy, Eu) sin los procesos de lixiviación ácida extrema, ofreciendo una ventaja competitiva de altísimo estándar ambiental (Perry & Van Veen, 2024).

Economía Circular y Minería Urbana (HPMS): La urgencia ambiental del Sur Global (altos volúmenes de e-waste y vastos Pasivos Ambientales Mineros - PAM) puede convertirse en una ventaja (Aguilar, 2025; Chowdhury et al., 2025). Se debe priorizar el desarrollo de tecnologías de recuperación de TR a partir de estos flujos. El proceso HPMS (Hydrogen Processing of Magnet Scrap) o "reciclaje Imán-a-Imán" es económicamente viable y superior a la minería primaria, ya que reduce los costos de producción en un 53% y el consumo de energía en un 45% (Perry & Van Veen, 2024). La reprocesamiento de relaves ofrece una fuente de suministro alternativa y sostenible para la industrialización paralela (Jahan et al., 2024; Perry & Van Veen, 2024).

Para lograr este salto, el Estado debe cerrar la brecha crónica de I+D mediante la creación de una institución dedicada, como el Instituto Peruano de Refinamiento Verde y Minería Urbana (IPERVIM), con el mandato de generar know-how propio en estas tecnologías de punta.

3.5.3. Propuesta 3: Articulación regional y apalancamiento BRICS

El aislamiento estratégico es la mayor debilidad del Sur Global (UNESCO, 2024). América Latina debe superar la fragmentación de sus élites y las estrategias de desarrollo divergentes.

La integración debe articularse en torno a la creación de una cadena de valor regional (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024). En lugar de competir entre sí para exportar concentrados, países como Perú, Chile, Argentina y Brasil deben negociar en bloque para atraer la inversión en una infraestructura compartida. La propuesta es construir una "Giga-planta" de Refinamiento Verde Regional que procese de manera centralizada los diferentes flujos de MC: las Tierras Raras de Junín (Perú), las arcillas iónicas de Brasil, y los concentrados de Litio/Cobre/relaves de Chile y Argentina (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024; Organización Latinoamericana de Energía, 2024).

Esta infraestructura regional debe ser financiada activamente mediante el apalancamiento de instrumentos del BRICS (NDB) y negociada con la UE (CRMA) y EE.UU. (IRA). La región debe negociar no solo como proveedor, sino como un socio de procesamiento ESG certificado, exigiendo acceso preferencial a mercados y transferencia tecnológica a cambio de la exclusividad de suministro (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024).

4. Conclusiones

El Salto de la Roca al Know-How se contextualiza en la **Figura 7**. El análisis actualizado a 2026 demuestra que la soberanía geotecnológica es el imperativo estratégico que definirá el desarrollo del Sur Global. El descubrimiento de Tierras Raras Pesadas en Junín ofrece una oportunidad sin precedentes para el Perú (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), 2022a). Sin embargo, esta ventaja geológica está siendo neutralizada por la inercia de la política industrial y, más aún, por el poder geopolítico de los subsidios occidentales (Minería y Desarrollo, 2025).

La "Paradoja de Aclara" es el diagnóstico final: en la geopolítica de los Minerales Críticos, los incentivos financieros (IRA), los ecosistemas industriales (acceso a reactivos) y las políticas de I+D son variables más poderosas que la dotación geológica. El capital sigue la ruta de la mínima resistencia y el máximo subsidio, y si el Sur Global no crea sus propios ecosistemas de valor, su papel en el orden multipolar se reducirá a ser un extractor subordinado, incluso para su propio capital nacional (Minería y Desarrollo, 2025).

La única vía para la transformación productiva es a través de una estrategia de "Refinamiento Primero" que se apoye en el leapfrogging tecnológico (Biomimética y Minería Urbana) y la articulación regional (BRICS/ALC), convirtiendo la sostenibilidad y el manejo de residuos en una ventaja competitiva geopolítica.

La diplomacia de los países del Sur Global debe reorientarse. La prioridad ya no debe ser simplemente atraer el volumen de extracción, sino exigir la transferencia de tecnología de procesamiento y el compromiso de inversión en el midstream. El modelo de desarrollo sostenible y soberano para América Latina debe basarse en la capacidad de transformar los vastos Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y el creciente e-waste en fuentes estratégicas de materia prima, utilizando la certificación ESG y la tecnología de refinamiento verde como palanca de negociación ante las demandas de la CRMA y el IRA (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2024; Perry & Van Veen, 2024).



Figura 7. De la Roca al Know-How: El camino a la Soberanía Geotecnológica

Nota: La paradoja de las Tierras Raras: la dotación geológica no asegura soberanía si el valor del refinado/procesamiento y los incentivos industriales se concentran fuera; se plantea “refinamiento primero” con valorización de e-waste y pasivos ambientales mineros (PAM) y gestión de riesgos por radioelementos. Fuentes: (IEA, 2024); (Baldé et al., 2024); (Resolución Ministerial N.º 056-2025-MINEM/DM, 2025); (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2003); (Internal Revenue Service (IRS), 2026); (Federal Register, 2023), Elaboración propia (2026).

Este estudio estratégico debe ser complementado por investigaciones técnicas detalladas para validar las rutas propositivas:

1. Estudios de Viabilidad Tecno-Económica: Análisis de CAPEX y OPEX para la implementación de una planta piloto de refinamiento basada en Biomimética (Lanmodulina) o Minería Urbana (HPMS), comparada con la hidrometalurgia tradicional, para cuantificar la rentabilidad del leapfrogging.
2. Mapeo Geológico-Radiométrico: Cuantificación precisa de los elementos radiactivos asociados (Torio y Uranio) en los yacimientos de Junín y Puno (Ministerio de Energía y Minas (MINEM), 2025). Este modelado es crucial para determinar los costos reales de la mitigación y el manejo de residuos peligrosos y radiológicos, que son un costo determinante en la fase de refinamiento.
3. Análisis de Minería Urbana: Evaluación exhaustiva del potencial económico de la recuperación de TR a partir de los extensos PAM y el e-waste en Perú y la región andina (Perry & Van Veen, 2024).

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Ninguno

Contribución de autores

Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición: Gómez-Cumpa, J. W. y Fanning-Balarezo, M. M.

Referencias bibliográficas

- Aclara Resources. (2024). *Investor Presentation: Clean Rare Earths for a Sustainable Future*.
- Adamas Intelligence. (2024). *Rare Earth Magnet Market Outlook to 2040*. <https://www.adamasintel.com/rare-earth/rare-earth-magnet-market-outlook-to-2040/>
- Aguilar, D. (2025). *La explotación de minerales críticos amenaza los territorios de los Pueblos Indígenas*. ONU Noticias. <https://news.un.org/es/story/2025/04/1538171>
- Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Lattoni, G., Khatriwal, D. s., di Cortemiglia, V. L., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N., & Wagner, M. (2024). *The global E-Waste MONITOR*. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf
- Chowdhury, M. M., Aktar, K., Rahman, M. T., Hassan, M. R., Islam, M. S., & Arafat, A. B. M. Y. (2025). Assessing Behavioral Intention to Adopt Online Tax Return in Bangladesh. *Journal of Computer Science*, 21(2), 212–222. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2025.212.222>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2024). *Minerales críticos para la transición energética y la electromovilidad: oportunidades para el desarrollo*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/enfoques/minerales-criticos-la-transicion-energetica-la-electromovilidad-oportunidades-desarrollo>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2025). *La Inversión Extranjera Directa en América Latina y el Caribe, 2025*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/82116-la-inversion-extranjera-directa-america-latina-caribe-2025>
- Comisión Europea. (2023). *Acta Europea de Materias Primas Críticas (European Critical Raw Materials Act)*. Comisión Europea. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_es
- Dans, E. (2025). *La carta estratégica de China: convertir las tierras raras en un arma*. Enrique Dans. <https://www.enriquedans.com/2025/10/la-carta-estrategica-de-china-convertir-las-tierras-raras-en-un-arma.html>
- Diario Abierto. (2023). *La ampliación de los BRICS incrementa el control sobre las cadenas de suministro*. Diarioabierto.Es. <https://www.diarioabierto.es/675217/la-ampliacion-de-los-brics-incrementa-el-control-sobre-las-cadenas-de-suministro>
- Federal Register. (2023). *Section 45X Advanced Manufacturing Production Credit*. Federal Register. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/12/15/2023-27498/section-45x-advanced-manufacturing-production-credit>
- Funcas. (2025). *Tierras raras y minerales críticos: La nueva batalla entre Estados Unidos, China y la Unión Europea*. https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2025/05/Tierras-raras-y-minerales-criticos_2.pdf
- Guimarães, A. V., da Silveira, R. M. S., Jaffrezou, N., Mendes, M. C., dos Santos, D. S., de Almeida, L. H., & Araujo, L. S. (2024). Influence of yttrium alloying on improving the resistance to hydrogen embrittlement of superalloy 718. *International Journal of Hydrogen Energy*, 58, 479–484. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.229>
- Guo, H., Gao, P., Chen, S., & Zhu, J. (2025). A concurrent multiscale model of stress-induced

- delamination behaviours of epoxy-impregnated rare-earth barium copper oxide superconducting pancake winding. *Superconductor Science and Technology*, 38(1), 015007. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ad96e5>
- IEA. (2024). *Global Critical Minerals Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- IEA. (2025). *Global Critical Minerals Outlook 2025*. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2022a). *Potencial de elementos de tierras raras en el Perú*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://www.gob.pe/ingemmet>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2022b). *Puno: Explotación de minerales estratégicos y tierras raras aproximaría a la minería de pequeña escala hacia su sostenibilidad*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://www.gob.pe/institucion/ingemmet/noticias/584682-puno-explotacion-de-minerales-estrategicos-y-tierras-raras-aproximaria-a-la-mineria-de-pequena-escala-hacia-su-sostenibilidad>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2024). *Perú se posiciona en el mapa global de minerales estratégicos con importante hallazgo de tierras raras en Junín*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). <https://www.gob.pe/institucion/ingemmet/noticias/1246305-peru-se-posiciona-en-el-mapa-global-de-minerales-estrategicos-con-importante-hallazgo-de-tierras-raras-en-junin>
- Internal Revenue Service (IRS). (2026). *Advanced Manufacturing Production Credit*. IRS. <https://www.irs.gov/credits-deductions/advanced-manufacturing-production-credit>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2003). *Rare Earth Elements in Mineral Deposits: Speciation, Characterization and Recovery*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf
- Jahan, I., Chowdhury, G., Rafi, S., Ashab, M. A., Sarker, M., Chakraborty, A., Couetard, N., Kabir, M. A., Hossain, M. A., & Iqbal, M. M. (2024). Assessment of dietary polyvinylchloride, polypropylene and polyethylene terephthalate exposure in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*: Bioaccumulation, and effects on behaviour, growth, hematology and histology. *Environmental Pollution*, 345, 123548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123548>
- Karakchieva, N. I., Khabibova, E. D., Amelichkin, I., Vasilyeva, I. A., Knyazev, A. S., & Sachkov, V. I. (2025). Corrosion resistance of modified magnesium-based alloys. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 14(3). <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2025-14-3-24>
- Li, M., Zhou, X., Zhang, Y., Jiang, F., Sha, S., Xu, S., & Li, S. (2020). Preparation and upconversion luminescent properties of Yb³⁺/Er³⁺ doped transparent glass-ceramics containing CaF₂ nanocrystals. *Ceramics International*, 46(16), 25399–25404. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.008>
- Li, X., Zhu, T., Li, L., Xue, C., Chen, Y., Wei, F., Sui, Y., Qi, J., Meng, Q., Xiao, B., & He, J. (2025). Lanthanum ion doping modulates the electronic structure of Mn₂O₃ to construct long-cycle-life cathode materials for advanced aqueous zinc-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 139, 118731. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118731>
- Mayra. (2025). *Filial de Hochschild invertirá USD 277 millones en primera planta de tierras raras de EE. UU*. Minería Pan-Americana. <https://mineria-pa.com/2025/10/28/filial-de-hochschild-invertira-usd-277-millones-en-primera-planta-de-tierras-raras-de-ee-uu/>
- Minería y Desarrollo. (2025). *Australia avanza hacia el establecimiento de una reserva estratégica de minerales críticos*. Mineríaydesarrollo.Com. <https://www.mineríaydesarrollo.com/noticias/2025/10/14/22506-australia-avanza-hacia-el-establecimiento-de-una-reserva-estrategica-de-minerales-criticos>

- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2025). *Cartera de proyectos de inversión minera 2025*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/6722917-cartera-de-proyectos-de-inversion-minera-2025>
- Montalva, C. (2025). *Minem proyecta que inversiones mineras alcanzarán US\$ 6,000 millones en 2025*. Construnoticias. <https://construnoticias.com/2025/08/28/minem-proyecta-que-inversiones-mineras-alcanzaran-us-6000-millones-en-2025/>
- Organización Latinoamericana de Energía. (2024). *Estudio sobre minerales críticos en la región*. <https://www.olade.org/publicaciones/estudio-sobre-minerales-criticos-en-la-region/>
- Perry, A., & Van Veen, K. (2024). Recovering Rare Earth Elements from E-Waste: Potential Impacts on NdFeB Magnet Supply Chains and the Environmen. *Journal of International Commerce and Economics*. <https://www.usitc.gov/journals>
- Radio Gráfica. (2025). *BRICS, el vigor de una asociación que crece. La declaración final 2025*. Radiografica.Org.Ar. <https://radiografica.org.ar/2025/07/09/brics-el-vigor-de-una-asociacion-que-crece-la-declaracion-final-2025/>
- Resolución Ministerial N.º 056-2025-MINEM/DM (2025). <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/6496380-056-2025-minem-dm>
- Ríos Fernández, C. (2025). Australia impulsa reserva estratégica de minerales críticos pese a críticas del sector. In *Minart Portal de Noticias*. <https://minart.pe/2025/05/27/australia-impulsa-reserva-estrategica-de-minerales-criticos-pese-a-criticas-del-sector/>
- Rivas, L. (2025). *El gran potencial de los minerales críticos en América Latina*. CAF. <https://www.caf.com/es/blog/el-gran-potencial-de-los-minerales-criticos-en-america-latina/>
- Secretaria de Minería. (2025). *Litio, Panorama global del mercado del litio y el potencial litífero de Argentina*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_litio_junio_2025.pdf
- Summar. (2025). *Friendshoring: la nueva oportunidad para exportadores en América Latina*. Summar.Com. <https://summar.com/friendshoring-la-nueva-oportunidad-para-exportadores-en-america-latina/>
- SWI swissinfo.ch. (2025). *Indonesia crea un organismo para «avanzar» en la industria de tierras raras*. Swissinfo.Ch. <https://www.swissinfo.ch/spa/indonesia-crea-un-organismo-para-%22avanzar%22-en-la-industria-de-tierras-raras/89889740>
- Tang, S., Peng, X., & Yong, H. (2023). Numerical simulation of the mechanical behavior of superconducting tape in conductor on round core cable using the cohesive zone model. *Applied Mathematics and Mechanics*, 44(9), 1511–1532. <https://doi.org/10.1007/s10483-023-3025-7>
- Tian, B., Ho, D., Qin, J., Hu, J., Chen, Z., Voiry, D., Wang, Q., & Zeng, Z. (2023). Framework structure engineering of polymeric carbon nitrides and its recent applications. *Progress in Materials Science*, 133, 101056. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101056>
- TSC. (2025). *Brasil ante la nueva carrera por los minerales críticos: el papel de la minería en la transición energética*. TSC. <https://www.tsc.ai/blogs/brasil-ante-la-nueva-carrera-por-los-minerales-criticos-el-papel-de-la-mineria-en-la-transicion-energetica>
- U.S. Department of the Treasury. (2023). *Fact sheet: How the Inflation Reduction Act's Tax Incentives Are Ensuring All Americans Benefit from the Growth of the Clean Energy Economy*. U.S. Department of the Treasury. <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy1830>
- UNESCO. (2024). *Extractivism Policy Brief – No. 8 | 2024*.
- Verbovytsky, Y. V., & Zavalii, I. Y. (2025). Superior electrochemical performance of the

- substituted A2B7-type multiphase La/Y-Mg-Ni/Co/Al alloy electrodes. *Journal of Energy Storage*, 139, 118877. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118877>
- Wan, J., Chen, Y., Wang, X., Zhou, C., Zhang, X., Jin, H., Liu, F., Qin, J., Liu, H., & Gao, P. (2025). Design and construction of a small-scale layer-wound no-insulation (LW-NI) insert magnet with REBCO-coated conductors operating in a background magnetic field exceeding 15 T. *Cryogenics*, 152, 104190. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2025.104190>
- Zeer, M., Go, D., Kläui, M., Wulfhekel, W., Blügel, S., & Mokrousov, Y. (2025). Orbital torques and orbital pumping in two-dimensional rare-earth dichalcogenides. *Npj Computational Materials*, 11(1), 305. <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01812-1>
- Zhu, Z., Xu, J., Chen, X., Li, Y., Zhang, L., Jia, L., Li, J., Zhu, T., & Zhao, T. (2025). Intelligent detection and classification of tetracycline drugs by rare earth fluorescence sensing platform based on deep learning algorithm and STM32 microcontroller. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 445, 138638. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138638>