v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

TIERRAS RARAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y PODER GEOPOLÍTICO: PROPUESTA DEL MODELO DE CONVERSIÓN GEOAMBIENTAL DEL PODER TECNOLÓGICO (MCGPT) Y DEL ÍNDICE GEOAMBIENTAL DE POTENCIAL ESTRATÉGICO PARA LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IGPE-IA)

TERRAS RARAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E PODER GEOPOLÍTICO: PROPOSIÇÃO DO MODELO DE CONVERSÃO GEOAMBIENTAL DO PODER TECNOLÓGICO (MCGPT) E DO ÍNDICE GEOAMBIENTAL DE POTENCIAL ESTRATÉGICO PARA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IGPE-IA)

RARE EARTHS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND GEOPOLITICAL POWER: PROPOSAL OF THE GEOENVIRONMENTAL CONVERSION MODEL OF TECHNOLOGICAL POWER (MCGPT) AND THE GEOENVIRONMENTAL INDEX OF STRATEGIC POTENTIAL FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE (IGPE-AI)

Davis Souza Alves[1], Márcio Magera Conceição[2]

e799024
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.9024

PUBLICADO: 09/2026

RESUMEN

La expansión de la Inteligencia Artificial (IA) aumenta la relevancia estratégica de las tierras raras, cuya disponibilidad, procesamiento e integración en las cadenas tecnológicas influyen en la soberanía de los Estados y en la configuración del poder geopolítico. Este estudio tiene como objetivo analizar cómo las tierras raras, entendidas como activos geoambientales estratégicos, pueden convertirse en capacidad industrial, soberanía tecnológica e influencia geopolítica en el contexto de la expansión mundial de la IA. La investigación adopta un enfoque cualitativo, exploratorio y teórico-conceptual, fundamentado en investigación documental, revisión bibliográfica integrativa, análisis temático y síntesis interpretativa. Los resultados demuestran que la posesión de reservas minerales, por sí sola, no garantiza una ventaja estratégica, ya que el poder tecnológico depende de la articulación entre extracción sostenible, procesamiento, manufactura avanzada, capacidad científica, infraestructura de IA, ciberseguridad y gobernanza. Las evidencias documentales muestran una creciente concentración de la cadena en las etapas de mayor valor agregado, especialmente el refinado y la fabricación de imanes. Como contribuciones originales, se proponen el Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT), que sistematiza la transformación de los recursos geoambientales en poder tecnológico, y el Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA), concebido como un framework multidimensional para futuras evaluaciones comparativas. Se concluye que la soberanía tecnológica depende menos de la disponibilidad mineral aislada que de la capacidad sistémica, sostenible e institucional para convertir recursos en capacidades tecnológicas estratégicas.

PALABRAS CLAVE: *Tierras Raras. Inteligencia Artificial. Soberanía Digital. Geopolítica.*

[1] Doutor em Administração de TI - Ph.D na Florida Christian University (EUA) convalidado no Brasil, Mestre em Administração com foco em TI Verde (2015), Extensão em Gestão de TI pela FGV/SP (2011), Pós-graduado em Gerenciamento de Projetos (2009), Graduado em Redes de Computadores e Internet (2008).

[2] Economista pela PUC-Campinas, mestre em Administração e em Ciências Sociais, doutor em Ciências Sociais e em Administração. Professor da Universidade Paulista (UNIP) e Pró-Reitor de Pesquisa e Extensão da Universidade de Guarulhos, onde também atua no stricto sensu. Possui experiência em gestão do ensino superior, planejamento urbano e regional, cooperativismo, resíduos sólidos, gestão de negócios e crescimento econômico. É avaliador do MEC/INEP desde 2006, foi Coordenador-Geral da pesquisa TALIS/OCDE no Brasil em 2012 e desenvolveu o aplicativo VERDES-PT para cálculo de resíduos urbanos. Atua ainda como Editor-Chefe da Editora RECIMA21.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

RESUMO
A expansão da Inteligência Artificial (IA) amplia a relevância estratégica das terras raras, cuja disponibilidade, processamento e integração às cadeias tecnológicas influenciam a soberania dos Estados e a configuração do poder geopolítico. Este estudo objetiva analisar como as terras raras, compreendidas como ativos geoambientais estratégicos, podem ser convertidas em capacidade industrial, soberania tecnológica e influência geopolítica no contexto da expansão mundial da IA. A pesquisa possui abordagem qualitativa, caráter exploratório e finalidade teórico-conceitual, fundamentando-se em pesquisa documental, revisão bibliográfica integrativa, análise temática e síntese interpretativa. Os resultados demonstram que a posse de reservas minerais, isoladamente, não assegura vantagem estratégica, uma vez que o poder tecnológico depende da articulação entre extração sustentável, processamento, manufatura avançada, capacidade científica, infraestrutura de IA, segurança cibernética e governança. Evidências documentais mostram a crescente concentração da cadeia nas etapas de maior valor agregado, especialmente refino e fabricação de ímãs. Como contribuições originais, propõem-se o Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT), que sistematiza a transformação dos recursos geoambientais em poder tecnológico, e o Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA), concebido como framework multidimensional para futura avaliação comparativa. Conclui-se que a soberania tecnológica depende menos da disponibilidade mineral isolada do que da capacidade sistêmica, sustentável e institucional de converter recursos em competências tecnológicas estratégicas.

PALAVRAS-CHAVE: Terras Raras. Inteligência Artificial. Soberanía Digital. Geopolítica.

ABSTRACT
The expansion of Artificial Intelligence (AI) increases the strategic relevance of rare earth elements, whose availability, processing, and integration into technological value chains influence state sovereignty and the configuration of geopolitical power. This study aims to analyze how rare earth elements, understood as strategic geoenvironmental assets, can be converted into industrial capacity, technological sovereignty, and geopolitical influence in the context of the global expansion of AI. The research adopts a qualitative, exploratory, and theoretical-conceptual approach, based on documentary research, an integrative literature review, thematic analysis, and interpretative synthesis. The results demonstrate that mineral reserves alone do not ensure strategic advantage, since technological power depends on the articulation of sustainable extraction, processing, advanced manufacturing, scientific capacity, AI infrastructure, cybersecurity, and governance. Documentary evidence indicates increasing concentration of the value chain in higher-value-added stages, particularly refining and magnet manufacturing. As original contributions, the study proposes the Geoenvironmental Conversion Model of Technological Power (MCGPT), which systematizes the transformation of geoenvironmental resources into technological power, and the Geoenvironmental Index of Strategic Potential for Artificial Intelligence (IGPE-IA), conceived as a multidimensional framework for future comparative assessment. It is concluded that technological sovereignty depends less on isolated mineral availability than on the systemic, sustainable, and institutional capacity to convert resources into strategic technological capabilities.

KEYWORDS: *Rare Earth elements. Artificial Intelligence. Digital Sovereignty. Geopolitics.*

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

1. INTRODUCCIÓN

La expansión de la Inteligencia Artificial es una de las transformaciones tecnológicas más relevantes del siglo XXI. Su incorporación a los procesos productivos, a las infraestructuras digitales, a los sistemas de defensa, a la gestión pública, a la investigación científica y a los mecanismos de toma de decisiones viene modificando las bases de la competitividad económica y de la soberanía de los Estados. A diferencia de enfoques que presentan la IA como un fenómeno predominantemente lógico, algorítmico o inmaterial, su funcionamiento depende de una infraestructura física extensa, compuesta por centros de procesamiento de datos, semiconductores, equipos de telecomunicaciones, sistemas energéticos, dispositivos electrónicos y cadenas industriales de alta complejidad.

Esta materialidad demuestra que la expansión de la economía digital no elimina la dependencia de los recursos naturales. Al contrario, desplaza parte de esa dependencia hacia minerales dotados de propiedades físicas y químicas indispensables a las tecnologías avanzadas. En este conjunto se encuentran los elementos de tierras raras — los quince lantánidos, sumados el escandio y el itrio — utilizados en imanes permanentes, catalizadores, componentes ópticos, sistemas electrónicos, aleaciones metálicas y otras aplicaciones de alto rendimiento (Balaram, 2019). La Agencia Internacional de Energía reconoce que estos elementos desempeñan funciones estratégicas en tecnologías energéticas, transportes, Inteligencia Artificial, industria aeroespacial, medicina y defensa, razón por la cual pasaron al centro de las políticas de seguridad económica y tecnológica (IEA, 2026).

La designación «tierras raras» no significa necesariamente que estos elementos sean escasos en la corteza terrestre. Su criticidad proviene, en gran medida, de la ocurrencia en concentraciones económicamente explorables, de la complejidad de su separación química, de la intensidad tecnológica del procesamiento y de la elevada concentración geográfica de las cadenas de producción. Por lo tanto, el análisis estratégico de estos recursos no puede limitarse al volumen de las reservas existentes. Debe considerar el dominio de las actividades de extracción, beneficio, separación, refino, producción de aleaciones, fabricación de imanes permanentes e integración de esos materiales en productos tecnológicos.

El Mineral Commodity Summaries 2026, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, evidencia que la oferta mundial de las tierras raras permanece marcada por elevada concentración productiva y por diferentes niveles de dependencia externa. El informe demuestra que la posición estratégica de los países varía no sólo según sus reservas y producción mineral, sino también según la capacidad industrial y tecnológica instalada a lo largo de la cadena de

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

valor (USGS, 2026). Esta distinción es fundamental: la posesión del recurso en el subsuelo no se convierte automáticamente en autonomía tecnológica o influencia geopolítica.

La relevancia de este debate fue ampliada por la convergencia entre transición energética, digitalización económica, automatización industrial, Inteligencia Artificial y telecomunicaciones de nueva generación. Kalantzakos (2020) sostiene que la descarbonización de la economía y la Cuarta Revolución Industrial han desencadenado una carrera internacional por el acceso continuo a los minerales críticos, cuya concentración geográfica puede producir nuevas zonas de tensión y reorganizar las relaciones entre las potencias industriales. Esa carrera no está relacionada solamente a la disponibilidad geológica, sino al control político, económico y tecnológico de las redes que transforman minerales en componentes industriales de elevado valor agregado.

En ese sentido, las tierras raras dejaron de ser tratadas exclusivamente como insumos industriales y pasaron a integrar políticas de seguridad económica, defensa, innovación tecnológica y soberanía nacional. Estudios empíricos demuestran que los riesgos geopolíticos afectan a los precios, los valores importados y la estabilidad de los mercados de tierras raras. El análisis realizado por Fan, Omura y Roca (2023), a partir de más de treinta años de datos de las importaciones japonesas, identificó relaciones estadísticamente significativas entre riesgo geopolítico y mercado de tierras raras, destacando los riesgos asociados a China. Tal evidencia refuerza la comprensión de que la oferta de estos elementos no obedece únicamente a las dinámicas convencionales de demanda y precio, estando sujeta a decisiones políticas, restricciones comerciales y disputas estratégicas.

El caso de China es particularmente relevante porque demuestra la diferencia entre poseer recursos minerales y dominar una cadena tecnológica. Su posición fue construida mediante políticas industriales de largo plazo, inversiones en procesamiento, producción de materiales, desarrollo de competencias técnicas e integración entre minería y manufactura avanzada. La concentración del beneficio y de la fabricación de componentes permite que el control ejercido en las etapas intermedias sea tan o más estratégico que la extracción mineral propiamente dicha. Estudios recientes sobre la reorganización de las cadenas de tierras raras indican que tensiones entre China y Estados Unidos estimulan políticas de diversificación, reubicación industrial y reducción de dependencias, aunque la construcción de cadenas alternativas implica costos elevados, barreras tecnológicas y largos períodos de maduración (Zhao, Cheng y Xu, 2026).

Esa realidad sustenta la necesidad de una interpretación geoambiental ampliada. El concepto de activo geoambiental adoptado en este trabajo no se limita a la existencia física del

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

mineral. Abarca la combinación entre localización territorial, características geológicas, viabilidad económica, condiciones de extracción, impactos ecológicos, infraestructura industrial, regulación ambiental, conocimiento científico y capacidad de inserción en cadenas tecnológicas. Bajo esa perspectiva, el valor estratégico de las tierras raras resulta de la interacción entre naturaleza, territorio, tecnología, instituciones y poder.

La dimensión medioambiental es inseparable de esta discusión. Aunque las tierras raras son empleadas en tecnologías relacionadas con la descarbonización y la modernización de los sistemas energéticos, su minería y su procesamiento pueden generar impactos expresivos. Entre los principales problemas se encuentran el elevado consumo de energía y agua, la producción de desechos, la generación de efluentes, la acidificación de los suelos, la contaminación hídrica, la dispersión de metales y la presencia de materiales radiactivos asociados a determinados depósitos minerales. Edahbi, Plante y Benzaazoua (2019) observan que la minería y el refino producen cantidades significativas de desechos sólidos y líquidos y que la ausencia de técnicas adecuadas de gestión puede provocar contaminación de aguas de drenaje por tierras raras y elementos radiactivos.

Estudios más recientes confirman la permanencia de ese desafío. Han *et al.* (2025) identificaron una tensión estructural entre la eficiencia de las técnicas convencionales de extracción y sus costos ambientales, incluyendo acidificación, contaminación por metales pesados y riesgos asociados a uranio y torio presentes en determinados minerales. Diao *et al.* (2024), a su vez, destacan que la expansión de las aplicaciones tecnológicas de las tierras raras ocurre paralelamente a problemas ambientales, volatilidad de mercado y concentración de la cadena productiva. Esto significa que cualquier estrategia de soberanía mineral y tecnológica necesita incorporar criterios de sostenibilidad, evaluación del ciclo de vida, recuperación ambiental, economía circular y responsabilidad social.

Lee y Wen (2018) demostraron que la producción de tierras raras tiene una huella ambiental significativa, pero que la adopción de procesos más limpios, control de emisiones y mejoras tecnológicas puede reducir los costos ambientales de la industria. Por lo tanto, la sostenibilidad no debe entenderse como una limitación externa a la capacidad estratégica. Ella constituye una variable interna de la propia continuidad de la cadena productiva, influenciando su legitimidad social, estabilidad regulatoria, acceso a inversiones y resiliencia a largo plazo.

La economía circular también presenta potencial para reducir las vulnerabilidades, aunque no elimine, en el corto plazo, la necesidad de extracción primaria. Wang *et al.* (2024), en modelo que integró inventarios geológicos y materiales en uso en diez regiones entre 2021 y 2050, identificaron desequilibrios entre oferta y demanda, especialmente en elementos pesados

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

como disprosio y terbio. Los autores concluyeron que estrategias circulares pueden ampliar la oferta secundaria y reducir la demanda acumulada, contribuyendo a una distribución menos polarizada de los recursos, pero su implementación depende de cooperación internacional y mecanismos de gobernanza.

La dependencia mineral asociada a la Inteligencia Artificial no debe, sin embargo, ser interpretada como una relación lineal según la cual todo sistema de IA contiene directamente grandes volúmenes de tierras raras. La conexión ocurre en múltiples capas. Involucra los equipos que soportan computación, almacenamiento, transmisión de datos, generación y gestión de energía, refrigeración, automatización, sensores, robótica, vehículos autónomos, sistemas aeroespaciales e infraestructura de defensa. Así, la expansión de la IA contribuye a aumentar el valor estratégico de las cadenas industriales que dependen, en diferentes grados, de minerales críticos y tierras raras.

La IEA (2026) incluye explícitamente las tecnologías de IA entre las aplicaciones estratégicas relacionadas con las tierras raras. Esta asociación revela que la disputa contemporánea no se restringe al software o a la superioridad algorítmica. Alcanza la capacidad de producir y mantener la infraestructura material que hace posible entrenar, operar y difundir sistemas inteligentes. Por lo tanto, el liderazgo en IA depende de la interacción entre capital científico, disponibilidad energética, semiconductores, infraestructura digital, recursos minerales, capacidad industrial y seguridad de las cadenas de suministro.

Además de la competitividad económica, la IA adquirió una importancia creciente para la ciberseguridad. Los sistemas basados en el aprendizaje de máquina pueden ser empleados en el reconocimiento de patrones anormales, automatización de auditorías, identificación de vulnerabilidades, gestión de riesgos, prevención de fraudes y monitoreo de infraestructuras digitales. Alves y Conceição (2025) demuestran que la aplicación de la IA a las auditorías de conformidad puede ampliar la precisión, continuidad y capacidad preventiva de los procesos de gobernanza, riesgo y conformidad. Esa contribución es relevante para el presente estudio porque evidencia que la capacidad nacional en IA no constituye únicamente una ventaja económica, sino también un recurso de protección institucional y de gestión de las infraestructuras digitales.

Sin embargo, el uso de IA en entornos críticos requiere transparencia, gobernanza, explicabilidad y supervisión humana. Santana *et al.* (2026) observan que el aumento del desempeño de los modelos de machine learning y deep learning fue acompañado por la ampliación de la opacidad algorítmica, haciendo necesaria la evolución de los enfoques de Inteligencia Artificial Explicable. Esta discusión demuestra que la soberanía tecnológica no sólo

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

significa poseer sistemas avanzados, sino también comprender, gobernar, auditar y proteger sus procesos de toma de decisiones.

La articulación entre minerales críticos, IA y ciberseguridad permite identificar una cadena estratégica más amplia. Los recursos geoambientales sostienen procesos de extracción y beneficio; estos alimentan la industria de materiales y componentes; la industria proporciona la infraestructura necesaria para el desarrollo tecnológico; y la capacidad tecnológica puede fortalecer la autonomía digital, la defensa cibernética y la influencia internacional. Sin embargo, la literatura tiende a investigar separadamente cada una de esas dimensiones.

Los estudios geoambientales se concentran, con frecuencia, en la ocurrencia mineral, en la viabilidad de la extracción y en sus impactos ecológicos. Las investigaciones económicas analizan precios, oferta, demanda y dependencia comercial. Los trabajos de Relaciones Internacionales enfatizan la competencia entre Estados, mientras que la literatura tecnológica discute Inteligencia Artificial, semiconductores y transformación digital. Todavía son limitados los modelos capaces de integrar, en una única estructura explicativa, la transformación de recursos geoambientales en capacidad industrial, autonomía tecnológica, ciberseguridad y poder geopolítico.

Esa fragmentación constituye la laguna central de esta investigación. Aunque ya está establecido que las tierras raras son relevantes para industrias tecnológicas y que sus cadenas están sujetas a riesgos geopolíticos, sigue siendo insuficientemente explicada la forma en que diferentes capacidades nacionales se combinan para convertir recursos minerales en poder estratégico. La disponibilidad geológica, aisladamente, no explica el liderazgo tecnológico. Asimismo, la excelencia científica, sin seguridad material e industrial, puede permanecer dependiente de proveedores externos.

De esa forma, el estudio parte de la siguiente tesis: “En la era de Inteligencia Artificial, las tierras raras dejaron de constituir sólo recursos minerales estratégicos y pasaron a actuar como activos geoambientales capaces de influir en la soberanía tecnológica, la ciberseguridad y la redistribución del poder geopolítico mundial.”

Esta tesis no presupone una relación automática entre reservas minerales y poder estatal. Se propone que la influencia geopolítica resulte de la capacidad de realizar una conversión sistémica del recurso: transformar disponibilidad mineral en extracción sostenible; extracción en procesamiento; procesamiento en industria de elevada intensidad tecnológica; industria en infraestructura de Inteligencia Artificial; capacidad digital en defensa cibernética; y dominio de esas etapas en soberanía tecnológica.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

1.1. Problema de investigación

A partir de la laguna identificada, se formula el siguiente problema de investigación:

¿De qué manera la capacidad de convertir tierras raras, comprendidas como activos geoambientales, en infraestructura industrial y tecnológica influye en la soberanía tecnológica, la ciberseguridad y la reconfiguración del poder geopolítico mundial en la era de la Inteligencia Artificial?

1.2. Hipótesis de investigación

Se adopta como hipótesis principal que: El poder geopolítico relacionado con las tierras raras no está determinado exclusivamente por la dimensión de las reservas o el volumen de la extracción, sino por la capacidad integrada de los Estados de convertir recursos geoambientales en productos de alto valor tecnológico por medio de extracción sostenible, procesamiento industrial, innovación científica, infraestructura de Inteligencia Artificial, defensa cibernética y gobernanza estratégica.

De esa hipótesis principal derivan tres proposiciones complementarias:

P1: países que controlan las etapas de procesamiento, fabricación de componentes e integración tecnológica poseen mayor capacidad estratégica que los países limitados a la exportación del mineral bruto;

P2: prácticas medioambientalmente insostenibles reducen la resiliencia de la cadena, amplían conflictos sociales y regulatorios y comprometen la continuidad de la ventaja estratégica;

P3: La soberanía tecnológica en la era de la IA depende de la combinación entre seguridad mineral, capacidad industrial, dominio científico, infraestructura digital, gobernanza de la IA y defensa cibernética.

1.3. Objetivo general

Analizar cómo las tierras raras, comprendidas como activos geoambientales estratégicos, pueden ser convertidas en capacidad industrial, soberanía tecnológica e influencia geopolítica en el contexto de la expansión mundial de la Inteligencia Artificial.

1.4. Objetivos específicos

a) caracterizar la importancia geológica, ambiental, industrial y tecnológica de las tierras raras;

b) examinar la concentración geográfica de las etapas de extracción, procesamiento y fabricación de componentes;

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

c) analizar la relación entre minerales críticos, infraestructura tecnológica y expansión de la Inteligencia Artificial;

d) discutir la sostenibilidad ambiental como condición de la resiliencia de las cadenas de tierras raras;

e) investigar las conexiones entre Inteligencia Artificial, soberanía tecnológica y ciberseguridad;

f) identificar las capacidades que permiten transformar recursos geoambientales en influencia geopolítica;

g) proponer el Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT);

h) desarrollar el Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA) como instrumento teórico de análisis comparativo.

1.5. Justificación y relevancia científica

La relevancia científica de este estudio se encuentra en la integración de campos que normalmente permanecen separados: Ciencias geoambientales, Economía Mineral, Política Industrial, Inteligencia Artificial, Seguridad Cibernética y Geopolítica. La originalidad no sólo proviene de la reunión de estos temas, sino de la proposición de un mecanismo explicativo destinado a demostrar cómo los recursos naturales pueden ser convertidos en poder tecnológico.

Este enfoque supera dos interpretaciones reduccionistas. La primera asocia poder mineral exclusivamente a la existencia de reservas. La segunda trata la IA como capacidad predominantemente algorítmica, desconsiderando su infraestructura física, energética e industrial. El presente estudio sostiene que la soberanía tecnológica depende de una cadena integrada de capacidades y que fallas en cualquier etapa pueden limitar la conversión del potencial geoambiental en influencia estratégica.

La investigación también tiene relevancia política y práctica. Los gobiernos pueden utilizar el modelo propuesto para identificar cuellos de botella en sus cadenas de valor; las instituciones científicas pueden hacerlo para organizar programas interdisciplinarios; y las empresas pueden adaptarlo a la evaluación de riesgos de abastecimiento, sostenibilidad y dependencia tecnológica.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

1.6. Contribuciones originales del estudio

La primera contribución consiste en la proposición del Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT), estructurado preliminarmente de la siguiente forma:

Recursos geoambientales

↓

Disponibilidad de tierras raras

↓

Capacidad de extracción sostenible

↓

Capacidad de procesamiento y separación

↓

Industria de materiales y componentes avanzados

↓

Infraestructura tecnológica y de Inteligencia Artificial

↓

Capacidad de defensa cibernética

↓

Soberanía tecnológica

↓

Influencia y poder geopolítico

El modelo parte del principio de que cada etapa funciona simultáneamente como mecanismo de agregación de valor y posible punto de estrangulamiento. Un país puede poseer reservas significativas, pero permanecer tecnológicamente dependiente si no dispone de capacidad de procesamiento. De la misma forma, puede presentar capacidad industrial y científica avanzada y, aun así, permanecer vulnerable cuando depende excesivamente de proveedores externos concentrados.

La segunda contribución es el Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA). El índice se basa en las dimensiones del MCGPT y es concebido, en este artículo, como un framework analítico multidimensional. Su finalidad es estructurar la evaluación del potencial de países o regiones para convertir recursos geoambientales en capacidad tecnológica estratégica.

El IGPE-IA no es presentado, en esta etapa, como instrumento estadísticamente validado ni como ranking de países. Su contribución consiste en la proposición fundamentada de

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

las dimensiones, variables y relaciones que podrán ser operacionalizadas y comprobadas en investigaciones futuras. Esta delimitación evita atribuir al framework una capacidad de medición que todavía depende de ponderación, normalización, aplicación comparativa y validación empírica.

1.7. Delimitación del estudio

La investigación se centra en las relaciones entre tierras raras, sostenibilidad de la cadena productiva, infraestructura tecnológica, Inteligencia Artificial, ciberseguridad, soberanía tecnológica y geopolítica. No pretende realizar una evaluación geológica detallada de depósitos específicos ni estimar económicamente proyectos individuales de minería.

Tampoco sostiene que las tierras raras sean los únicos minerales relevantes para la IA. Los semiconductores e infraestructuras digitales dependen de diversos materiales, como cobre, silicio, galio, germanio, cobalto, níquel, litio y grafito. La elección de las tierras raras proviene de sus propiedades singulares, de la concentración de las etapas de procesamiento, de la relevancia para tecnologías avanzadas y de su valor analítico para comprender la relación entre recursos naturales y poder.

1.8. Estructura del artículo

Además de esta introducción, el artículo está organizado en cuatro secciones posteriores. La Sección 2 presenta el referencial teórico sobre tierras raras, criticidad mineral, sostenibilidad, Inteligencia Artificial, ciberseguridad, soberanía tecnológica y geopolítica. La Sección 3 explicita el recorrido metodológico, incluyendo el análisis documental, la revisión integradora y la síntesis temática. La Sección 4 reúne los resultados y la discusión, desarrollando el MCGPT y el IGPE-IA. La Sección 5 presenta las consideraciones finales, las contribuciones, las limitaciones y la agenda de validación futura.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Evolución de la importancia estratégica de los recursos naturales

La relación entre recursos naturales y poder político acompaña la evolución de las sociedades industriales. En diferentes períodos históricos, las materias primas específicas han asumido una posición central en la organización de las economías, en la expansión territorial de los Estados y en la consolidación de ventajas militares y tecnológicas. Carbón, hierro, petróleo, uranio y minerales críticos ilustran cómo ciertos recursos pueden superar la condición de

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

mercancías y convertirse en elementos estructurantes del orden internacional (Yergin, 1991; Bridge, 2009; Klare, 2012).

Durante la Primera Revolución Industrial, el carbón mineral funcionó como base energética de la mecanización, de la siderurgia y de los ferrocarriles. En la Segunda Revolución Industrial, el petróleo asumió un papel decisivo en la movilidad, la aviación, la industria química y la proyección militar. La historia del petróleo evidencia que la seguridad del abastecimiento, la localización de las reservas, la infraestructura de transporte y la capacidad de refino pueden alterar alianzas, conflictos y estrategias nacionales (Yergin, 1991).

La economía digital no eliminó la materialidad de las relaciones de poder. La transición energética, la electrificación, la automatización y la IA aumentaron la importancia de materiales con propiedades magnéticas, ópticas y electroquímicas específicas. Kalantzakos (2020) sostiene que la descarbonización y la Cuarta Revolución Industrial desencadenaron una carrera por el acceso a minerales críticos, mientras que la IEA (2025, 2026) identifica una fuerte concentración tanto en la minería como en el refino de diversos materiales estratégicos.

Este cambio no representa una simple sustitución del petróleo por minerales críticos. Se trata de una diversificación de la base material del poder. La seguridad energética sigue siendo relevante, pero coexiste con seguridad mineral, seguridad industrial, seguridad digital y capacidad científica. El Estado que depende de terceros para procesar materiales, fabricar componentes, construir infraestructuras digitales o operar sistemas estratégicos está expuesto a riesgos que no son explicados solamente por la geología de su territorio.

Bajo la óptica geoambiental, los recursos naturales deben ser interpretados como parte de sistemas sociotécnicos. Su valor no es fijo: depende de conocimiento geológico, tecnología de extracción, infraestructura, regulación, costos ambientales, aceptación social, logística, capacidad de procesamiento e integración a mercados. Esta lectura acerca la geografía de los recursos de la economía política internacional y permite comprender por qué países con grandes reservas pueden permanecer exportadores de bajo valor agregado.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Tabla 1. Evolución histórica de la relación entre recursos naturales y poder

Período	Recurso dominante	Base tecnológica	Expresión geopolítica
Primera Revolución Industrial	Carbón y hierro	Máquinas de vapor, siderurgia y vías férreas	Industrialización y expansión imperial
Siglo XX	Petróleo y uranio	Transporte, petroquímica, aviación y energía nuclear	Seguridad energética y poder militar
Transición energética-digital	Minerales críticos y tierras raras	Electrificación, energías renovables, sensores, robótica e IA	Soberanía tecnológica y seguridad de las cadenas

Fuente: elaboración de los autores con base en Yergin (1991), Bridge (2009), Klare (2012), Kalantzakos (2020) e IEA (2025).

2.2. Tierras raras como activos geoambientales

Los elementos de tierras raras corresponden a los quince lantánidos, normalmente considerados en conjunto con escandio y itrio debido a las similitudes geoquímicas y a las aplicaciones industriales. A pesar de la denominación, varios de estos elementos no son excepcionalmente escasos en la corteza terrestre. El principal desafío está en la baja concentración en depósitos económicamente viables y en la dificultad de separación entre elementos de comportamiento químico similar (Balaram, 2019; Haque *et al.*, 2014).

La literatura suele distinguir tierras raras leves y pesadas. La clasificación puede variar según el criterio adoptado, pero es útil porque los elementos presentan diferencias en abundancia, mineralogía, disponibilidad y aplicación. Neodimio y praseodimio son relevantes para imanes permanentes; disprosio y terbio aumentan el rendimiento de esos imanes a temperaturas elevadas; európio, terbio y itrio son empleados en fósforos y sistemas ópticos; lantano y cerio poseen amplia utilización en catalizadores, ligas y polimento (Balaram, 2019; Demir *et al.*, 2026).

Considerarlas activos geoambientales significa integrar dimensiones físicas, territoriales, ecológicas, económicas, industriales e institucionales. El activo no es sólo el cuerpo mineral, sino la combinación de reserva, calidad del mineral, tecnología disponible, infraestructura, agua y energía, licencia, capacidad de tratamiento de los desechos, acceso logístico y legitimidad social. La criticidad resulta de esta combinación y no de una propiedad geológica aislada (Nassar *et al.*, 2015).

La minería y el procesamiento pueden producir impactos significativos. Métodos convencionales demandan reactivos, agua y energía; ciertos depósitos están asociados a torio

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

y uranio; y las etapas de separación pueden generar efluentes y residuos de tratamiento complejo. Haque *et al.* (2014) y Edahbi *et al.* (2019) demuestran que la sostenibilidad de la cadena exige evaluación de ciclo de vida, gestión de residuos, recuperación de áreas y monitoreo de agua y suelo.

La dimensión social también debe ser considerada. Los proyectos minerales dependen de relaciones con comunidades, transparencia, distribución de beneficios y cumplimiento regulatorio. La ausencia de estos elementos puede provocar oposición, retrasos y pérdida de licencia social para operar. Por lo tanto, la sostenibilidad no es variable periférica; ella interfiere directamente en la continuidad productiva y en la capacidad de convertir un recurso geológico en ventaja estratégica.

Tabla 2. Dimensiones constitutivas de las tierras raras como activos geoambientales

Dimensión	Cuestiones centrales	Efecto estratégico
Geológica	Contenido, mineralogía, tamaño y ubicación del depósito	Establece el potencial físico y la complejidad técnica
Ambiental	Agua, energía, desechos, radiactividad y recuperación	Afecta a costes, licencias y continuidad
Industrial	Separación, refino, aleaciones, imanes y componentes	Determina agregación de valor
Institucional	Regulación, política industrial y gobernanza	Coordina la inversión y reduce la incertidumbre
Social	Participación, beneficios y licencia social	Condiciona legitimidad y estabilidad
Geopolítica	Dependencia, comercio y controles de exportación	Convierte la concentración en influencia

Fuente: elaboración de los autores con base en Nassar *et al.* (2015), Balaram (2019), Edahbi *et al.* (2019) y Demir *et al.* (2026).

2.3. Cadenas globales de valor de minerales críticos

La cadena de las tierras raras comprende etapas sucesivas y tecnológicamente distintas: prospección, minería, concentración, separación química, producción de óxidos y metales, fabricación de aleaciones, imanes u otros materiales funcionales e incorporación a productos finales. La vulnerabilidad no solo depende de la concentración de la extracción; puede ser aún mayor en el refino, en la separación y en la manufactura de componentes (IEA, 2025; Demir *et al.*, 2026).

La IEA (2025) estimó que en 2024 los tres países más grandes concentraban el 86% de la minería y el 97% del refino de los principales elementos utilizados en imanes permanentes.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Incluso en escenarios con nuevos proyectos, la concentración del refino permanece elevada para 2030 y 2040. Esto demuestra que la diversificación de las minas no produce automáticamente la diversificación de la cadena.

El dominio de las etapas intermedias genera ventajas acumulativas: escala, experiencia operacional, redes de proveedores, disponibilidad de reactivos, infraestructura, conocimiento tácito y proximidad con fabricantes de componentes. Nuevos proyectos fuera de los centros dominantes enfrentan altos costos de capital, volatilidad de precios, licencias demoradas y dificultades para garantizar compradores a largo plazo.

La resiliencia requiere estrategias complementarias. Entre ellas están diversificación geográfica, contratos de largo plazo, inventarios estratégicos, asociaciones internacionales, trazabilidad, investigación en sustitución, reciclaje y expansión de la capacidad de procesamiento. Sin embargo, la circularidad tiene límites temporales: la cantidad de material disponible para reciclaje depende del stock en uso y de la vida útil de los productos (Wang *et al.*, 2024).

La cadena también es sensible a las decisiones políticas. Controles de exportación, sanciones, requisitos de licencia y restricciones sobre tecnologías de procesamiento pueden afectar a industrias mucho más allá del sector mineral. La IEA (2026) demuestra que interrupciones amplias podrían comprometer sectores de alto valor, incluyendo automóviles, electrónica, defensa y centros de datos.

Figura 1. Cadena global de valor de las tierras raras



Fuente: elaboración de los autores con base en IEA (2025, 2026) y Demir *et al.* (2026).

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

2.4. Inteligencia Artificial y su infraestructura física

La Inteligencia Artificial es frecuentemente descrita a partir de algoritmos, datos y modelos computacionales. Sin embargo, su operación depende de una infraestructura material y energética: semiconductores, servidores, redes, sistemas de almacenamiento, equipos de energía, refrigeración, motores, sensores y dispositivos de automatización. Esta base física conecta la economía digital a las cadenas de minerales críticos.

Las tierras raras no son el único conjunto material relevante para la IA, y su función varía entre equipamientos. Aparecen de forma especialmente importante en imanes permanentes de alto rendimiento, motores, actuadores, discos, sensores, componentes ópticos, sistemas de energía, telecomunicaciones, robótica y equipos auxiliares de centros de datos. La relación entre IA y tierras raras es, por lo tanto, sistémica y distribuida, no una correspondencia simple entre un algoritmo y un elemento mineral.

La IEA (2026) incluyó expresamente tecnologías de IA y centros de datos entre las aplicaciones estratégicas expuestas a riesgos en las cadenas de tierras raras. El crecimiento del uso de IA también eleva la demanda de energía, infraestructura de transmisión y equipos de refrigeración, ampliando la interdependencia entre seguridad digital, seguridad energética y seguridad mineral.

Desde el punto de vista económico, el liderazgo en IA depende de un ecosistema que combina investigación, capital, datos, energía, chips, equipos, talento y capacidad industrial. Un país puede desarrollar modelos avanzados y, al mismo tiempo, permanecer vulnerable por depender de componentes, materiales o tecnologías de fabricación controladas externamente.

Esa materialidad impone una revisión del concepto de soberanía digital. No basta con controlar datos o disponer de legislación. La autonomía requiere capacidad de operar infraestructura, garantizar el suministro, mantener equipos, auditar algoritmos y responder a interrupciones. Así, la soberanía de la IA debe ser entendida como capacidad sociotécnica apoyada en recursos físicos e institucionales.

Estudios recientes de atención pública y visibilidad académica refuerzan esa convergencia. El IICTEC Research Report No. 001/2026 identificó que el interés global por IA pasó a alcanzar, de modo más evidente, semiconductores, GPUs, minerales críticos y centros de datos (IICTEC, 2026). En análisis complementarios, Alves y Conceição (2026) encontraron asociaciones fuertes entre atención pública y visibilidad académica explícitamente vinculada a la IA para semiconductores, minerales críticos y data centers, aunque destacaron que los recuentos estimados de Google Scholar no equivalen a números exactos de publicaciones.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Tabla 3. Materialidad de la infraestructura de Inteligencia Artificial

Capa IA	Infraestructura asociada	Dependencia material o industrial
Entrenamiento e inferencia	Servidores, aceleradores y almacenamiento	Semiconductores, metales, energía y refrigeración
conectividad	Redes, cables, antenas y equipos ópticos	Materiales electrónicos, ópticos y magnéticos
Automatización	Robots, motores, actuadores y sensores	Imanes permanentes y materiales funcionales
Energía	Generación, transmisión, UPS y refrigeración	Cobre, imanes, materiales de potencia y equipos
Seguridad	Monitoreo, respuesta y redundancia	Infraestructura confiable, mantenimiento y componentes

Fuente: elaboración de los autores con base en IEA (2026), Balaram (2019) y Demir *et al.* (2026).

2.5. Ciberseguridad y soberanía tecnológica

La soberanía tecnológica puede entenderse como la capacidad de una sociedad para decidir, desarrollar, operar, auditar y proteger tecnologías consideradas esenciales. El concepto no implica autosuficiencia absoluta, sino reducción de dependencias críticas y mantenimiento de alternativas suficientes para preservar autonomía decisoria.

La ciberseguridad integra esta capacidad porque infraestructuras críticas, servicios públicos, cadenas industriales y sistemas de defensa dependen de redes y aplicaciones digitales. La IA puede ampliar la detección de anomalías, la correlación de eventos, la automatización de auditorías y la respuesta a incidentes. Alves y Conceição (2025) destacan el potencial de la IA para hacer auditorías de conformidad más continuas y preventivas.

Por otro lado, la adopción de IA crea riesgos relacionados a la opacidad, sesgos, ataques adversos, manipulación de datos y dependencia de plataformas. Santana *et al.* (2026) observan que el avance del desempeño de los modelos intensificó la necesidad de explicabilidad y gobernanza. Soberanía tecnológica, por lo tanto, requiere simultáneamente capacidad de innovación y capacidad de control.

La respuesta a estos riesgos requiere gobernanza verificable y competencias de investigación. Correia *et al.* (2026) sistematizan normas y reglamentaciones internacionales aplicables a la gobernanza de IA, mientras que Santana (2026) destaca técnicas asistidas por IA para análisis de autenticidad, rastreo de evidencias e investigación de desinformación. En conjunto con la explicabilidad discutida por Santana *et al.* (2026), estas contribuciones muestran que la autonomía tecnológica depende tanto de capacidad operacional como de transparencia, auditabilidad y responsabilidad humana.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

La dependencia de componentes o materiales concentrados puede generar riesgo cibernético indirecto. Una interrupción física puede limitar la reposición de equipos; componentes no confiables pueden introducir vulnerabilidades; y la ausencia de capacidad industrial puede dificultar la actualización o recuperación de infraestructuras. La seguridad digital comienza antes del software y alcanza toda la cadena de suministro.

La articulación entre seguridad mineral, industrial y cibernética sostiene el argumento de que el poder tecnológico es resultado de capacidades combinadas. El Estado estratégicamente preparado necesita conocer sus puntos de dependencia, diversificar proveedores, desarrollar competencia técnica, proteger propiedad intelectual, mantener inventarios o redundancias y adoptar gobernanza responsable de la IA.

Tabla 4. Dimensiones de la soberanía tecnológica

Capacidad	Pregunta de soberanía	Riesgo de ausencia
Material	¿Hay acceso seguro a minerales y componentes?	Interrupción y dependencia externa
Industrial	¿Es posible procesar, fabricar y reparar?	Baja agregación de valor y fragilidad
Científico	¿Hay conocimiento para innovar y reemplazar?	Obsolescencia y dependencia tecnológica
Digital	¿Pueden ser operados localmente?	Pérdida de autonomía operativa
Cibernética	¿Pueden ser auditados, protegidos y recuperados?	Exposición de ataques y coerción
Regulatoria	¿La tecnología es gobernada de forma legítima?	Opacidad, abuso y pérdida de confianza

Fuente: elaboración de los autores con base en Alves y Conceição (2025), Santana *et al.* (2026) e IEA (2026).

2.6 Geopolítica de las tierras raras

La geopolítica de las tierras raras deriva de la interacción entre distribución territorial, concentración industrial, comercio internacional, políticas públicas y valor estratégico de las aplicaciones. Kalantzakos (2020) demuestra que la competencia por minerales críticos acompaña realineamientos geopolíticos más amplios, mientras que Klare (2012) sitúa la disputa por recursos en el contexto de la creciente presión sobre materiales esenciales.

La posición dominante de China no se limita a las reservas o a la minería. Incluye separación, refino, producción de metales y aleaciones, fabricación de imanes e integración con cadenas industriales. La IEA (2025, 2026) muestra que esta concentración crea una exposición significativa para economías que dependen de importaciones y sectores downstream de alto valor.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Los Estados Unidos, la Unión Europea, Japón, Australia y otros actores han adoptado políticas de diversificación, acuerdos, incentivos para la producción, reservas y apoyo al reciclaje. La Unión Europea ha reforzado este movimiento con el Critical Raw Materials Act, que combina objetivos de extracción, procesamiento, reciclaje y límites de dependencia de un solo tercer país.

África, América Latina y otras regiones con potencial mineral pueden adquirir mayor importancia, pero enfrentan riesgo de repetir modelos extractivistas de bajo valor agregado. La conversión de reservas en desarrollo depende de infraestructura, negociación de contenido local, calificación, protección ambiental, gobernanza y acceso a tecnologías de procesamiento.

La geopolítica también puede utilizar el comercio como instrumento de presión. Restricciones de exportación, controles sobre equipos y licencias pueden transformar concentración industrial en poder de negociación. La respuesta de los países importadores tiende a combinar la diversificación, la fricción, la innovación, el reciclaje y la formación de alianzas minerales.

Sin embargo, la fragmentación excesiva de las cadenas puede elevar costos y retardar objetivos ambientales y tecnológicos. La cooperación internacional sigue siendo necesaria para patrones ambientales, transparencia, financiación y circulación de materiales secundarios. La seguridad mineral debe equilibrar resiliencia, sostenibilidad y eficiencia.

La competencia geopolítica también tiene una dimensión informacional. El IICTEC (2026) y Alves y Conceição (2026) demuestran que la atención pública y la visibilidad académica pueden acompañar la creciente incorporación de componentes materiales a la agenda de la IA. Silva (2026), al analizar la economía de la atención, añade que las señales de interacción se convierten en datos que retroalimentan sistemas algorítmicos y condicionan exposiciones futuras. Esta capa no sustituye la base mineral e industrial del poder, pero ayuda a explicar cómo infraestructura, riesgos y dependencias ganan saliencia social y política.

Tabla 5. Posiciones estructurales en la geopolítica de las tierras raras

Actor o región	Ventaja o potencial	Vulnerabilidad principal
China	Escala, procesamiento e integración industrial	Presión externa por diversificación y restricciones comerciales
Estados Unidos	Mercado, innovación y capacidad financiera	Dependencia en etapas intermedias
Unión Europea	Regulación, tecnología y mercado	Baja producción doméstica y dependencia elevada
Australia	Recursos y experiencia minera	Necesidad de ampliar etapas downstream

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Actor o región	Ventaja o potencial	Vulnerabilidad principal
África y América Latina	Potencial geológico y nuevos proyectos	Riesgo de exportación primaria y fragilidad institucional

Fuente: elaboración de los autores con base en Kalantzakos (2020), IEA (2025, 2026), USGS (2026) y Demir *et al.* (2026).

2.7. Brechas en la literatura

La revisión evidencia literatura robusta sobre geología, aplicaciones, impactos ambientales, criticidad, comercio y geopolítica. Sin embargo, los campos permanecen parcialmente fragmentados. Estudios ambientales rara vez acompañan el recurso hasta su conversión en capacidad tecnológica; análisis geopolíticos frecuentemente agregan minerales diferentes sin examinar los cuellos de botella específicos; y trabajos sobre IA tienden a tratar infraestructura y materias primas como variables externas.

La primera laguna es explicativa: falta un modelo que describa las etapas y condiciones mediante las cuales recursos geoambientales se convierten en soberanía tecnológica. La posesión de reservas se utiliza frecuentemente como indicador de potencial, pero no explica por qué algunos países extraen valor estratégico y otros permanecen proveedores primarios.

La segunda laguna es multidimensional. Los índices de criticidad evalúan riesgo de oferta, vulnerabilidad o impacto ambiental, pero no siempre integran sostenibilidad, procesamiento, industria, ciencia, infraestructura de IA, ciberseguridad y gobernanza en un mismo cuadro comparativo.

La tercera laguna se refiere al vínculo entre sostenibilidad y poder. Parte de la literatura trata requisitos ambientales como costos o restricciones. Este artículo propone interpretarlos como condiciones de resiliencia: cadenas ambientalmente degradantes pueden sufrir rechazo social, sanciones, pasivos, retrasos y pérdida de competitividad.

La cuarta laguna reside en la materialidad de la IA. La expansión de los sistemas inteligentes es generalmente discutida en términos de datos y algoritmos, sin integración suficiente con los recursos, equipamientos y cadenas industriales que sustentan su operación.

Finalmente, hay laguna metodológica entre modelos conceptuales e instrumentos medibles. El MCGPT busca ofrecer mecanismo causal organizado, mientras que el IGPE-IA traduce sus dimensiones en una futura arquitectura de indicadores. La combinación pretende construir puente entre interpretación teórica y comparación empírica.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Tabla 6. Resumen de las lagunas y contribuciones del estudio

Lo que la literatura ya explica	Limitación identificada	Avance propuesto
Criticidad y riesgo de oferta	Énfasis mineral o comercial	Integración con capacidad tecnológica y cibernética
Impacto ambiental de la minería	Separación entre ambiente y geopolítica	Sostenibilidad como condición de resiliencia
Concentración de la cadena	Poca explicación de la conversión del recurso en poder	MCGPT como mecanismo de transformación
Infraestructura y expansión de la IA	Materialidad mineral poco integrada	Relación sistémica entre IA y cadena industrial
Índices de criticidad	Dimensiones incompletas para IA	IGPE-IA multidimensional

Fuente: elaboración de los autores (2026).

2.8. Síntesis del marco teórico

El referencial demuestra que la importancia de las tierras raras emerge de la interacción entre propiedades físico-químicas, concentración de la oferta, complejidad del procesamiento, aplicaciones de alto desempeño y relevancia para sectores estratégicos. Su análisis requiere un enfoque que supere la geología e incorpore ambiente, industria, tecnología, instituciones y relaciones internacionales.

La evolución histórica de los recursos estratégicos muestra que el poder nunca derivó únicamente de la posesión física. El carbón exigió máquinas y transporte; el petróleo exigió refino e infraestructura; y las tierras raras exigen separación sofisticada, materiales funcionales, manufactura avanzada e integración tecnológica. La etapa decisiva es la capacidad de conversión.

La infraestructura de IA refuerza esa conclusión. Algoritmos dependen de equipos, energía, redes, sensores y cadenas industriales. La autonomía digital está vinculada a la seguridad mineral e industrial, mientras que la ciberseguridad depende de la capacidad de operar, auditar, mantener y recuperar sistemas críticos.

La sostenibilidad atraviesa todas estas dimensiones. Las repercusiones ambientales y sociales pueden limitar proyectos y comprometer la legitimidad de las cadenas. Reciclaje, recuperación, sustitución y eficiencia reducen riesgos, pero no dispensan minería responsable y cooperación internacional.

La literatura, sin embargo, todavía no ofrece una estructura integrada que represente de forma explícita la secuencia por la cual un recurso geoambiental puede convertirse en capacidad

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

de procesamiento, industria, infraestructura de IA, defensa cibernética, soberanía e influencia geopolítica. Esa laguna fundamenta la proposición del MCGPT.

El referencial también sustenta la necesidad del IGPE-IA. Un país no debe ser evaluado únicamente por reservas o producción. Es necesario observar sostenibilidad, procesamiento, manufactura, ciencia, energía, infraestructura digital, gobernanza y ciberseguridad. Esas dimensiones son desarrolladas analíticamente en la Sección 4.

En síntesis, el argumento teórico puede ser expresado por la siguiente relación: recursos naturales poseen potencial estratégico; capacidades industriales convierten ese potencial en valor tecnológico; capacidades digitales y cibernéticas transforman el valor tecnológico en autonomía; e instituciones y políticas convierten autonomía en influencia duradera. La Sección 3 presenta el método utilizado para consolidar esta estructura y fundamentar los dos instrumentos propuestos.

Figura 2. Resumen de la arquitectura teórica del estudio



Fuente: elaboración de los autores (2026).

3. METODOLOGÍA

3.1. Naturaleza y enfoque de la investigación

La presente investigación posee naturaleza cualitativa, carácter exploratorio y finalidad teórico-conceptual. El enfoque cualitativo fue seleccionado porque el objetivo del estudio no consiste en medir estadísticamente la producción o las reservas mundiales de tierras raras, sino en interpretar las relaciones existentes entre recursos geoambientales, cadenas productivas, sostenibilidad, Inteligencia Artificial, ciberseguridad, soberanía tecnológica y poder geopolítico.

La investigación cualitativa permite analizar fenómenos complejos a partir de sus significados, contextos, relaciones y mecanismos explicativos. Ese enfoque es especialmente

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

adecuado cuando el problema investigado involucra diferentes campos del conocimiento y requiere una comprensión integrada, en vez de la verificación aislada de variables cuantitativas. Lim (2024) destaca que la investigación cualitativa favorece el análisis profundo de fenómenos complejos, ofreciendo perspectivas contextuales y holísticas, aunque requiere transparencia metodológica y reflexividad para reducir posibles sesgos interpretativos.

En el presente estudio, el enfoque cualitativo fue utilizado para construir una interpretación teórica acerca de la transformación de las tierras raras en activos estratégicos. Se basó en el entendimiento de que la disponibilidad mineral no produce automáticamente soberanía tecnológica. Entre la existencia del recurso y su conversión en poder geopolítico se encuentran capacidades ambientales, industriales, científicas, digitales, institucionales y cibernéticas que precisaron ser identificadas y organizadas analíticamente.

La investigación no pretende probar relaciones causales por medio de modelos econométricos ni atribuir pesos estadísticos definitivos a las dimensiones propuestas. Su propósito es desarrollar una estructura explicativa fundamentada en la literatura y en documentos institucionales, resultando en la proposición del Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT) y de las dimensiones preliminares del Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA).

3.2. Investigación documental

La investigación documental fue empleada para examinar informes, reglamentos, estrategias gubernamentales, bases estadísticas, planes industriales y documentos de organizaciones nacionales e internacionales relacionados con las tierras raras, los minerales críticos, la Inteligencia Artificial, la seguridad económica y la soberanía tecnológica.

Bowen (2009) define el análisis documental como un procedimiento sistemático de examen e interpretación de documentos impresos o electrónicos, mediante el cual los datos son organizados y analizados para producir comprensión y conocimiento empírico. Morgan (2022) añade que la investigación documental cualitativa debe considerar la autenticidad, la finalidad, el contexto de producción y las limitaciones de los documentos seleccionados, evitando tratarlos como fuentes neutras o independientes de los intereses de las instituciones que los produjeron.

El corpus documental comprendió prioritariamente:

i) informes de la Agencia Internacional de Energía, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico y de organismos multilaterales;

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

j) documentos de la Unión Europea, los Estados Unidos, China y otros países con políticas específicas para minerales críticos;

k) estrategias nacionales de Inteligencia Artificial, ciberseguridad, minería y política industrial;

l) bases públicas sobre reservas, producción, procesamiento, comercio y dependencia de importaciones;

m) reglamentos relativos a la sostenibilidad, la trazabilidad y la seguridad de las cadenas de materias primas críticas.

Fueron incluidos documentos cuya autoría institucional, fecha de publicación, finalidad y contenido pudieron ser identificados. Fueron excluidos materiales promocionales sin indicación metodológica, publicaciones sin autoría verificable, contenidos duplicados y documentos sin relación directa con el problema de investigación.

El análisis documental no se limitó a la reproducción de los números y posiciones oficiales. Los documentos fueron interpretados críticamente, considerando el contexto geopolítico en que fueron elaborados, los intereses de sus productores, las prioridades declaradas y las posibles divergencias entre objetivos políticos, capacidad industrial y disponibilidad efectiva de recursos.

3.3. Revisión bibliográfica

La investigación documental fue complementada por revisión bibliográfica de carácter integrativo y orientada a la construcción teórica. Snyder (2019) sostiene que la revisión de la literatura puede constituir una metodología de investigación cuando realizada de manera transparente y sistemáticamente organizada, permitiendo sintetizar conocimientos fragmentados, identificar lagunas y desarrollar modelos conceptuales.

La búsqueda bibliográfica abarcó artículos científicos, revisiones, libros y capítulos especializados publicados, preferencialmente, entre 2000 y julio de 2026. Las obras anteriores fueron incorporadas cuando presentaron relevancia histórica o teórica indispensable, especialmente en los campos de la geopolítica de los recursos naturales, la economía política internacional y las transiciones tecnológicas.

La recuperación bibliográfica fue realizada hasta el 24 de julio de 2026 por medio del Consensus, mecanismo de búsqueda sobre literatura científica indexada, con verificación complementaria de autoría, año, periódico y DOI en las páginas de los periódicos y editoriales. Para los datos institucionales, fueron consultadas fuentes primarias de la IEA, del USGS y de la

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Unión Europea. Las búsquedas fueron realizadas en inglés, portugués y español, utilizando combinaciones de los siguientes términos:

"rare earth elements", "critical minerals", "artificial intelligence", "geopolitics", "technological sovereignty", "cybersecurity", "supply chain", "mineral security", "environmental sustainability", "critical raw materials", "terras raras", "minerais críticos", "soberania tecnológica" y "ciberseguridad".

Fueron incluidos trabajos con relación directa con al menos una de las dimensiones del estudio: disponibilidad mineral; extracción y sostenibilidad; procesamiento y refino; industria de materiales avanzados; infraestructura de IA; ciberseguridad; soberanía tecnológica; o influencia geopolítica. Fueron priorizados estudios revisados por pares, documentos metodológicamente transparentes y publicaciones de reconocida relevancia científica o institucional.

La revisión no fue realizada como metaanálisis, ya que el corpus reunió evidencias heterogéneas, provenientes de estudios ambientales, geológicos, económicos, tecnológicos y geopolíticos. Su finalidad fue construir una síntesis interdisciplinar capaz de identificar relaciones, convergencias, divergencias y lagunas entre campos que frecuentemente analizan el fenómeno de forma fragmentada.

3.4. Análisis temático

Los materiales seleccionados fueron sometidos al análisis temático, comprendido como método de identificación, organización e interpretación de patrones de significado presentes en datos cualitativos. Clarke y Braun (2017) explican que el análisis temático ofrece flexibilidad para trabajar con diferentes perspectivas teóricas, siempre que el investigador explicite los criterios de codificación y reconozca su papel activo en la construcción de los temas.

El análisis fue desarrollado en cinco etapas:

1. lectura integral y familiarización con los artículos y documentos;
2. identificación y codificación de las unidades de significado relacionadas con el problema de la investigación;
3. agrupación de los códigos en categorías temáticas preliminares;
4. revisión de las categorías, con comparación entre fuentes científicas e institucionales;
5. definición de los temas centrales y de las relaciones existentes entre ellos.

Las categorías iniciales fueron orientadas por el referencial teórico, pero permanecieron abiertas a la incorporación de dimensiones emergentes. Entre las categorías preliminares se

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

encontraban: disponibilidad geoambiental; sostenibilidad de la extracción; capacidad de procesamiento; agregación industrial de valor; infraestructura tecnológica; Inteligencia Artificial; ciberseguridad; soberanía tecnológica; dependencia externa; y poder geopolítico.

La codificación no tuvo como finalidad únicamente contabilizar la frecuencia de los términos. Determinada categoría pudo ser considerada teóricamente relevante incluso cuando apareció en número reducido de fuentes, siempre que contribuyera a explicar los mecanismos de transformación de los recursos geoambientales en capacidad estratégica.

3.5. Síntesis interpretativa

Después del análisis temático, fue realizada una síntesis interpretativa destinada a articular los resultados documentales y bibliográficos. Dixon-Woods (2011) observa que la síntesis cualitativa basada en estructuras conceptuales puede utilizar un modelo inicial como referencia de codificación, modificándolo a medida que nuevos factores y relaciones son identificados en el corpus analizado.

En este estudio, la síntesis ocurrió mediante comparación entre las categorías, identificación de relaciones causales o condicionales y organización de las etapas que conectan recursos naturales, capacidades productivas e influencia geopolítica. El procedimiento no solo buscó resumir lo que cada autor afirmó, sino producir una interpretación integradora que explicara por qué la existencia de reservas minerales genera resultados estratégicos diferentes entre los países.

La síntesis interpretativa fundamentó la construcción del MCGPT. Cada componente del modelo presenta correspondencia con evidencias identificadas en la literatura o en los documentos analizados. El mismo procedimiento orientó la formulación de las dimensiones preliminares del IGPE-IA, sin que eso implique, en esta etapa, validación estadística o atribución definitiva de pesos.

Para aumentar la confiabilidad del estudio, fueron adoptados los siguientes procedimientos: registro de las estrategias de búsqueda; explicitación de los criterios de inclusión y exclusión; comparación entre diferentes tipos de fuentes; identificación de informaciones contradictorias; trazabilidad entre categorías y evidencias; y distinción entre resultados extraídos de las fuentes e interpretaciones propuestas por los autores.

Como la investigación utilizó exclusivamente documentos públicos y publicaciones científicas, no hubo interacción con participantes humanos ni recolección de datos personales. Aun así, fueron observados los principios de integridad científica, fidelidad a las fuentes, transparencia metodológica y respeto a la autoría.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

3.6. Declaración de uso de Inteligencia Artificial

Durante la elaboración y la revisión del manuscrito, se utilizó el ChatGPT (OpenAI, modelo GPT-5), al que se accedió en agosto de 2026, exclusivamente como herramienta de apoyo a la organización textual, revisión lingüística y normalización preliminar de citas y referencias. La herramienta no fue considerada autora, no definió la hipótesis, no seleccionó de forma autónoma el corpus, no produjo datos y no sustituyó la interpretación científica. Todas las informaciones, fuentes, DOIs, argumentos y conclusiones fueron verificadas y aprobadas por los autores; no fueron tratados datos personales de participantes ni bases de datos confidenciales. La declaración observa los principios de transparencia, supervisión humana, protección de datos y responsabilidades recomendados por el ICMJE (2026), WAME (Zielinski *et al.*, 2023) y la UNESCO (Miao; Holmes, 2023), en consonancia con la defensa del uso crítico de la IA en el ambiente académico presentado por Carmo y Figueredo (2025).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Síntesis interpretativa de las evidencias

El análisis temático produjo un resultado central: la posición estratégica de un país en la economía de las tierras raras no puede ser inferida a partir de una variable aislada, como reserva, producción mineral o número de patentes. Las evidencias convergen para una arquitectura de capacidades complementarias, en la cual el valor geopolítico emerge de la articulación entre base geoambiental, extracción sostenible, procesamiento, manufactura avanzada, ciencia, infraestructura de Inteligencia Artificial, gobernanza y resiliencia. La disponibilidad mineral constituye condición de posibilidad; la conversión tecnoindustrial determina cuanto de ese potencial se transforma en autonomía y poder.

Los datos más recientes hacen visible esta diferencia entre dotación y conversión. El USGS estimó la producción mundial de tierras raras en 390 mil toneladas de óxido de tierras raras (REO) en 2025, de las cuales 270 000 toneladas fueron producidas por China, aproximadamente el 69,2% del total. El mismo levantamiento registró 44 millones de toneladas de reservas chinas y 21 millones de toneladas en Brasil; sin embargo, la producción brasileña fue estimada en solo 2 mil toneladas. El contraste no demuestra, por sí solo, causalidad entre industrialización y poder, pero constituye evidencia descriptiva de que una base geológica expresiva puede coexistir con baja conversión productiva (USGS, 2026).

La asimetría aumenta a medida que avanza la cadena. Para los cuatro elementos de tierras raras utilizados en imanes (neodimio, praseodimio, disprosio y terbio), la IEA calculó que

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

China respondió en 2024 por 60% de la minería, 91% del refino y 94% de la producción de imanes permanentes sinterizados. La progresión de los porcentajes en el sentido downstream demuestra que el principal centro de gravedad estratégica se encuentra en las etapas de separación, metalización, fabricación de aleaciones e imanes, y no sólo en la extracción (IEA, 2026). Este patrón es coherente con Zhang *et al.* (2022), cuyo análisis de redes y regresión en panel mostró que la competencia internacional varía conforme a la etapa de la cadena y que la posición en las actividades downstream es decisiva para la elevación del status en las cadenas globales de valor.

La demanda refuerza el carácter estructural del problema. Según la IEA (2026), la demanda por los cuatro elementos magnéticos se duplicó desde 2015 y, bajo las políticas actuales, debe crecer aproximadamente un tercio hasta 2030. Los imanes de NdFeB sostienen motores, actuadores, robótica, sistemas energéticos y equipos de centros de datos de IA; por lo tanto, la dependencia no proviene de que el algoritmo contenga tierras raras, sino de la infraestructura electromecánica y energética que lo soporta depender de materiales funcionales. Esta interpretación es consistente con Stacciarini y Gonçalves (2025) y Valdivia (2024), que tratan la IA como cadena material, energética, territorial y laboral, y no como artefacto exclusivamente inmaterial.

La concentración también tiene efectos económicos medibles. Fan, Omura y Roca (2023) encontraron relaciones estadísticamente significativas entre riesgo geopolítico, precios e importaciones japonesas de tierras raras. En un escenario de aplicación integral de los controles de exportación anunciados en 2025, la IEA (2026) estimó que US$ 6,5 billones de producción downstream anual fuera de China quedarían expuestos, con pérdidas directas potenciales superiores a 1,5 billón tanto en Estados Unidos como en Europa. Se trata de escenario de estrés, no de previsión, pero su magnitud evidencia la diferencia entre el valor relativamente limitado del mercado mineral y el valor económico de los sistemas que de él dependen.

La diversificación anunciada sigue siendo desequilibrada. Para 2035, las capacidades existentes y anunciadas fuera del productor dominante cubrirían aproximadamente el 50% de la demanda externa a China en la minería, el 25% en el refino y menos del 20% en los imanes. Una cobertura integral requeriría, además de los proyectos ya anunciados, multiplicar por cerca de dos la capacidad de minería, por cuatro la de refino y por seis la de imanes, con necesidad estimada de US$ 60 mil millones de inversiones en la década (IEA, 2026). Por lo tanto, abrir minas sin instalar separación, metalización y manufactura puede diversificar el origen del mineral sin eliminar la dependencia tecnológica.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

La sostenibilidad surgió como condición interna de la resiliencia. Han *et al.* (2025) sistematizan riesgos de acidificación del suelo, contaminación hídrica, metales pesados y materiales radiactivos asociados a determinados depósitos y procesos. Lee y Wen (2018) estimaron costos ambientales netos de la producción china y demostraron que fiscalización, producción legal y tecnologías más limpias alteran significativamente el balance ambiental y económico. La IEA (2026) añade que el reciclaje puede reducir la necesidad de oferta primaria de tierras raras para imanes en hasta el 35% en 2050. Por lo tanto, licencias, trazabilidad, gestión de desechos y circularidad no son sólo requisitos normativos: influyen en la continuidad operativa, la financiación, la aceptación social y la capacidad de respuesta a choques.

La Tabla 7 organiza las principales evidencias documentales que dieron origen al modelo y al framework propuestos. La columna final no reproduce literalmente las fuentes; explicita la inferencia teórica realizada por los autores a partir de la triangulación. Esta separación es necesaria porque los datos sustentan la plausibilidad de los mecanismos, pero no validan estadísticamente el MCGPT ni el IGPE-IA.

Tabla 7. Matriz de trazabilidad entre evidencias e inferencias analíticas

Evidencia verificada	Resultado documental	Inferencia para el modelo
USGS (2026)	Producción mundial de 390 000 t REO en 2025; China: 270 mil t. Reservas: China 44 millones t; Brasil 21 millones t, con producción brasileña de 2 mil t.	Las reservas expresivas no garantizan la capacidad de conversión productiva.
IEA (2026)	China: 60% de la minería, 91% del refino y 94% de los imanes sinterizados para tierras raras magnéticas en 2024.	El control aumenta en las etapas downstream; procesamiento y manufactura son cuellos estratégicos.
IEA (2026)	Demanda de los elementos magnéticos se duplicó desde 2015 y debe crecer aproximadamente un tercio hasta 2030.	La expansión tecnológica aumenta el valor de cadenas materiales asociadas a la IA, la automatización y la energía.
Zhang *et al.* (2022)	La competencia y la posición en la cadena global varían por etapa, con fuerte intensidad downstream.	La agregación de valor y complejidad industrial explican mejor la ventaja que la exportación bruta.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Evidencia verificada	Resultado documental	Inferencia para el modelo
Fan, Omura y Roca (2023)	Riesgo geopolítico presenta relaciones significativas con precios e importaciones japonesas de tierras raras.	Dependencia concentrada puede convertir interdependencia económica en vulnerabilidad e influencia.
Han *et al.* (2025); Lee y Wen (2018)	Extracción y procesamiento producen costos ambientales relevantes; prácticas y vigilancia alteran esos costos.	Sostenibilidad es un mecanismo de continuidad y resiliencia, no variable externa al poder.
Stacciarini y Gonçalves (2025); Valdivia (2024)	IA depende de centros de datos, energía, equipos, minerales, agua y cadenas industriales.	Soberanía en IA posee dimensión material y territorial además de software, modelos y datos.
Kumar y Mallipeddi (2022)	La digitalización y la integración de las cadenas amplían riesgos cibernéticos y exigen una gestión interorganizacional.	Capacidad tecnológica solo se convierte en soberanía cuando los sistemas y proveedores están protegidos y recuperables.

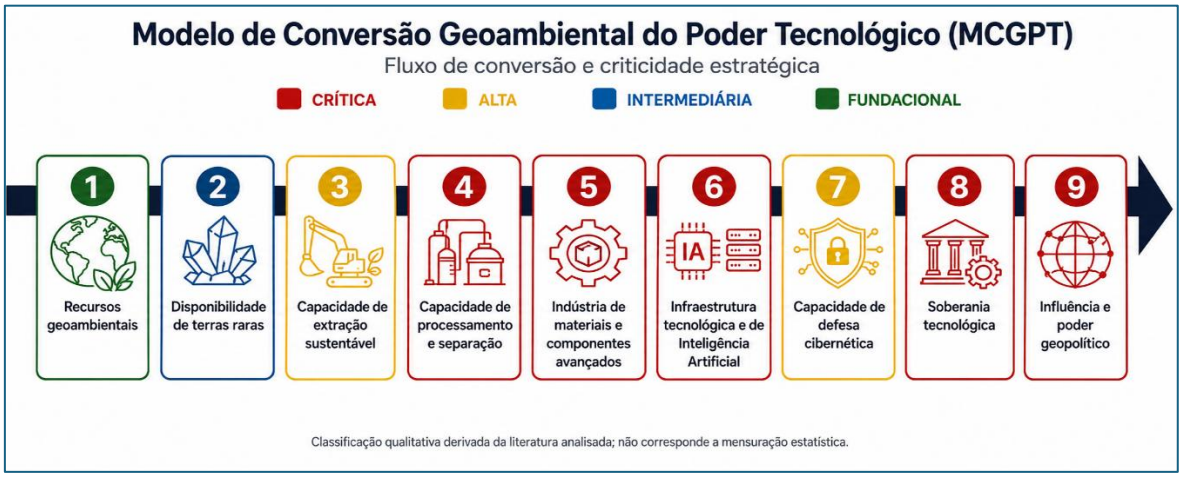
Fuente: elaboración de los autores sobre la base de las fuentes indicadas. Los valores del USGS se refieren a equivalentes de óxido de tierras raras (REO); los porcentajes de la IEA relativos a la cadena mine-to-magnet abarcan Nd, Pr, Dy y Tb.

4.2. Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT)

El Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT) es una estructura teórica-explicativa destinada a representar como un recurso natural potencialmente estratégico puede ser transformado en capacidad tecnológica e influencia geopolítica. El modelo responde a la pregunta “¿por qué mecanismo la dotación geoambiental puede convertirse en poder?”, evitando el determinismo mineral. Su unidad de análisis puede ser un país, una región o una alianza productiva, siempre que las fronteras analíticas sean explicitadas. De esa forma, el modelo es representado gráficamente en la Figura 3.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Figura 3. Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT)



Fuente: Elaboración propia (2026), con base en la síntesis de la literatura analizada.

La clasificación cromática de la Figura 3 se fundamenta inicialmente en la teoría de la criticidad mineral, según la cual la importancia estratégica de un recurso no sólo proviene de su existencia geológica, sino de la combinación entre riesgo de abastecimiento, impactos ambientales y vulnerabilidad frente a restricciones de oferta (Nassar, Du y Graedel, 2015). Por esa razón, los recursos geoambientales — etapa 1 — recibieron el color verde, pues representan una condición fundacional, aunque todavía potencial: poseer reservas no significa controlar su explotación ni obtener poder político o económico. La disponibilidad de tierras raras — etapa 2— fue clasificada en azul, porque la presencia de depósitos asequibles aumenta el potencial estratégico, pero permanece insuficiente sin capacidades productivas complementarias. Haque *et al.* (2014) demuestran que, aunque existen numerosos depósitos identificados, sólo una pequeña parcela se transforma efectivamente en minas operativas. La capacidad de extracción sostenible — etapa 3 — recibió el color amarillo, ya que consumo de agua y energía, generación de desechos, radiactividad, licencias y aceptación social condicionan la continuidad de la producción. Se trata, por lo tanto, de una capacidad de elevada relevancia, pero todavía situada en el segmento primario de la cadena y anterior a las etapas de mayor agregación de valor.

La capacidad de procesamiento y separación — etapa 4, la industria de materiales y componentes avanzados — etapa 5 y la infraestructura tecnológica y de Inteligencia Artificial — etapa 6 recibieron el color rojo por constituir los principales cuellos de botella en la conversión

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

del recurso mineral en capacidad tecnológica. Esta interpretación encuentra respaldo en la teoría de las cadenas globales de valor, de Gereffi, Humphrey y Sturgeon (2005), según la cual la complejidad de las transacciones, la posibilidad de codificación del conocimiento y las capacidades de los proveedores producen diferentes estructuras de coordinación y asimetrías de poder. En el caso de las tierras raras, separar elementos químicamente similares, producir materiales funcionales y fabricar imanes, sensores, semiconductores y componentes requiere conocimiento tácito, escala industrial e infraestructura especializada. Kalantzakos (2020) demuestra que la transición energética-digital y la Cuarta Revolución Industrial han convertido el acceso continuo a los minerales críticos en objeto de competencia geopolítica. Liu *et al.* (2025) añaden evidencias de que los segmentos intermedios y finales de la cadena presentan una fuerte sensibilidad a las relaciones de cooperación y conflicto entre los países. Así, las etapas 4, 5 y 6 son críticas porque determinan quién controla la agregación de valor y consigue convertir materia prima en computación, automatización, infraestructura digital y capacidad de defensa.

La capacidad de defensa cibernética - etapa 7- fue clasificada en amarillo, ya que posee una elevada importancia para proteger, auditar y recuperar infraestructuras críticas, aunque ejerce función predominantemente protectiva: aisladamente, no sustituye las capacidades industrial, científica y computacional anteriores. Calderaro y Blumfelde (2022) demuestran que la soberanía meramente regulatoria es insuficiente cuando el país no dispone de industria avanzada de IA y de una estrategia coherente de defensa. La soberanía tecnológica - etapa 8- recibió el color rojo porque representa la capacidad de controlar tecnologías, infraestructura, datos y decisiones estratégicas, de acuerdo con la concepción de soberanía digital desarrollada por Floridi (2020). Finalmente, la influencia y el poder geopolítico — etapa 9— también fueron representados en rojo, por constituir el resultado culminante del modelo: la capacidad de condicionar mercados, negociar a partir de posiciones menos dependientes y ejercer influencia sobre cadenas internacionales. El color de la etapa 9 indica su centralidad como resultado estratégico, y no una variable independiente. De ese modo, la escala cromática es una clasificación teórico-cualitativa derivada de la literatura, no correspondiendo a pesos o mediciones estadísticamente validados.

La noción de conversión es central. Cada paso modifica simultáneamente la forma material, el valor económico, la intensidad de conocimiento y la exposición al riesgo. El mineral concentrado no es equivalente a óxido separado; el óxido separado no es equivalente a metal o aleación; y un imán no es equivalente a un sistema tecnológico capaz de operar de forma segura. A medida que el recurso avanza, la ventaja depende menos del volumen físico bruto y más de

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

conocimiento tácito, equipamiento especializado, calidad, propiedad intelectual, escala, energía, coordinación y acceso a mercados.

El MCGPT tiene tres bloques. El primero es la base geoambiental, compuesta por la existencia y el conocimiento de los recursos, por su distribución por elemento, por las características mineralógicas y por las condiciones territoriales de acceso. El segundo es la conversión tecnoindustrial, que abarca extracción sostenible, beneficio, separación, refino, metalización, aleaciones, imanes, componentes e integración en la infraestructura de la IA. El tercero reúne los resultados estratégicos: resiliencia, soberanía tecnológica y capacidad de influencia. Ciencia, energía, logística, financiamiento, instituciones, gobernanza socioambiental, ciberseguridad y protección de datos atraviesan toda la cadena.

Figura 4. Arquitectura sintética del MCGPT

BASE GEOAMBIENTAL	CONVERSIÓN TECNOINDUSTRIAL	RESULTADOS ESTRATÉGICOS
Reservas y recursos por elemento Calidad del depósito Acceso material y logístico	**Extracción sostenible → separación y refino → metales, aleaciones e imanes → equipos e infraestructura de IA**	**Resiliencia estratégica Soberanía tecnológica Influencia geopolítica**
CAPACIDADES TRANSVERSALES: ciencia e innovación | energía y logística | financiamiento | gobernanza ambiental y social | ciberseguridad, gobernanza de la IA y protección de datos		
RETROALIMENTACIÓN Y CIRCULARIDAD: aprendizaje, ingresos, reciclaje, sustitución, política industrial y alianzas reconfiguran las etapas anteriores; cualquier cuello de botella puede limitar la conversión.		

Fuente: elaboración de los autores (2026), a partir de la síntesis documental y bibliográfica.

4.2.1. Componentes y mecanismos de conversión

El primer componente es el potencial geoambiental. Incluye reservas y recursos, pero no se limita al volumen agregado. Nassar, Du y Graedel (2015) demuestran que riesgo de oferta, implicaciones ambientales y vulnerabilidad a la restricción varían entre los elementos. Kosajan, Wen y Wang (2025) refuerzan que Pr, Nd y Dy presentan perfiles de criticidad distintos y que decisiones agregadas pueden producir diagnósticos incorrectos. Por lo tanto, el MCGPT exige desagregación mínima de los elementos relevantes para la aplicación analizada e información sobre contenido, mineralogía, coproducción y madurez del conocimiento geológico.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

El segundo componente es la extracción sostenible y socialmente legítima. El recurso solo ingresa en la cadena cuando hay viabilidad técnica, licencia, agua, energía, infraestructura, gestión de desechos y aceptación social. La sostenibilidad actúa como variable de capacidad: impactos no controlados aumentan pasivos, demoras, oposición, costos de financiación y probabilidad de interrupción. El modelo, por lo tanto, rechaza la equivalencia entre capacidad nominal y capacidad resiliente.

El tercer componente es el procesamiento, entendido como beneficio, separación química, purificación y refino. La separación es tecnológicamente intensiva porque elementos de comportamiento químico semejante necesitan alcanzar especificaciones elevadas. La concentración del 91% del refino de tierras raras magnéticas en China en 2024 muestra que esa etapa es un nodo de poder. La mera existencia de concentrado no garantiza acceso a óxidos individualizados ni reduce dependencia de equipos, reactivos o conocimiento externo (IEA, 2026).

El cuarto componente es la agregación de valor industrial. Incluye metalización, producción de polvos y aleaciones, fabricación de imanes, sensores, motores y componentes. El hallazgo de Zhang *et al.* (2022) sobre competencia downstream sostiene la proposición de que la densidad manufacturera altera la posición de un país en la cadena. Además del valor monetario, esa etapa genera aprendizaje, estándares técnicos, relaciones de suministro y capacidad de reparación, factores difícilmente reemplazables en el corto plazo.

El quinto componente es la capacidad científico-tecnológica. Laboratorios, personal calificado, patentes, plantas piloto, metrología, investigación en separación, sustitución y reciclaje permiten reducir costos, adaptar minerales y responder a la escasez. Esa capacidad no es una etapa aislada, sino un multiplicador que actúa sobre toda la cadena. La evidencia de Zhao, Cheng y Xu (2026), según la cual la capacidad tecnológica de los proveedores alternativos pesa más que la proximidad geopolítica en la reconfiguración de la cadena, refuerza esa función.

El sexto componente es la infraestructura material de la IA. Abarca centros de datos, redes, almacenamiento, energía, refrigeración, robótica, sensores, sistemas de potencia y mantenimiento. La IEA (2026) vincula imanes de alto rendimiento a centros de datos, automatización y tecnologías digitales. El MCGPT no afirma que todo sistema de IA demande directamente gran masa de tierras raras; afirma que la escala de la IA es sustentada por ecosistemas electromecánicos y energéticos cuyas dependencias materiales deben ser rastreadas.

El séptimo componente es la gobernanza y la seguridad. Incluye política mineral e industrial, coordinación regulatoria, evaluación de inversión, trazabilidad, contratos, reservas

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

estratégicas, gobernanza responsable de la IA, ciberseguridad y protección de datos. La inclusión proviene de una condición lógica: infraestructura que no puede ser auditada, protegida o recuperada no produce autonomía confiable. Kumar y Mallipeddi (2022) muestran que la integración digital de las operaciones crea riesgos cibernéticos que superan las fronteras organizacionales, haciendo proveedores y terceros parte de la superficie de riesgo.

El octavo componente es el resultado geopolítico. Influencia no significa control absoluto, sino la capacidad de mantener opciones, reducir la coerción, participar en patrones, negociar alianzas y sostener sectores críticos durante choques. El MCGPT distingue poder potencial de poder ejercido: capacidades instaladas aumentan opciones estratégicas, pero su conversión en influencia depende de estrategia estatal, coordinación entre actores y contexto internacional.

Tabla 8. Componentes del MCGPT y hipótesis de mecanismo

Componente	Función en el proceso	Fallo o cuello de botella típico	Resultado esperado
1. Potencial geoambiental	Establece la base material y su calidad por elemento.	Datos geológicos frágiles; recurso sin viabilidad.	Opción material informada.
2. Extracción sostenible	Transforma recurso en oferta licenciada y continua.	Pasivo ambiental; conflicto social; falta de agua/energía.	Producción resiliente.
3. Separación y refino	Produce óxidos individualizados y de elevada pureza.	Dependencia tecnológica y de equipo.	Seguridad de materiales procesados.
4. Industria downstream	Convierte óxidos en metales, aleaciones, imanes y componentes.	Exportación primaria; ausencia de escala y compradores.	Valor agregado y aprendizaje.
5. Ciencia e innovación	Mejora procesos, sustitución, reciclaje y adaptación.	Escasez de competencias y plantas piloto.	Capacidad dinámica de respuesta.
6. Infraestructura IA	Integra componentes, energía, computación y automatización.	Dependencia externa de sistemas y mantenimiento.	Capacidad tecnológica operativa.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Componente	Función en el proceso	Fallo o cuello de botella típico	Resultado esperado
7. Gobernanza y seguridad	Coordina riesgos, datos, proveedores y continuidad.	Fragmentación institucional; vulnerabilidades cibernéticas.	Autonomía confiable y legítima.
8. Resultado geopolítico	Convierte autonomía en opciones, alianzas e influencia.	Ausencia de estrategia o coherencia externa.	Poder de negociación y menor exposición.

Fuente: elaboración de los autores (2026). Las relaciones son proposiciones teóricas fundamentadas, todavía no estimativas causales.

4.2.2. Propiedades analíticas del MCGPT

El modelo posee cinco propiedades. La primera es la no linealidad: choques, innovación, reciclaje y políticas pueden reconfigurar la cadena, y el flujo no ocurre una sola vez. La segunda es la complementariedad: recursos, industria y conocimiento producen resultados más elevados cuando combinados. La tercera es la lógica del eslabón limitante: gran dotación upstream no compensa automáticamente ausencia de refino, imanes o ciberresiliencia. La cuarta es la acumulación: escala, aprendizaje y redes de proveedores pueden reforzar ventajas existentes. La quinta es la multiescalaridad: ninguna economía necesita internalizar todas las etapas, siempre que alianzas y contratos produzcan acceso confiable, diversificado y manejable.

Para fines formales, el resultado estratégico potencial puede ser representado sólo de modo heurístico como P* = f(GE, ES, PR, VA, CT, II, GS, RG), en que GE corresponde a la base geoambiental; ES, a la extracción sostenible; PR, al procesamiento y refino; VA, a la agregación de valor; CT, a la capacidad científico-tecnológica; II, a la infraestructura de IA; GS, a la gobernanza y seguridad; y RG, a la resiliencia geopolítica. La expresión no constituye una ecuación estimada, no fija forma funcional y no autoriza cálculo. Su función es hacer explícitas las dimensiones y permitir que investigaciones futuras prueben complementariedad, umbrales, mediación y efectos de cuello de botella.

4.3. Discusión del MCGPT a la luz de la literatura

El MCGPT aproxima tres tradiciones que normalmente operan separadas. La literatura de criticidad modela riesgo de oferta, vulnerabilidad e implicaciones ambientales; la literatura de cadenas globales de valor examina agregación, competencia y upgrading; y la literatura de soberanía tecnológica discute autonomía decisoria, infraestructura y seguridad. La contribución

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

del modelo consiste en organizar esas tradiciones como un mecanismo de conversión, y no sólo como lista de factores.

En relación a los modelos de criticidad, el MCGPT mantiene la multidimensionalidad de Nassar, Du y Graedel (2015), pero desplaza el foco del material para la capacidad sociotécnica que lo transforma. El riesgo de oferta sigue siendo necesario, pero insuficiente para explicar por qué países con disponibilidad similar alcanzan posiciones distintas. Gemechu *et al.* (2016) demuestran que la exposición comercial y la concentración geopolítica pueden ser incorporadas a indicadores de riesgo; el MCGPT añade la pregunta sobre qué capacidades permiten reducir esa exposición.

En relación a las cadenas de valor, el modelo converge con Zhang *et al.* (2022) al reconocer la heterogeneidad de las etapas. Su avance teórico es tratar el paso upstream-downstream como conversión simultáneamente material y política. Procesamiento y manufactura no sólo capturan renta: generan conocimiento tácito, patrones, capacidad de mantenimiento y poder de interrupción. La concentración del 94% de los imanes sinterizados en un único país proporciona evidencia documental compatible con esa proposición (IEA, 2026).

En relación a la sostenibilidad, el MCGPT diverge de enfoques que la representan sólo como costo. Los resultados de Lee y Wen (2018), Han *et al.* (2025) y de la IEA (2026) justifican tratarla como atributo de la capacidad productiva. Cadenas que externalizan contaminación pueden parecer competitivas en el corto plazo, pero acumulan pasivos e inestabilidad. Por otro lado, los estándares más exigentes suponen costes iniciales, lo que requiere instrumentos de política y financiación para evitar que la diversificación responsable sea inviabilizada por competencia basada en externalización.

En relación a la IA, el MCGPT adopta una interpretación infraestructural. Stacciarini y Gonçalves (2025) y Valdivia (2024) demuestran que centros de datos y cadenas electrónicas dependen de minerales, agua, energía y territorio. El modelo especifica el lugar de las tierras raras en esa materialidad: sobre todo en imanes, motores, actuadores, sensores y sistemas auxiliares. Esta precisión evita dos extremos: presentar la IA como inmaterial o atribuir a las tierras raras un papel exclusivo que pertenece a un conjunto más amplio de minerales críticos.

Finalmente, el MCGPT interpreta soberanía como resiliencia gobernada, no como autosuficiencia. La reestructuración analizada por Zhao, Cheng y Xu (2026) muestra que reducir dependencia puede aumentar costos y que proveedores alternativos necesitan capacidad tecnológica. Por lo tanto, la diversificación debe evaluarse por la existencia de rutas substitutas, interoperabilidad, calidad y tiempo de recuperación, y no sólo por el número de países proveedores.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

4.4. Propuesta del IGPE-IA como marco analítico

El Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA), cuya representación gráfica se presenta en la Figura 5, se propone como marco analítico para evaluar, en investigaciones futuras, el potencial de un país, región o alianza para convertir activos geoambientales en capacidad estratégica relacionada a la IA. En este artículo, el término “índice” designa una arquitectura conceptual de dimensiones e indicadores candidatos. No hay puntuación, normalización, ponderación, agregación ni clasificación de países.

Figura 5. Arquitectura conceptual del Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA)



Fuente: elaboración de los autores (2026).

La lectura de la Figura 5 debe ser realizada de la izquierda a la derecha, acompañando el paso de la base geoambiental para la capacidad de conversión tecnoindustrial y, finalmente, para la soberanía y la resiliencia. El IGPE-IA traduce el mecanismo explicativo del MCGPT en una arquitectura diagnóstica constituida por tres pilares y ocho dimensiones. Su fundamentación combina la teoría multidimensional de la criticidad mineral, que relaciona riesgo de oferta, implicaciones ambientales y vulnerabilidad a las restricciones (Nassar; Du; Graedel, 2015), la teoría de las cadenas globales de valor, que explica como capacidades productivas y asimetrías de coordinación determinan la apropiación de valor (Gereffi; Humphrey; Sturgeon, 2005), y el enfoque de la soberanía digital, centrado en el control legítimo de tecnologías, datos e infraestructura (Floridi, 2020). Estos enfoques, sin embargo, permanecen fragmentados: ninguna de ellas, aisladamente, permite evaluar cómo los activos geoambientales pueden ser convertidos

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

en infraestructura de IA, ciberseguridad e influencia geopolítica. En el corpus documental analizado, esa es la laguna integradora específica llenada por el IGPE-IA.

El Pilar A — Base geoambiental responsable reúne dos dimensiones. La dimensión A1 — Potencial geoambiental y seguridad material considera reservas y recursos desagregados por elemento, producción efectiva, contenido, mineralogía, dependencia importadora y concentración de proveedores. Esta estructura proviene de la teoría de la criticidad mineral, según la cual la abundancia geológica no equivale automáticamente a la seguridad de abastecimiento, ya que la criticidad depende también de las sustituciones, de la concentración productiva y de la exposición geopolítica (Nassar; Du; Graedel, 2015; Gemechu *et al.*, 2016). La dimensión A2 — Sostenibilidad, licencia social y circularidad añade consumo de agua y energía, emisiones, desechos, materiales radiactivos de ocurrencia natural, trazabilidad, conflictos sociales, reciclaje y recuperación. Haque *et al.* (2014) y Edahbi, Plante y Benzaazoua (2019) demuestran que los impactos ambientales pueden comprometer la continuidad de los emprendimientos, mientras que Wang *et al.* (2024) evidencian el potencial de la economía circular para reducir desequilibrios de oferta. El avance original del IGPE-IA consiste en reunir dotación mineral, exposición externa, sostenibilidad ambiental, legitimidad social y circularidad en una única base analítica, evitando que grandes reservas sean interpretadas, aisladamente, como ventaja estratégica.

El Pilar B — Capacidad de conversión tecnoindustrial representa el núcleo de agregación de valor. La dimensión B1 — Separación, refino y metalización observa capacidad por elemento y grado de pureza, rendimiento, plantas operacionales y dependencia de reactivos y equipos, reconociendo que el procesamiento constituye uno de los principales puntos de estrangulamiento de la cadena (IEA, 2025, 2026; Demir *et al.*, 2026). La dimensión B2 — Agregación de valor y manufactura avanzada examina ligas, imanes, motores, sensores, complejidad de las exportaciones y contratos industriales, en consonancia con la teoría de las cadenas globales de valor de Gereffi, Humphrey y Sturgeon (2005). La dimensión B3 — Ciencia, innovación y competencias incorpora investigación y desarrollo, patentes, personal especializado, plantas piloto, metrología y cooperación universidad-industria, ya que la capacidad de aprender, adaptar y sustituir tecnologías condiciona el dominio de las etapas de mayor complejidad. La dimensión B4 — Infraestructura física, energética y digital de la IA contempla computación, centros de datos, energía, redes, refrigeración, semiconductores, logística y mantenimiento, reconociendo la materialidad de la IA destacada por Calderaro y Blumfelde (2022). La brecha llenada por el IGPE-IA está en analizar conjuntamente procesamiento mineral, manufactura, ciencia e infraestructura física de la IA, dimensiones normalmente estudiadas en campos separados.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

El Pilar C — Soberanía y resiliencia verifica si las capacidades anteriores pueden ser gobernadas, protegidas y mantenidas ante choques. La dimensión C1 — Gobernanza estratégica, ciberseguridad y datos incluye coordinación institucional, gestión de terceros, normas ISO y NIST, respuesta a incidentes, gobernanza de la IA, protección de datos y actuación efectiva del encargado/DPO. Esta dimensión es sustentada por la concepción de soberanía digital de Floridi (2020), por los estudios de Calderaro y Blumfelde (2022) sobre la insuficiencia de una soberanía exclusivamente regulatoria, por las aplicaciones de IA en auditorías de conformidad discutidas por Alves y Conceição (2025) y por la función de gobernanza del encargado presentada por Lima y Alves (2021). La dimensión C2 — Resiliencia geopolítica y opciones estratégicas examina concentración de proveedores, rutas alternativas, inventarios, alianzas, contratos, exposición a controles de exportación, tiempo de recuperación y pruebas de estrés, apoyándose en los estudios de Kalantzakos (2020) y Adekoya, Oliyide y Oduyemi (2023) sobre dependencia mineral y riesgo geopolítico. El diferencial del IGPE-IA es integrar seguridad mineral, capacidad industrial, gobernanza digital, protección de datos, ciberseguridad y resiliencia geopolítica en un mismo marco. En esta etapa, sin embargo, organiza constructos e indicadores candidatos, no produce puntuaciones, ponderaciones o rankings de países.

La distinción entre los dos artefactos es funcional. El MCGPT es explicativo: representa el mecanismo y los puntos de estrangulamiento. El IGPE-IA es diagnóstico: traduce los componentes del modelo en preguntas y variables observables. Uno investiga “cómo ocurre la conversión”; el otro prepara “lo que necesitará ser observado para evaluar el potencial de conversión”. Esa relación impide que el framework sea confundido con ranking y preserva la coherencia entre teoría y futura mensuración.

Delimitación epistemológica: el IGPE-IA no mide el poder actual de los países en esta investigación. Él organiza constructos, indicadores candidatos y fuentes potenciales. Cualquier puntuación futura dependerá de validez de contenido, disponibilidad y comparabilidad de los datos, método de ponderación, test de sensibilidad, análisis de incertidumbre y validación externa.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Tabla 9. Diferencias y complementaridades entre MCGPT y IGPE-IA

Criterio	MCGPT	IGPE-IA
Naturaleza	Modelo conceptual explicativo.	Framework analítico orientado a la futura operacionalización.
Pregunta	¿Cómo se convierten recursos en capacidad e influencia?	¿Qué dimensiones y evidencias permiten evaluar el potencial de conversión?
Estructura	Etapas, mecanismos, habilitadores y cuellos de botella.	Pilares, constructos, indicadores candidatos y fuentes.
Resultado en este artículo	Proposición teórica fundamentada.	Arquitectura conceptual sin puntuación o ranking.
Validación futura	Estudios de caso, process tracing y pruebas de relaciones.	Delphi, análisis factorial, ponderación, sensibilidad y validación comparativa.

Fuente: elaboración de los autores (2026).

4.4.1. Pilares, dimensiones e indicadores candidatos

Conforme a lo presentado anteriormente, el IGPE-IA está organizado en tres pilares y ocho dimensiones; no obstante, de modo más detallado, vale destacar la arquitectura conceptual del modelo, en que el Pilar A, Base geoambiental responsable, examina la calidad de la dotación y las condiciones ambientales de su movilización. El Pilar B, Capacidad de conversión tecnoindustrial, observa procesamiento, manufactura, ciencia e infraestructura de IA. El Pilar C, Soberanía y resiliencia, evalúa gobernanza, seguridad, diversificación y preparación para choques. La arquitectura evita premiar reservas que no se puedan transformar de manera sostenible y evita clasificar como soberana una infraestructura digital materialmente frágil.

Los indicadores se desglosarán siempre que sea técnicamente posible. Total de reservas de tierras raras puede ocultar la ausencia de Nd, Pr, Dy o Tb; capacidad de refino puede ocultar baja pureza o dependencia de equipos; número de centros de datos puede ocultar fragilidad energética; y existencia de legislación puede ocultar baja capacidad de implementación. La orientación es combinar medidas de stock, flujo, calidad, concentración, capacidad institucional y desempeño.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Tabla 10. Arquitectura conceptual del IGPE-IA

Pilar y dimensión	Constructo evaluado	Indicadores candidatos	Fuentes potenciales
A1. Potencial geoambiental y seguridad material	Base geológica utilizable y acceso a elementos relevantes.	Reservas/recursos por elemento; producción; contenido y mineralogía; dependencia importadora; concentración de proveedores; madurez de los levantamientos.	USGS; servicios geológicos; UN Comtrade; estadísticas nacionales.
A2. Sostenibilidad, licencia social y circularidad	Capacidad de producir con continuidad ambiental y social.	Intensidad hídrica/energética; emisiones; gestión de desechos y NORM; trazabilidad; conflictos; contenido reciclado; tasa de recuperación.	LCA; informes ambientales; EITI; agencias reguladoras; IEA.
B1. Separación, refino y metalización	Capacidad de producir materiales individualizados en especificación industrial.	Capacidad anual por elemento/pureza; rendimiento; plantas operativas; dependencia de reactivos/equipos; tiempo de expansión.	IEA; asociaciones industriales; ministerios; datos empresariales auditados.
B2. Agregación de valor y manufactura avanzada	Conversión en aleaciones, imanes, componentes y sistemas.	Capacidad de imanes; producción de motores/sensores; valor agregado doméstico; complejidad de las exportaciones; proveedores y contratos offtake.	UNIDO; OCDE TiVA; Comtrade; IEA; estadísticas industriales.
B3. Ciencia, innovación y competencias	Capacidad de aprender, adaptar, reemplazar y reciclar.	I+D; patentes de calidad; personal especializado; plantas piloto; metrología; colaboración universidad-industria; investigación en sustitución.	WIPO/PATSTAT; UNESCO; OCDE; bases científicas; agencias de innovación.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Pilar y dimensión	Constructo evaluado	Indicadores candidatos	Fuentes potenciales
B4. Infraestructura física, energética y digital de la IA	Capacidad de operar IA y automatización de forma estable.	Computación y centros de datos; energía confiable; red y refrigeración; semiconductores/equipos; logística; mantenimiento; intensidad carbónica.	IEA; ITU; Uptime Institute; reguladores de energía; estadísticas digitales.
C1. Gobernanza estratégica, ciberseguridad y datos	Capacidad de coordinar, auditar, proteger y legitimar sistemas.	Estrategias integradas; gestión de terceros; normas ISO/NIST; madurez de incidentes; gobernanza de la IA; protección de datos; encargado/DPO efectivo.	Leyes y estrategias; autoridades de ciberseguridad y protección de datos; auditorías; informes de madurez.
C2. Resiliencia geopolítica y opciones estratégicas	Capacidad de mantener operaciones durante choques y coerción.	HHI de proveedores; rutas alternativas; inventarios en días; alianzas/contratos; exposición a controles; tiempo de recuperación; pruebas de estrés.	IEA; Comtrade; CRMA; inventarios públicos; acuerdos internacionales.

Fuente: elaboración de los autores (2026). La lista es preliminar y no implica disponibilidad uniforme ni equivalencia entre las fuentes.

4.4.2 Reglas para su futura operacionalización

La futura transformación del marco en instrumento cuantitativo debe comenzar por la validación de contenido. Un panel multidisciplinario — geología, ingeniería mineral, medio ambiente, economía industrial, IA, ciberseguridad, protección de datos y relaciones internacionales— debe evaluar pertinencia, claridad y no redundancia de los indicadores. Las técnicas Delphi pueden apoyar consenso; sin embargo, la composición del panel y los conflictos de interés deben ser publicados.

La segunda etapa debe definir unidad, período y nivel de desagregación. Los países no son perfectamente comparables cuando las reservas tienen distintos grados de confianza, la capacidad nominal difiere de producción efectiva o los datos sobre imanes están protegidos por secreto comercial. Se recomienda distinguir capacidad instalada, producción real, calidad y dependencia externa, así como utilizar series temporales para evitar retratos de un solo año.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

La tercera etapa será la normalización. Indicadores de beneficio y de riesgo exigen direcciones opuestas; distribuciones asimétricas pueden demandar transformación logarítmica; y valores extremos no deben dominar los resultados. La normalización min-max es simple, pero sensible a extremos; puntajes z presuponen comparabilidad estadística; los métodos por distancia a la referencia exigen benchmarks justificables. El método elegido debe ser probado en escenarios alternativos.

La cuarta etapa será la ponderación. Pesos iguales son transparentes, pero implican juicio de equivalencia. AHP o Delphi hacen el juicio explícito, pero pueden reproducir sesgos de especialistas. Métodos estadísticos o por entropía dependen de la estructura de los datos y no representan necesariamente importancia normativa. La recomendación es publicar resultados con más de un esquema y relatar estabilidad de posiciones, en lugar de tratar un peso como verdad objetiva.

La quinta etapa será la agregación. Una suma compensatoria permitiría que una excelente dotación geológica oculte una deficiencia crítica de ciberseguridad o refino, contrariando la lógica de cuello de botella del MCGPT. Por lo tanto, las investigaciones futuras deben comparar la agregación aditiva con medias geométricas, reglas no compensatorias o umbrales mínimos por pilar. La elección debe reflejar la hipótesis teórica y ser acompañada de análisis de sensibilidad e incertidumbre.

La sexta etapa será la validación externa. El índice operacionalizado debe confrontarse con resultados observables, como duración de interrupciones, capacidad de sustituir a proveedores, participación downstream, complejidad exportadora, tiempo de recuperación y continuidad de infraestructuras críticas. Estudios longitudinales, estudios de caso y process tracing serán necesarios antes de cualquier interpretación causal.

Tabla 11. Protocolo recomendado para validación futura del IGPE-IA

Paso	Decisión metodológica	Prueba mínima de calidad
1. Validez de contenido	Revisar dimensiones e indicadores con panel multidisciplinar.	Índice de validez de contenido; justificación de inclusión y exclusiones.
2. Base de datos	Establecer unidad, período, desagregación y reglas para datos ausentes.	Diccionario de datos; procedencia; comparabilidad y cobertura temporal.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

Paso	Decisión metodológica	Prueba mínima de calidad
3. Normalización	Convertir escalas sin borrar dirección e incertidumbre.	Comparar métodos; examinar extremos y distribuciones.
4. Ponderación	Elegir pesos coherentes con teoría y uso.	Escenarios con pesos iguales, periciales y/o empíricos.
5. Agregación	Decidir grado de compensación entre dimensiones.	Comparar suma, media geométrica y umbrales; análisis de sensibilidad.
6. Validación externa	Relacionar puntajes con resultados estratégicos observables.	Convergencia, validez predictiva, estudios de caso y robustez longitudinal.

Fuente: elaboración de los autores (2026).

4.5. Discusión del IGPE-IA a la luz de los modelos de criticidad

La arquitectura del IGPE-IA hereda de los modelos de criticidad la idea de que riesgo e importancia son multidimensionales. Nassar, Du y Graedel (2015) organizan riesgo de oferta, implicaciones ambientales y vulnerabilidad a la restricción; Kosajan, Wen y Wang (2025) actualizan la evaluación y demuestran la necesidad de diferenciar elementos. Gemechu *et al.* (2016) incorporan exposición importadora y riesgo geopolítico. El IGPE-IA no sustituye esos enfoques: los utiliza como base y añade capacidades de procesamiento, manufactura, ciencia, infraestructura de IA, gobernanza y seguridad.

Esa ampliación cambia la pregunta. Un índice de criticidad de materiales busca identificar cuán crítica es una materia prima para una economía o tecnología. El IGPE-IA busca organizar el potencial de conversión de una unidad territorial. El primero puede concluir que determinado elemento presenta alto riesgo; el segundo debe examinar si la unidad posee acceso, capacidad de procesamiento, industria, competencias, resiliencia y gobernanza para responder a ese riesgo. Las dos perspectivas son complementarias, pero no intercambiables.

El marco también incorpora benchmarks de política sin transformarlos automáticamente en pesos. El Critical Raw Materials Act de la Unión Europea establece, para 2030, referencias de 10% de capacidad extractiva, 40% de procesamiento, 25% de reciclaje y máximo del 65% de la demanda anual de un solo tercer país (Unión Europea, 2024). Esos valores demuestran la naturaleza sistémica de la seguridad de suministro y pueden servir de referencia para escenarios; sin embargo, no deben ser universalizados sin considerar geología, escala económica y estrategia de cada unidad analizada.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

La principal contribución del IGPE-IA es impedir diagnósticos unidimensionales. Reservas sin refino indican potencial bloqueado; refino sin gestión ambiental indica capacidad frágil; centros de datos sin energía confiable indican infraestructura nominal; legislación sin implementación indica gobernanza formal; y diversificación sin capacidad tecnológica de los proveedores solo puede redistribuir costos. El marco transforma estas deficiencias en hipótesis observables para investigación comparativa.

4.6. Vínculo con la ciberseguridad y la protección de datos personales

El vínculo con ciberseguridad ocurre en el paso entre capacidad tecnológica y soberanía. Cadenas de tierras raras e infraestructura de IA son sistemas ciberfísicos: sensores, automatización industrial, control de procesos, proveedores digitales y centros de datos interactúan con activos materiales. Un incidente cibernético puede comprometer disponibilidad, integridad de parámetros, propiedad intelectual, continuidad de la producción o confianza en los datos de trazabilidad. En sentido inverso, dependencia de componentes y mantenimiento externo puede dificultar la recuperación y ampliar la superficie de riesgo. Por lo tanto, la dimensión C1 del IGPE-IA evalúa la seguridad de los proveedores, la gestión de terceros, la respuesta a incidentes y la capacidad de auditoría.

La protección de datos personales es un recorte específico de esa gobernanza. Sistemas de IA aplicados a la minería, logística, relaciones laborales, seguridad y servicios públicos pueden tratar datos de trabajadores, comunidades, proveedores y usuarios. Lima y Alves (2021), al analizar los encargados de protección de datos exigidos por la LGPD, sitúan el DPO/encargado como función de gobernanza e interlocución para orientar la conformidad y la rendición de cuentas. En el IGPE-IA, la existencia formal de ese papel no basta: deben ser observadas su independencia funcional, integración a la gestión de riesgos, privacidad desde la concepción, evaluación de impacto, canales con titulares, auditabilidad y capacidad de respuesta.

La operacionalización de esa gobernanza también depende de prácticas concretas de recolección y concientización. Silva (2025) demuestra que los formularios e interfaces digitales deben ser estructurados según finalidad, transparencia y respeto a los derechos de los titulares, mientras que Alves *et al.* (2025) evidencian el potencial de la gamificación como estrategia de concientización organizacional en privacidad. Estas prácticas complementan la función de gobernanza del encargado descrito por Lima y Alves (2021) y refuerzan el componente humano de la resiliencia digital.

Ese vínculo permanece proporcional al objeto del artículo. El MCGPT no reduce geopolítica mineral a la protección de datos, ni afirma que el encargado responda aisladamente

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

por la ciberseguridad. La proposición es más precisa: cuando los recursos geoambientales se convierten en sistemas digitales y de IA, su uso estratégico sostenible depende también de la gobernanza de la información, protección de datos, explicabilidad, seguridad y supervisión humana. Sin estos elementos, autonomía material puede coexistir con dependencia o vulnerabilidad digital.

4.7. Síntesis de la discusión y evaluación de las proposiciones

Los resultados sustentan, en términos teórico-documentales, la hipótesis principal: el poder asociado a las tierras raras depende de capacidad integrada de conversión, y no exclusivamente de reservas o extracción. La hipótesis no fue comprobada econométricamente; por lo tanto, el verbo “sustentar” significa que la triangulación no la refutó y proporcionó mecanismos y evidencias compatibles.

La proposición P1 recibió soporte consistente. La concentración crece de 60% en la minería para 91% en el refino y 94% en los imanes de tierras raras magnéticas, mientras que la literatura sobre upgrading identifica mayor competencia downstream. La proposición P2 también es compatible con las evidencias de costos ambientales, pasivos, licencias y ganancias potenciales de reciclaje. La proposición P3 fue refinada: soberanía en la era de la IA exige seguridad material, industrial, científica, energética, digital, cibernética y regulatoria, pero puede ser construida por capacidades domésticas y por interdependencias diversificadas y confiables.

El avance resultante es doble. El MCGPT explica la transformación en términos de secuencia, habilitadores, cuellos de botella y retroalimentación. El IGPE-IA convierte esa explicación en una agenda de observación y futura mensuración, manteniendo la frontera entre modelo conceptual e índice validado. Esta separación preserva el rigor del artículo y ofrece dos objetos reutilizables por otros investigadores.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Esta investigación analizó de qué manera la capacidad de convertir tierras raras, comprendidas como activos geoambientales, en infraestructura industrial y tecnológica influencia soberanía, ciberseguridad y poder geopolítico en la era de la Inteligencia Artificial. La respuesta construida es que el recurso natural adquiere valor estratégico por medio de una cadena de conversión. Las reservas constituyen un potencial; la extracción sostenible vuelve movilizable ese potencial; la separación y el refino producen materiales funcionales; manufactura y ciencia agregan conocimiento; infraestructura de IA convierte componentes en capacidad operativa; y gobernanza, seguridad y resiliencia tornan esa capacidad políticamente confiable.

Los datos documentales refuerzan esa interpretación. En 2025, China respondió por aproximadamente el 69,2% de la producción mundial de tierras raras. Para los elementos magnéticos, su participación en 2024 pasó de 60% en la minería para 91% en el refino y 94% en los imanes sinterizados. La diferencia muestra que el principal locus de ventaja no es sólo el subsuelo, sino el ecosistema de conversión. El contraste entre grandes reservas y baja producción en economías como Brasil demuestra, de forma descriptiva, que dotación geológica y capacidad estratégica son categorías distintas (USGS, 2026; IEA, 2026).

La primera contribución original es el MCGPT, que integra base geoambiental, sostenibilidad, procesamiento, agregación industrial, ciencia, infraestructura de IA, gobernanza, seguridad y resultado geopolítico. La segunda es el IGPE-IA, presentado con la cautela requerida: un marco conceptual para futura evaluación del potencial estratégico, no un instrumento que ya mide o clasifica países. Su arquitectura podrá orientar investigaciones cuantitativas, siempre que los indicadores sean validados, desglosados por elemento, normalizados, ponderados, sometidos al análisis de sensibilidad y comparados con resultados observables.

Las conclusiones también recalifican la sostenibilidad. Gestión de desechos, agua, energía, materiales radiactivos, licencia, participación social, trazabilidad y circularidad no son dimensiones periféricas. Condicionan la continuidad, la financiación, la legitimidad y capacidad de adaptación. El reciclaje no elimina la extracción primaria en el horizonte inmediato, pero puede reducir la exposición, ampliar la oferta secundaria y crear competencias industriales donde el inventario de productos en uso es elevado.

El vínculo final con ciberseguridad y protección de datos amplía la noción de soberanía. Infraestructuras de IA son ciberfísicas y dependen de proveedores, datos, redes y personas. La protección de la confidencialidad, integridad, disponibilidad y recuperabilidad precisa acompañar

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

la seguridad material. La función de gobernanza del encargado/DPO discutida por Lima y Alves (2021) ofrece un puente institucional para la rendición de cuentas en el tratamiento de datos personales, aunque no sustituya la gestión técnica de ciberseguridad ni la gobernanza amplia de la IA.

5.1. Hallazgos y proposiciones autorales derivados de la investigación

Para favorecer la acumulación científica, los principales conocimientos son formulados abajo como proposiciones teórico-interpretativas. Sintetizan los resultados de esta investigación y pueden ser citadas, criticadas y comprobadas por investigaciones posteriores; no son presentadas como leyes universales ni como relaciones causalmente estimadas.

Insight 1 – La ventaja geopolítica de las tierras raras depende menos de la magnitud aislada de la reserva que de la densidad de las capacidades instaladas entre el depósito mineral y la tecnología final.

Insight 2 – En cadenas intensivas en conocimiento, el control del cuello de botella downstream puede producir mayor influencia estratégica que la abundancia upstream.

Insight 3 – La sostenibilidad socioambiental funciona como infraestructura de continuidad productiva: prácticas insostenibles pueden generar capacidad aparente en el corto plazo y fragilidad estratégica a largo plazo.

Insight 4 – La soberanía en Inteligencia Artificial es parcialmente mineral, industrial, energética, digital, cibernética y regulatoria; no puede ser inferida solamente por el desempeño de modelos o por el volumen de computación.

Insight 5 – La conversión geoambiental tiene lógica de eslabón limitante: una deficiencia crítica en separación, manufactura, energía, competencias o gobernanza puede restringir el valor de capacidades abundantes en las demás etapas.

Insight 6 – Diversificar minas sin diversificar refino, metalización, equipamiento e imán desplaza la dependencia geográfica, pero no elimina la dependencia tecnoindustrial.

Insight 7 – Protección de datos, auditabilidad y ciberresiliencia constituyen la capa de confianza que convierte infraestructura digital en autonomía sostenible.

Insight 8 – Un índice sobre potencial estratégico debe diagnosticar capacidades y vulnerabilidades antes de ordenar países; rankings anteriores a la validación pueden transformar incertidumbre metodológica en falsa precisión.

En conjunto, estas proposiciones permiten que el artículo sea utilizado como base para estudios sobre países ricos en recursos, potencias industriales, alianzas de suministro, corredores minerales y políticas de IA. La hipótesis general sugerida para la prueba es que la

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

interacción entre capacidades de conversión explica mejor resultados de autonomía e influencia que cualquier indicador aislado de reserva, producción o inversión.

5.2. Implicaciones científicas y prácticas

Científicamente, el MCGPT ofrece un lenguaje común para conectar geociencias, ecología industrial, cadenas globales de valor, estudios de IA, ciberseguridad y relaciones internacionales. El IGPE-IA ofrece un puente entre teoría e investigación empírica. Ambos pueden aplicarse comparativamente, pero la elección de la unidad de análisis debe reconocer que cadenas reales atraviesan fronteras y que alianzas pueden internalizar capacidades que ningún país posee aisladamente.

Para gobiernos, el modelo orienta diagnósticos de cuellos de botella y evita políticas centradas exclusivamente en licencias mineras. Estrategias coherentes necesitan articular conocimiento geológico, patrones ambientales, procesamiento, energía, formación, demanda industrial, financiación, contratos, reciclaje, seguridad de proveedores y cooperación internacional. Los benchmarks del CRMA europeo ilustran este enfoque de cadena completa, aunque requieren adaptación contextual.

Para empresas e inversores, la principal implicación es que la viabilidad de proyectos depende de ecosistema: equipos, competencias, compradores, coproductos, requisitos de pureza, trazabilidad y riesgo regulatorio. Para instituciones científicas, el marco identifica agendas de separación verde, materiales alternativos, recuperación de residuos, metrología, ciberseguridad industrial y gobernanza de datos.

5.3. Limitaciones y agenda de investigación futura

La primera limitación proviene del diseño documental y cualitativo. Las evidencias fueron producidas por métodos, años y unidades diferentes; por eso, la investigación identifica mecanismos plausibles, pero no estima efectos causales. La segunda es la asimetría de datos. La información sobre refino, pureza, metalización, imanes, inventarios, equipamiento y contratos es frecuentemente incompleta o de carácter comercial. La tercera es el ritmo de cambio: controles de exportación, proyectos y capacidades pueden alterarse rápidamente.

La cuarta limitación es material. Tierras raras constituyen sólo una parte de la infraestructura de la IA, que también depende de cobre, silicio, galio, germanio, litio, níquel, grafito y otros materiales. El MCGPT puede extenderse, pero la inclusión indiscriminada de minerales requerirá módulos específicos para evitar la pérdida de precisión. La quinta limitación

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

es institucional: soberanía y poder no son resultados automáticos de capacidad productiva; dependen de decisiones políticas, alianzas, legitimidad y contexto.

La agenda futura debe seguir cuatro líneas. Primero, validar cualitativamente el MCGPT por estudios de caso contrastantes y process tracing, incluyendo China, Brasil, Australia, Estados Unidos, Unión Europea y alianzas mineroindustriales. Segundo, someter las dimensiones del IGPE-IA a Delphi y análisis de validez de contenido. Tercero, construir base longitudinal desagregada por elemento y etapa de la cadena, con análisis de incertidumbre y múltiples esquemas de ponderación. Cuarto, probar si puntajes de conversión predicen resultados como participación downstream, complejidad exportadora, continuidad delante de choques y tiempo de recuperación.

Se concluye que las tierras raras son activos geoambientales estratégicos porque articulan naturaleza, tecnología, territorio, medio ambiente y poder. La ventaja competitiva depende de la agregación de valor a lo largo de la cadena; el MCGPT explica teóricamente esa transformación; y el IGPE-IA ofrece una base conceptual para que futuras investigaciones cuantitativas la operacionalicen. El siguiente paso no es producir un ranking prematuro, sino validar constructos, construir datos comparables y probar, con transparencia, en qué condiciones recursos naturales se convierten en soberanía tecnológica e influencia geopolítica.

REFERENCIAS

ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M. A geopolítica da Inteligência Artificial: da atenção pública via Google Trends à produção acadêmica estimada pelo Google Scholar. *Revista Científica SOL21 - Standard Open Literature*, v. 2, n. 1, 2026. DOI: 10.67553/sol21.v2i1.29. Disponível em: https://doi.org/10.67553/sol21.v2i1.29. Acesso em: 28 ago. 2026.

ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M. O impacto da Inteligência Artificial na automação de auditorias em conformidade com as leis de proteção de dados. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 6, n. 1, e616167, 2025. DOI: 10.47820/recima21.v6i1.6167.

ALVES, D. S.; LIMA, L. A. de; PEREIRA, P. E. de O.; HELLER, J.; CONCEIÇÃO, M. M. A gamificação aplicada às leis de proteção de dados: uma estratégia de conscientização para promover a privacidade nas empresas. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 6, n. 2, e626253, 2025. DOI: 10.47820/recima21.v6i2.6253. Disponível em: https://doi.org/10.47820/recima21.v6i2.6253. Acesso em: 28 ago. 2026.

BALARAM, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geoscience Frontiers, v. 10, n. 4, p. 1285–1303, 2019. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.

BOWEN, G. A. Document analysis as a qualitative research method. Qualitative Research Journal, v. 9, n. 2, p. 27–40, 2009. DOI: 10.3316/QRJ0902027.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

BRIDGE, G. Material worlds: Natural resources, resource geography and the material economy. Geography Compass, v. 3, n. 3, p. 1217–1244, 2009. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2009.00233.x.

CALDERARO, A.; BLUMFELDE, S. Artificial intelligence and EU security: the false promise of digital sovereignty. European Security, v. 31, n. 3, p. 415–434, 2022. DOI: 10.1080/09662839.2022.2101885. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09662839.2022.2101885. Acesso em: 24 jul. 2026.

CARMO, W. J. do; FIGUEREDO, I. M. R. ChatGPT como ferramenta educacional: vantagens e desvantagens para a formação de futuros profissionais de Administração. Revista Científica SOL21 - Standard Open Literature, v. 1, n. 1, e1113, 2025. DOI: 10.47820/sol21.v1i1.13. Disponível em: https://doi.org/10.47820/sol21.v1i1.13. Acesso em: 28 ago. 2026.

CLARKE, V.; BRAUN, V. Thematic analysis. The Journal of Positive Psychology, v. 12, n. 3, p. 297–298, 2017. DOI: 10.1080/17439760.2016.1262613.

CORREIA, U. A.; SOUZA, A. M. de; SANTANA, J. A.; ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M.; SILVA, M. S. Protocolo de padronização da governança de Inteligência Artificial com base em normas e regulamentações internacionais: revisão de literatura. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 7, n. 6, e768273, 2026. DOI: 10.47820/recima21.v7i6.8273. Disponível em: https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8273. Acesso em: 28 ago. 2026.

DEMIR, I. *et al.* Rare earth elements in the global economy: Usage, recovery, and the quest for supply security – A review. Mining, Metallurgy & Exploration, v. 43, p. 2061–2092, 2026. DOI: 10.1007/s42461-026-01559-3.

DIAO, H.; YANG, H.; TAN, T.; REN, G.; YOU, M.; WU, L.; YANG, M.; BAI, Y.; XIA, S.; SONG, S.; QUINTANA, M.; LIU, L.; XUE, Q. Navigating the rare earth elements landscape: Challenges, innovations, and sustainability. Minerals Engineering, v. 216, art. 108889, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108889.

DIXON-WOODS, M. Using framework-based synthesis for conducting reviews of qualitative studies. BMC Medicine, v. 9, art. 39, 2011. DOI: 10.1186/1741-7015-9-39.

EDAHBI, M.; PLANTE, B.; BENZAAZOUA, M. Environmental challenges and identification of the knowledge gaps associated with REE mine wastes management. Journal of Cleaner Production, v. 212, p. 1232–1241, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.228.

FAN, J. H.; OMURA, A.; ROCA, E. Geopolitics and rare earth metals. European Journal of Political Economy, v. 78, art. 102356, 2023. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2022.102356.

FLORIDI, L. The fight for digital sovereignty: what it is, and why it matters, especially for the EU. Philosophy & Technology, v. 33, n. 3, p. 369–378, 2020. DOI: 10.1007/s13347-020-00423-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13347-020-00423-6. Acesso em: 24 jul. 2026.

GEMECHU, E. D.; HELBIG, C.; SONNEMANN, G.; THORENZ, A.; TUMA, A. Import-based indicator for the geopolitical supply risk of raw materials in life cycle sustainability assessments. Journal of Industrial Ecology, v. 20, n. 1, p. 154–165, 2016. DOI: 10.1111/jiec.12279.

GEREFFI, G.; HUMPHREY, J.; STURGEON, T. The governance of global value chains. Review of International Political Economy, v. 12, n. 1, p. 78–104, 2005. DOI: 10.1080/09692290500049805. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09692290500049805. Acesso em: 24 jul. 2026.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

HAN, Y.-H.; CUI, X.-W.; ZHANG, Y.; ZHANG, H.; CHEN, Z. Environmental impacts of rare earth elements mining and strategies for sustainable management: A comprehensive review. Journal of Hazardous Materials, v. 500, art. 140400, 2025. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140400.

HAQUE, N.; HUGHES, A.; LIM, S.; VERNON, C. Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. Resources, v. 3, n. 4, p. 614–635, 2014. DOI: 10.3390/resources3040614. Disponível em: https://doi.org/10.3390/resources3040614. Acesso em: 24 jul. 2026.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR CERTIFICATION IN TECHNOLOGY (IICTEC). Global public attention to the geopolitics of Artificial Intelligence: evidence from Google Trends. IICTEC Research Report No. 001/2026. [S. l.]: IICTEC, 2026. Disponível em: https://iictec.org/document_library. Acesso em: 28 ago. 2026.

INTERNATIONAL COMMITTEE OF MEDICAL JOURNAL EDITORS. Use of Artificial Intelligence in publishing. In: Recommendations for the conduct, reporting, editing, and publication of scholarly work in medical journals. [S. l.]: ICMJE, 2026. Disponível em: https://www.icmje.org/recommendations/browse/artificial-intelligence/. Acesso em: 28 ago. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: IEA, 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Rare Earth Elements: Pathways to secure and diversified supply chains. Paris: IEA, 2026.

KALANTZAKOS, S. The race for critical minerals in an era of geopolitical realignments. The International Spectator, v. 55, n. 3, p. 1–16, 2020. DOI: 10.1080/03932729.2020.1786926. Disponível em: https://doi.org/10.1080/03932729.2020.1786926. Acesso em: 24 jul. 2026.

KLARE, M. T. The Race for What's Left: The Global Scramble for the World's Last Resources. New York: Metropolitan Books, 2012.

KOSAJAN, V.; WEN, Z.; WANG, X. Criticality assessment and management policy analysis of rare earth elements. Journal of Industrial Ecology, v. 29, n. 1, p. 344–357, 2025. DOI: 10.1111/jiec.13601.

KUMAR, S.; MALLIPEDDI, R. R. Impact of cybersecurity on operations and supply chain management: Emerging trends and future research directions. Production and Operations Management, v. 31, n. 12, p. 4488–4500, 2022. DOI: 10.1111/poms.13859.

LEE, J. C. K.; WEN, Z. Pathways for greening the supply of rare earth elements in China. Nature Sustainability, v. 1, n. 10, p. 598–605, 2018. DOI: 10.1038/s41893-018-0154-5.

LIM, W. M. What is qualitative research? An overview and guidelines. Australasian Marketing Journal, v. 33, p. 199–229, 2024.

LIMA, A.; ALVES, D. Encarregados-Data Protection Officer-DPOs exigidos pela LGPD-Lei Geral de Proteção de Dados. São Paulo: Haikai Editora, 2021.

LIU, C.; ZHOU, F.; JIANG, J.; WEN, H. Sustainable governance of the global rare earth industry chains: perspectives of geopolitical cooperation and conflict. Sustainability, v. 17, n. 11, art. 4881, 2025. DOI: 10.3390/su17114881. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17114881. Acesso em: 24 jul. 2026.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

MIAO, F.; HOLMES, W. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693. Acesso em: 28 ago. 2026.

MORGAN, H. Conducting a qualitative document analysis. The Qualitative Report, v. 27, n. 1, p. 64–77, 2022. DOI: 10.46743/2160-3715/2022.5044.

NASSAR, N. T.; DU, X.; GRAEDEL, T. E. Criticality of the rare earth elements. Journal of Industrial Ecology, v. 19, n. 6, p. 1044–1054, 2015. DOI: 10.1111/jiec.12237. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jiec.12237. Acesso em: 24 jul. 2026.

SANTANA, J. A. Fake news: técnicas de investigação por Inteligência Artificial. [S. l.: s. n.], 2026. ISBN 978-65-018544-3-4. Disponível em: https://www.amazon.com.br/dp/6501854431. Acesso em: 28 ago. 2026.

SANTANA, J. A.; SOUZA, A. M.; SILVA, M. S.; ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M. A evolução da Inteligência Artificial Explicável (IAE). RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 7, n. 3, e737438, 2026. DOI: 10.47820/recima21.v7i3.7438.

SILVA, M. S. Economia da atenção e transformação do comportamento do consumidor na era dos conteúdos digitais de curta duração: uma análise de estado da arte. Revista Científica SOL21 - Standard Open Literature, v. 2, n. 1, 2026. DOI: 10.67553/sol21.v2i1.27. Disponível em: https://doi.org/10.67553/sol21.v2i1.27. Acesso em: 28 ago. 2026.

SILVA, M. S. Marketing digital (LGPD) & formulários: realizando a coleta respeitando a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), Lei 13.709/2018. 1. ed. [S. l.]: Clube de Autores, 2025. ISBN 978-65-016537-4-7.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 104, p. 333–339, 2019. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

STACCIARINI, J. H. S.; GONÇALVES, R. J. A. F. Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica: as bases da Inteligência Artificial. Sociedade & Natureza, v. 37, n. 1, e77215, 2025. DOI: 10.14393/SN-v37-2025-77215.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2026. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026. DOI: 10.3133/mcs2026.

UNIÓN EUROPEA. Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de abril de 2024, por el que se establece un marco para garantizar un suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales. Diario Oficial de la Unión Europea, 2024.

VALDIVIA, A. The supply chain capitalism of AI: A call to (re)think algorithmic harms and resistance through environmental lens. Information, Communication & Society, v. 28, p. 2118–2134, 2024. DOI: 10.1080/1369118X.2024.2420021.

WANG, P.; YANG, Y.-Y.; HEIDRICH, O.; CHEN, L.-Y.; CHEN, L.-H.; FISHMAN, T.; CHEN, W. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies. Nature Geoscience, v. 17, p. 94–102, 2024. DOI: 10.1038/s41561-023-01350-9.

YERGIN, D. The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. New York: Simon & Schuster, 1991.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.

ZHANG, H.; WANG, X.; TANG, J.; GUO, Y. The impact of international rare earth trade competition on global value chain upgrading from the industrial chain perspective. Ecological Economics, v. 198, art. 107472, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107472.

ZHAO, Y.; CHENG, J.; XU, D. Geopolitical shocks and the restructuring of the rare earth supply chain: Case of US-China decoupling. Sustainability, v. 18, n. 11, art. 5329, 2026. DOI: 10.3390/su18115329.

ZIELINSKI, C. *et al.* Chatbots, generative AI, and scholarly manuscripts: WAME recommendations on chatbots and generative Artificial Intelligence in relation to scholarly publications. Colombia Médica, v. 54, n. 3, e1015868, 2023. DOI: 10.25100/cm.v54i3.5868. Disponível em: https://doi.org/10.25100/cm.v54i3.5868. Acesso em: 28 ago. 2026.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y a la fuente.