Universitat Autònoma de Barcelona

Facultat d'Economia i Empresa UAB

Trabajo de Final de Grado

Facultad de Economía y Empresa

TÍTULO: *La economía de la transición energética: Escasez de minerales críticos, dependencia geopolítica y límites del crecimiento verde.*

AUTOR/A: *Laida Batis Egibar*

TUTOR/A: *Xavier Cusso Segura*

GRADO: *Empresa y Tecnología*

FECHA: *26/05/2026*

Universitat Autònoma de Barcelona

Facultat d'Economia i Empresa UAB

Treball de Final de Grau

Facultat d'Economia i Empresa

TÍTOL: *L'economia de la transició energètica: Escassetat de minerals crítics, dependència geopolítica i límits del creixement verd.*

AUTOR/A: *Laida Batis Egibar*

TUTOR/A: *Xavier Cusso Segura*

GRAU: *Empresa i Tecnologia*

DATA: *26/05/2026*

Universitat Autònoma de Barcelona

Facultat d'Economia i Empresa UAB

Bachelor's Thesis

Faculty of Economics and Business

TITLE: *The Economics of the Energy Transition: Scarcity of Critical Minerals, Geopolitical Dependence and the Limits of Green Growth.*

AUTHOR: *Laida Batis Egibar*

SUPERVISOR: *Xavier Cusso Segura*

DEGREE: *Business and Technology*

DATE: *26/05/2026*

Resumen

Este trabajo analiza si la escasez de minerales críticos, como el litio, cobalto o las tierras raras, y los riesgos geopolíticos que su cadena de suministro conllevan son un obstáculo económico para la transición energética global. A través de este análisis, se examina la brecha entre una demanda mineral altamente impulsada por mandatos climáticos y una oferta minera estructuralmente inelástica, cuyas consecuencias incluyen la volatilidad de los precios y la inflación verde (*Greenflation*). Desde una perspectiva geopolítica, se identifica el refinado y procesamiento de dichos minerales como la etapa crítica de la cadena de valor, dominada casi absolutamente por China. Finalmente, se evalúan las principales vías de mitigación disponibles actualmente: innovación en química de baterías, economía circular y marcos regulatorios como la *Critical Raw Materials Act* europea. El trabajo concluye que estos métodos pueden llegar a disminuir, pero no eliminar, el riesgo de escasez mineral antes de 2030, confirmando que dicha escasez encarecerá y ralentizará la transición energética.

Palabras clave: **minerales críticos, transición energética, inflación verde, geopolítica de los recursos, cadenas de valor globales, economía circular, política industrial de soberanía.**

Resum

Aquest treball analitza si l'escassetat de minerals crítics, com el liti, el cobalt o les terres rares, i els riscos geopolítics que comporta la seva cadena de subministrament constitueixen un obstacle econòmic per a la transició energètica global. A través d'aquesta anàlisi, s'examina la bretxa entre una demanda mineral fortament impulsada per mandats climàtics i una oferta minera estructuralment inelàstica, les conseqüències de la qual inclouen la volatilitat dels preus i la inflació verda (*Greenflation*). Des d'una perspectiva geopolítica, es identifica el refinat i processament d'aquests minerals com l'etapa crítica de la cadena de valor, dominada gairebé absolutament per la Xina. Finalment, s'avaluen les principals vies de mitigació disponibles actualment: innovació en química de bateries, economia circular i marcs regulatoris com la Critical Raw Materials Act europea. El treball conclou que aquests mètodes poden arribar a disminuir, però no eliminar, el risc d'escassetat mineral abans del 2030, confirmant que aquesta escassetat encarirà i alentirà la transició energètica.

Paraules clau: **minerals crítics, transició energètica, inflació verda, geopolítica dels recursos, cadenes de valor globals, economia circular, política industrial de sobirania.**

Abstract

This paper analyses whether the scarcity of critical minerals, such as lithium, cobalt and rare earth elements, and the geopolitical risks associated with their supply chain constitute an economic obstacle to the global energy transition. Through this analysis, the gap is examined between a mineral demand heavily driven by climate mandates and a structurally inelastic mining supply, the consequences of which include price volatility and green inflation (*Greenflation*). From a geopolitical perspective, the refining and processing of these minerals is identified as the critical stage of the value chain, almost entirely dominated by China. Finally, the main mitigation strategies currently available are assessed: innovation in battery chemistry, circular economy, and regulatory frameworks such as the European Critical Raw Materials Act. The paper concludes that these approaches may reduce, but not eliminate, the risk of mineral scarcity before 2030, confirming that such scarcity will increase the costs and slow the pace of the energy transition.

Key words: **critical minerals, energy transition, green inflation, resource geopolitics, global value chains, circular economy, industrial sovereignty policy.**

Índice

AGRADECIMIENTOS....8
1. Introducción....9
1.1. Justificación y Objetivos....9
1.2. Metodología y Fuentes de Datos....10
2.1. La Economía del Cambio Climático: Externalidades, Costes de Transición y la "Mineralización" de la Economía....11
2.2. Definición y Caracterización de los Minerales Críticos: Litio, Cobalto y Tierras Raras como Activos Estratégicos del Siglo XXI....12
3. Análisis del Mercado: Oferta, Demanda y Precios....14
3.1. La Revolución de la Demanda: El Vehículo Eléctrico y las Energías Renovables....14
3.2. La Rigidez de la Oferta Minera: Plazos de Inversión, Costes y Cuellos de Botella Estructurales....17
3.3. La Formación de Precios: Volatilidad Estructural en Mercados con Oferta Inelástica...19
3.4. Impacto Macroeconómico: La Greenflation y los Límites Económicos de la Transición....20
4. La Geopolítica de los Recursos: La Nueva Dependencia Estratégica....22
4.1. La Cadena de Valor Global: La Asimetría Estructural entre Extracción y Refinamiento....22
4.2. La Estrategia Industrial China: Dominio del Procesamiento y su Instrumentalización Geopolítica....23
4.3. Riesgos para Europa y Occidente: Respuestas de Política y Límites de la Soberanía Industrial....25
5. Vías de Mitigación: Innovación, Economía Circular y Marco Regulatorio....27
5.1. Innovación en la Química de Materiales: Reducción de la Dependencia Mineral....27
5.2. Economía Circular y Minería Urbana: La Oferta Secundaria como Vector de Soberanía....29
5.3. Marco Regulatorio: La Critical Raw Materials Act como Política Industrial de Soberanía....31
6. Conclusiones....34
7. Bibliografía....36

Índice de Figuras

Figura 1. Minerales utilizados en coches eléctricos frente a coches convencionales....15
Figura 2. Crecimiento de la demanda de minerales seleccionados por escenario (2040 respecto a 2020)....16

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que han contribuido, de una forma u otra, a que haya podido llevar a cabo este trabajo.

En primer lugar, a mi tutor, Xavier Cusso, por su tiempo, sus consejos y por guiarme durante todo el proceso. También me gustaría agradecer a la Universidad y a su equipo docente por la formación académica recibida a lo largo de estos años.

A mis compañeras de clase, por todo el trabajo en equipo y por hacer esta etapa mucho más fácil y valiosa.

Finalmente, a mi familia, por su paciencia y apoyo incondicional.

1. Introducción

El cambio climático es la perturbación más importante que ha experimentado el sistema económico global en el siglo XXI. La respuesta institucional a esta crisis, en forma de los Acuerdos de París (2015) y de los compromisos de neutralidad climática asumidos por la Unión Europea, China y Estados Unidos para mediados de siglo, ha hecho posible una transición energética de escala y rapidez sin precedentes en la historia de la industria moderna. Sin embargo, la ambición inicial de los gobiernos con estos compromisos ha ido relajándose a medida que ha pasado el tiempo, y tanto la Unión Europea como Estados Unidos han flexibilizado recientemente algunos de sus plazos intermedios de descarbonización. Este proceso, lejos de ser meramente tecnológico, implica una completa reestructuración de los patrones globales de producción, inversión y dependencia estratégica.

1.1. Justificación y Objetivos

La viabilidad económica de la transición energética no está asegurada. A diferencia del modelo energético fósil, en el que la energía se obtiene mediante la combustión en cadena de recursos flujo (*flow resources*), las tecnologías bajas en carbono como, paneles fotovoltaicos, aerogeneradores o vehículos eléctricos, son intensivas en materiales durante su etapa de fabricación e instalación, generando una demanda masiva y concentrada de lo que se llaman minerales críticos (International Energy Agency [IEA], 2021). Este fenómeno, que puede describirse como la "mineralización" de la economía energética, suma un vector de vulnerabilidad estructural que la literatura económica convencional de la transición energética tiende a subestimar.

La hipótesis central de este trabajo es la siguiente: la escasez física de minerales críticos y las tensiones geopolíticas asociadas a su cadena de suministro se convertirán en un obstáculo económico material para la transición energética, con capacidad de elevar sus costes, disminuir su velocidad y crear nuevas formas de dependencia estratégica para las economías occidentales.

Para contrastar esta hipótesis, el trabajo presenta cuatro objetivos específicos. En primer lugar, analizar la brecha entre las proyecciones de demanda mineral derivadas de los escenarios de descarbonización y la capacidad de respuesta de la oferta minera a corto y

medio plazo. En segundo lugar, examinar el impacto macroeconómico de dicha escasez, con especial atención al fenómeno conocido como *Greenflation* o inflación verde. En tercer lugar, elaborar un mapa de la cadena de valor global de los minerales críticos para identificar las asimetrías geográficas entre la extracción y el procesamiento, y evaluar los riesgos derivados de la posición dominante de China en dicha cadena. En cuarto y último lugar, el objetivo es analizar las principales vías de mitigación posibles, tanto desde la innovación tecnológica como desde el marco regulatorio y la economía circular.

1.2. Metodología y Fuentes de Datos

El trabajo adopta una metodología de investigación basada en el análisis documental sistemático y en la síntesis crítica de evidencia cuantitativa y cualitativa. Como consecuencia de la naturaleza dinámica y globalmente interconectada del mercado de minerales críticos, no es posible establecer un modelo econométrico propio con datos primarios, por lo que el análisis recurre a la triangulación de fuentes institucionales de primer nivel internacionalmente reconocidas.

Para el análisis de mercado, es decir, proyecciones de oferta y demanda, estructura de precios y cuellos de botella, se hace uso principalmente de los informes técnicos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), en particular The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (IEA, 2021) y Critical Minerals Market Review (IEA, 2023), así como de los registros geológicos y estadísticas de producción del United States Geological Survey (USGS). Para el análisis de las implicaciones macroeconómicas, la volatilidad de precios y el fenómeno de la *Greenflation*, se han utilizado los informes del Fondo Monetario Internacional (FMI), el Banco Mundial y el Banco Central Europeo (BCE). El análisis geopolítico tiene como base la documentación de la Comisión Europea, incluyendo el marco metodológico de criticidad y el reglamento Critical Raw Materials Act (Comisión Europea, 2023).

La principal limitación metodológica de este enfoque está en que se apoya en proyecciones de organismos con mandatos institucionales específicos, lo que puede acabar sesgando la estimación de la demanda. Esta limitación se mitiga con una serie de comparaciones de diferentes escenarios y la confrontación de fuentes.

2. Marco Teórico: Cambio Climático, Externalidades y la Economía de los Recursos Críticos

La fundamentación teórica del análisis que sigue requiere introducir el problema de los minerales críticos en el marco de la economía del cambio climático y de la teoría de los recursos naturales.

2.1. La Economía del Cambio Climático: Externalidades, Costes de Transición y la "Mineralización" de la Economía

Desde la perspectiva de la economía del bienestar, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es el claro ejemplo de la externalidad negativa de producción y consumo: los agentes económicos que las generan no internalizan el coste social asociado al daño climático que producen, lo que lleva a una sobreproducción sistemática de actividades contaminantes en relación con el óptimo social (Pigou, 1920). Este fallo de mercado, denominado por Stern (2006) como "el mayor fracaso del mercado que el mundo haya visto jamás", toma unas dimensiones históricas en la medida en que el daño acumulado es irreversible a escala generacional. En ausencia de un mecanismo de precios global que internalice el llamado Coste Social del Carbono (CSC), los mercados libres son estructuralmente incapaces de poder desplazar el capital hacia tecnologías limpias a la velocidad que la ciencia climática exige (Nordhaus, 2017). El trabajo de Nordhaus, reconocido con el Premio Nobel de Economía en 2018, formalizó este problema y proporcionó las herramientas analíticas necesarias para cuantificar los costes de la inacción frente a los costes de la transición.

La transición hacia un modelo energético descarbonizado implica, en términos macroeconómicos, un cambio fundamental en la naturaleza del input energético primario: el paso de una economía *flow-based* a una economía *stock-based*. En el modelo energético tradicional, basado en combustibles fósiles, la energía se produce mediante la extracción y combustión continua de recursos que se consumen en el mismo proceso: carbón, petróleo, gas natural, etc. En el nuevo modelo, las tecnologías de generación renovable como la fotovoltaica o eólica, y de almacenamiento, como las baterías, no consumen combustible durante su proceso, pero requieren una inmensa acumulación de materiales físicos para la construcción de su infraestructura. Este cambio estructural ha sido conceptualizado por la IEA (2021) como la "mineralización" de la economía energética: la energía del futuro no se

quema, sino que se construye, y construirla requiere toneladas de litio, cobalto, níquel, cobre y tierras raras.

Las consecuencias macroeconómicas de esta transición son de primera magnitud. En primer lugar, la demanda de minerales críticos no es gradual ni lineal, sino que es dependiente de los calendarios regulatorios de descarbonización, lo que genera picos temporales de demanda concentrados que la oferta minera, cuyo ciclo de maduración de entre diez y veinte años desde la prospección hasta la producción, difícilmente puede absorber sin tensiones de precios (IEA, 2021). En segundo lugar, la dependencia histórica de Occidente respecto a los cárteles productores de petróleo no desaparece con la transición energética, se transforma en una nueva forma de dependencia vinculada al control de los stocks de materiales críticos, con la particularidad de que, en algunos casos, la concentración geográfica de estos recursos es más extrema que la del petróleo (Hache, 2018).

2.2. Definición y Caracterización de los Minerales Críticos: Litio, Cobalto y Tierras Raras como Activos Estratégicos del Siglo XXI

La revalorización de determinadas materias primas en el marco de la transición energética ha consolidado el concepto institucional y analítico de "mineral crítico". Según la metodología estándar adoptada por la Comisión Europea para su proceso de evaluación periódica, actualizado en 2023 con la adición de 34 materias primas, la criticidad no se define en función de la escasez geológica absoluta, sino a partir de dos parámetros económicos independientes (Comisión Europea, 2023).

El primero es el peso económico, que pondera el peso del mineral en las industrias de alto valor añadido y, especialmente, la baja elasticidad de sustitución técnica: la dificultad o el coste prohibitivo de reemplazar dicho mineral por un sustituto técnico equivalente sin pérdida de rendimiento. El segundo es el riesgo de suministro, que mide la vulnerabilidad de la cadena de aprovisionamiento ante disrupciones físicas o comerciales, añadiendo variables como el índice de concentración geográfica de la producción primaria (normalmente medido mediante el índice Herfindahl-Hirschman), la estabilidad político-institucional de los países productores y las barreras comerciales existentes (Comisión Europea, 2023; Schrijvers et al., 2020).

Al aplicar este marco a los minerales de interés, nos encontramos ante tres casos paradigmáticos. El litio es el mineral disponible con mayor actividad electroquímica y de menor peso atómico, lo que lo convierte en un componente técnicamente insustituible del ánodo en las baterías de ión-litio que alimentan los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento estacionario (Tarascon & Armand, 2001). El cobalto, en cambio, es imprescindible en la estabilización química de los cátodos de alta densidad energética, aunque su sustituibilidad es mayor y existe presión industrial por movernos hacia químicas con menor contenido en cobalto, como las baterías LFP (lithium iron phosphate). La mayor vulnerabilidad estratégica del cobalto, sin embargo, no reside en su geología sino en su geografía: más del 70% de la producción mundial proviene de la República Democrática del Congo (RDC), un país con grandes problemas de volatilidad política e institucional (USGS, 2023). Por su parte, las tierras raras, un grupo de diecisiete elementos metálicos que incluye el neodimio y el disprosio, son componentes esenciales en la fabricación de imanes permanentes de alta potencia, imprescindibles para la fabricación de motores de tracción eléctrica y aerogeneradores de última generación. Su particularidad estratégica no es la escasez geológica, puesto que son geológicamente abundantes, sino la concentración extraordinaria del procesamiento y el refinado: China controla actualmente en torno al 85-90% de la capacidad mundial de refinado de tierras raras (IEA, 2023), lo que otorga al país una palanca geoeconómica de primera magnitud.

Esta construcción de dependencias superpuestas, falta de oferta, concentración geográfica de la extracción y monopolio del procesamiento, constituye la arquitectura del riesgo que este trabajo busca analizar en profundidad en los siguientes capítulos.

3. Análisis del Mercado: Oferta, Demanda y Precios

El mercado de los minerales críticos ha experimentado una transformación estructural que lo ha convertido en uno de los ejes centrales de la economía de la transición energética. El argumento central de este apartado es que la dinámica conjunta de una demanda aceleradamente creciente, anclada en mandatos regulatorios y compromisos climáticos de escasa elasticidad cíclica, y una oferta minera estructuralmente rígida a corto y medio plazo crea las condiciones ideales para tensiones de precio persistentes con implicaciones macroeconómicas de primera categoría.

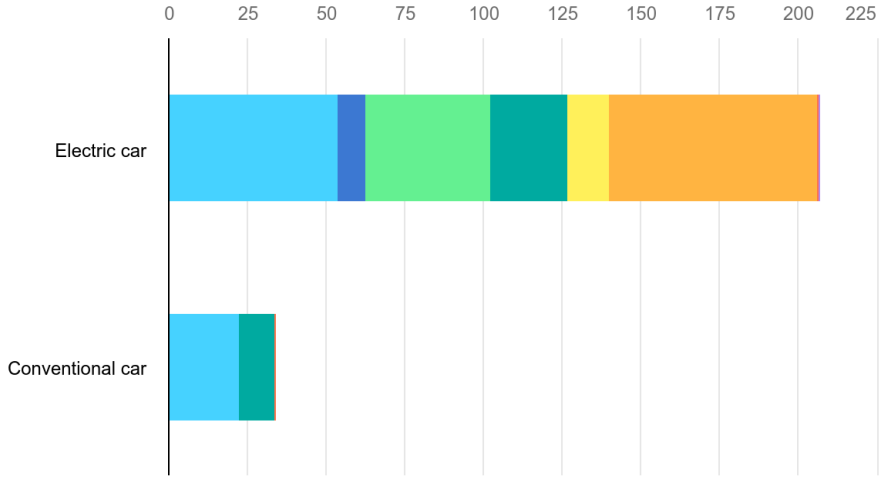
3.1. La Revolución de la Demanda: El Vehículo Eléctrico y las Energías Renovables

El volumen material de las tecnologías limpias

La diferencia fundamental entre el modelo energético fósil y el modelo renovable no es únicamente la fuente de energía primaria, sino la naturaleza física del input que cada modelo requiere. Las tecnologías de generación renovable y de movilidad eléctrica no consumen combustible durante su operación, pero son enormemente intensivas en materiales durante su fabricación e instalación. Y construirla requiere volúmenes de minerales sin precedentes en la historia industrial (IEA, 2021).

Esta asimetría material se pone de manifiesto inequívocamente al comparar los requerimientos físicos de las tecnologías limpias con las fósiles. Un vehículo eléctrico convencional requiere, de media, seis veces más minerales que un vehículo equivalente de motor de combustión interna (IEA, 2021), tal como se muestra en la Figura 1. Esta diferencia se explica por la necesidad de almacenar electroquímicamente la energía en la batería de tracción: los minerales (litio, níquel, cobalto, manganeso y grafito) no son consumibles, sino que constituyen la masa física del dispositivo de almacenamiento, y su cantidad determina de forma inmediata la densidad energética y la autonomía del vehículo.

Figura 1. Minerales utilizados en coches eléctricos frente a coches convencionales.



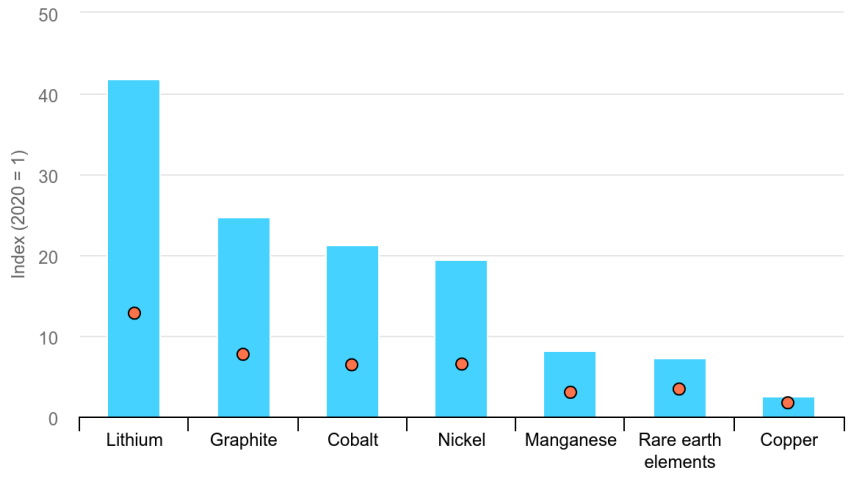
Nota. Adaptado de The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (p. 4), por IEA, 2021, Agencia Internacional de la Energía.

La misma lógica se desarrolla, incluso con mayor intensidad, en el sector de la generación eléctrica renovable. Una planta eólica terrestre requiere nueve veces más recursos minerales por unidad de capacidad instalada que una planta de ciclo combinado de gas natural (IEA, 2021). Como resultado global de esta tendencia, desde 2010 la cantidad media de minerales necesarios por nueva unidad de capacidad de generación eléctrica instalada a escala global ha aumentado un 50% (IEA, 2021), lo que demuestra que la descarbonización del sistema energético conlleva, como contrapartida estructural, su creciente "mineralización".

Proyecciones de demanda hacia 2040: escenarios y magnitudes

Las proyecciones de demanda cuantitativas demuestran la magnitud del reto. En el escenario de Desarrollo Sostenible (Sustainable Development Scenario, SDS) de la IEA (2021), el escenario más ambicioso contemplado en dicho informe, en el que se parte de una trayectoria de calentamiento menor a 1,8 °C y que se equipara en objetivos al posterior escenario de Emisiones Netas Cero (Net Zero Emissions by 2050, NZE), la demanda global de minerales provenientes de tecnologías de energía limpia podría cuadruplicarse para 2040. El escenario alternativo de Políticas Declaradas (Stated Policies Scenario, STEPS), con perspectiva más conservadora, prevé incrementos menores, pero significativos en todos los casos (IEA, 2021). La comparación entre ambos escenarios, recogida en la Figura 2, permite calibrar el rango de incertidumbre de las proyecciones y resaltar que incluso el escenario más moderado supone una presión sin precedentes sobre los mercados de minerales.

Figura 2. Crecimiento de la demanda de minerales seleccionados por escenario (2040 respecto a 2020).



Nota. Adaptado de The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, por IEA, 2021.

Desglosando por materiales, los vehículos eléctricos y el almacenamiento estacionario en baterías emergen como el vector de demanda más dinámico, se espera que multipliquen su demanda de minerales en al menos 30 veces para 2040 bajo el SDS (IEA, 2021). El litio experimentará el crecimiento relativo más pronunciado, con una demanda proyectada más de 40 veces superior a los niveles de 2020, seguido por el cobalto, el níquel y el grafito, cuya necesidad podría multiplicarse entre 20 y 25 veces, en función de la evolución tecnológica en la química de las celdas. La expansión y modernización de las redes eléctricas (*grids*), esenciales para integrar la generación renovable, sumará una presión adicional sobre el cobre y las tierras raras, cuya demanda se proyecta que se duplique durante el período analizado (IEA, 2021).

Desde la perspectiva de la economía de los recursos, la característica más relevante de esta curva de demanda es su relativa inelasticidad respecto al ciclo económico, ya que a diferencia de la demanda de acero o aluminio, que van de la mano con el crecimiento del PIB, la demanda de litio o cobalto está en gran medida determinada por mandatos regulatorios y objetivos de política climática que generan compromisos de inversión que no dependen de la coyuntura económica a corto plazo (Boer et al., 2021). Esta característica transforma a los minerales críticos en un vector de demanda cualitativamente distinto al de las materias primas industriales convencionales.

3.2. La Rigidez de la Oferta Minera: Plazos de Inversión, Costes y Cuellos de Botella Estructurales

La capacidad del sector minero para responder a la demanda proyectada se enfrenta a limitaciones estructurales que crean una curva de oferta marcadamente inelástica a corto y medio plazo. Según las estimaciones de la IEA (2021), el aprovisionamiento esperado de las minas en operación y los proyectos ya comprometidos sólo sería capaz de hacer frente a aproximadamente la mitad de la demanda proyectada de litio y cobalto para 2030, y alrededor del 80% de la demanda de cobre, suponiendo que se cumplan los objetivos climáticos del escenario SDS. Este déficit de oferta estructural no es transitorio, sino el resultado de tres fuentes de rigidez que operan simultáneamente.

Los plazos de maduración de los proyectos mineros y la inversión bajo incertidumbre

La primera y, a la vez, más importante fuente de rigidez es el tiempo físico, geológico y regulatorio que necesita la puesta en producción de una nueva explotación minera. Según los datos de la IEA (2021), el período medio transcurrido desde el descubrimiento de un yacimiento hasta el inicio de la producción comercial es de aproximadamente 16,5 años, tiempo que no ha decrecido de forma notable en las últimas décadas a pesar de los avances tecnológicos, debido al endurecimiento de los procesos de licenciamiento ambiental y social.

Esta característica convierte la oferta minera en un ejemplo casi ideal de lo que la teoría de opciones reales (*real options theory*) describe como inversión irreversible bajo incertidumbre (Dixit & Pindyck, 1994). Dado que los proyectos mineros requieren compromisos de capital altos e irrecuperables, y que la evolución futura de los precios de los minerales es incierta, sobre todo en mercados emergentes como el del litio, donde la trayectoria tecnológica de las baterías puede alterar radicalmente la demanda, las empresas mineras tienen incentivos racionales para retrasar el compromiso de gasto de capital (*CAPEX*) hasta contar con señales de precio suficientemente claras y sostenidas. Como resultado, la oferta reacciona sistemáticamente tarde, creando períodos prolongados de escasez y volatilidad de precios entre la aparición de la señal de mercado y la entrada efectiva de nueva capacidad productiva.

La disminución progresiva de la calidad mineral y el aumento de los costes marginales

La segunda fuente de rigidez tiene que ver con aspectos geológicos y afecta a la estructura de costes a largo plazo. La "ley" del mineral, es decir, la concentración del mineral de interés en

la roca extraída, ha ido disminuyendo de forma continua en muchos de los principales yacimientos del mundo. En Chile, el principal país productor del mundo en cobre, la ley media del mineral ha disminuido en aproximadamente el 30% en los últimos quince años (IEA, 2021), una tendencia confirmada a escala global por los registros del USGS (2023). Desde una perspectiva microeconómica, la degradación de la calidad del recurso implica un desplazamiento de la curva de costes marginales de producción hacia arriba: se requiere extraer, procesar y refinar volúmenes mayores de estéril para producir la misma tonelada de mineral refinado, lo cual incrementa el consumo de energía, agua y reactivos químicos, y en consecuencia, los costes operativos (OPEX). El resultado de todo esto es una tendencia hacia precios de equilibrio a largo plazo más elevados, independientemente de la dinámica de la demanda.

Las restricciones medioambientales, sociales y climáticas: la social license to operate

La tercera fuente de rigidez opera en el plano regulatorio y social. La apertura de nuevas explotaciones mineras dentro de las jurisdicciones más prometedoras desde un punto de vista geológico se enfrenta crecientemente a lo que la literatura especializada llama *social license to operate* (SLO). Son el conjunto de normas, expectativas y legitimidad social que las comunidades locales y los actores no gubernamentales exigen a los proyectos extractivos, más allá de los permisos legales formales (Prno & Slocombe, 2012). La ausencia de SLO ha paralizado proyectos de primera magnitud, como por ejemplo la mina de cobre Cobre Panamá, que fue suspendida en 2023 tras protestas masivas, y constituye una variable de riesgo difícilmente cuantificable en los modelos de proyección de la oferta.

A estas fricciones sociales se suman los riesgos climáticos físicos sobre la misma producción minera. El litio y el cobre son recursos hídricamante intensivos: más del 50% de la producción actual de ambos minerales se produce en regiones con niveles de estrés hídrico muy elevados, como el Desierto de Atacama en Chile y Argentina, o las cuencas mineras de Australia occidental (IEA, 2021). El cambio climático, al intensificar los episodios de sequía en estas regiones, actúa como un amplificador de la inelasticidad de la oferta.

3.3. La Formación de Precios: Volatilidad Estructural en Mercados con Oferta Inelástica

La combinación de una demanda rígida en crecimiento, consolidada por los mandatos regulatorios, y una oferta estructuralmente inelástica a corto plazo puede establecer las condiciones para una volatilidad de precios persistente y de naturaleza diferente a la que puede observarse en los mercados de materias primas industriales convencionales.

Para comprender esta dinámica, una parte fundamental de la explicación necesita partir de las características estructurales que distinguen los mercados de minerales críticos de otros mercados de materias primas. A diferencia del petróleo, cuyo mercado cuenta con mecanismos de estabilización como las reservas estratégicas nacionales, la capacidad de producción excedentaria que gestiona la OPEP o los mercados de futuros profundos y líquidos, los mercados de litio, cobalto o tierras raras son mercados pequeños, opacos y con poca profundidad financiera. En estos mercados, la formación de precios se basa esencialmente en negociaciones bilaterales entre productores y compradores industriales por medio de contratos a largo plazo, con un componente spot limitado, lo cual reduce la señalización de precios y amplifica las reacciones ante disrupciones puntuales de oferta (Benchmark Mineral Intelligence, 2022).

La etapa de 2021-2023 en el mercado del litio es un caso ejemplar para enseñar esta dinámica. Entre principios de 2021 y finales de 2022, el precio del carbonato de litio se multiplicó por una cifra superior a seis, impulsado por el incremento de las ventas de vehículos eléctricos post-pandemia, que desbordó la capacidad de respuesta de los productores australianos y latinoamericanos (IEA, 2023). Sin embargo, y este es un dato que no se puede descartar en el análisis, a lo largo de 2023 los precios del litio experimentaron una caída de más del 80% respecto a sus máximos históricos, como consecuencia de la entrada de nueva capacidad productiva desde Australia y China, y de una desaceleración de la demanda en el mercado chino de vehículos eléctricos (IEA, 2023). Esta corrección bidireccional de alta magnitud, auge y colapso en el corto período de dieciocho meses, no desmiente el argumento de la vulnerabilidad estructural, sino que lo confirma: en ausencia de mecanismos de estabilización, los mercados de minerales críticos son propensos a ciclos de auge y recesión que generan señales de inversión contradictorias y desincentivan la expansión planificada de la oferta a largo plazo.

Las proyecciones del FMI apuntan a que, si no se logran las inversiones mineras suficientes en la próxima década, el valor acumulado de la producción de cobre, níquel, cobalto y litio podría cuadruplicarse respecto a los niveles actuales, alcanzando una relevancia macroeconómica comparable a la del mercado del petróleo en sus décadas de mayor impacto (Boer et al., 2021).

3.4. Impacto Macroeconómico: La *Greenflation* y los Límites Económicos de la Transición

La consecuencia macroeconómica más directa de las tensiones de oferta y la volatilidad de precios mencionadas es la emergencia de presiones inflacionarias. El Banco Central Europeo ha acuñado el término *Greenflation* para describir el aumento persistente del nivel de precios derivado de la combinación de políticas de descarbonización, escasez de materiales críticos y aumento de los costes de la inversión verde (Schnabel, 2022). A diferencia de la inflación de demanda o de la inflación de costes coyuntural, la *Greenflation* tiene un carácter potencialmente duradero, en la medida en la que sus causas estructurales, como la inelasticidad de la oferta minera y la concentración geopolítica del procesamiento, no pueden ser corregidas en el corto plazo mediante los instrumentos convencionales de política monetaria.

El canal de transmisión más visible de *Greenflation* actúa a través de la curva de aprendizaje en la producción de baterías de ión-litio. La Ley de Wright, también conocida como la curva de aprendizaje tecnológico, establece que el coste unitario de producción de una tecnología disminuye en un porcentaje constante por cada duplicación acumulada de la producción (Wright, 1936). En la industria de las baterías, esta ley fue muy regular durante la última década: entre 2010 y 2021, el coste de producción de un paquete de baterías de ión-litio cayó aproximadamente un 90%, y fue la principal razón detrás de la reducción del coste del vehículo eléctrico y de su aproximación gradual a la paridad de costes con los vehículos de combustión (BloombergNEF, 2022). Sin embargo, el aumento de los precios de los minerales entre 2021 y 2022 pone fin a esta tendencia, los minerales pasaron a representar entre el 50% y el 70% del coste total de una batería, restringiendo las ganancias de eficiencia de los fabricantes (IEA, 2021) y demostrando que la curva de aprendizaje tecnológico es vulnerable

a los shocks de costes de materias primas cuando estas mismas alcanzan una proporción relevante en la estructura de costes.

Las consecuencias para el sector industrial y energético son significativas. Los principales fabricantes occidentales de aerogeneradores han registrado pérdidas operativas multimillonarias debido al aumento del precio del cobre, las tierras raras y el acero, colocando al sector en una situación de vulnerabilidad financiera que contrasta con la urgencia del despliegue requerido. Ante esta situación, las empresas se enfrentan a un dilema de absorción o traslado de coste. O los fabricantes asumen el sobrecoste con la consecuencia de una operación sin márgenes, o lo trasladan al consumidor final, quienes se verán obligados a soportar el incremento de precio de los bienes y servicios de la transición.

La segunda opción significa, en consecuencia, un efecto que se produce cuando las tecnologías limpias pierden competitividad en precio respecto a las alternativas fósiles, cuyo coste no está sujeto a la misma subida y bajada del mineral, y la transición se ralentiza, lo que contradice directamente los objetivos de política climática que la impulsan. Peor aún, la *Greenflation* trae consigo también que los bancos centrales se encuentren con un dilema de política monetaria sin precedentes, la contención del incremento de la inflación verde mediante el aumento de los tipos de interés eleva el coste, simultáneamente, del capital para los proyectos de energías renovables. Estos son además por naturaleza, proyectos de alta intensidad en capital (*CAPEX-intensive*) y larga maduración, desincentivando precisamente las inversiones necesarias para resolver el cuello de botella de oferta que genera la inflación (Schnabel, 2022).

En conjunto, el análisis de este capítulo confirma la hipótesis planteada en la introducción: la escasez de minerales críticos no es simplemente un problema tecnológico, sino una limitación económica estructural capaz de incrementar los costes de la transición, ralentizar su despliegue y dar lugar a problemáticas insolubles para la política monetaria. Los siguientes capítulos analizan cómo la dimensión geopolítica de estos mercados amplifica aún más estos riesgos.

4. La Geopolítica de los Recursos: La Nueva Dependencia Estratégica

La transición energética global no es un proceso técnico neutral. Para la geoeconomia, supone el inicio de una nueva fase de competencia estratégica entre las grandes potencias por el control de los eslabones más valiosos de las cadenas de suministro de minerales críticos. Si la geopolítica del siglo XX estuvo estructurada en torno al control de las rutas y reservas de hidrocarburos, con el Golfo Pérsico, el estrecho de Ormuz y los oleoductos transcontinentales como ejes de tensión, el siglo XXI va trasladando progresivamente ese eje hacia el control del procesamiento industrial de los materiales que hacen posible la descarbonización (Yergin, 2020; Overland, 2019). Este desplazamiento significa una transformación cualitativa de la dependencia energética occidental, desde la dependencia del flujo continuo de combustibles a la dependencia de la capacidad industrial para transformar recursos minerales en insumos tecnológicos.

4.1. La Cadena de Valor Global: La Asimetría Estructural entre Extracción y Refinamiento

El análisis de la cadena de suministro de los minerales críticos exige un marco analítico muy específico. La teoría de las cadenas de valor globales (*Global Value Chains*, GVC), desarrollada por Gereffi et al. (2005), establece que el valor económico en una cadena productiva no se distribuye uniformemente entre sus eslabones, sino que se concentra en aquellas fases que requieren mayor intensidad tecnológica, mayores barreras de entrada o mayor poder de mercado. Aplicado a los minerales críticos, este marco permite identificar con precisión dónde se encuentra la vulnerabilidad estratégica de Occidente. No en la fase de extracción minera donde la soberanía territorial permite a los países productores cierto control, sino en la fase de procesamiento y refinado, donde la concentración industrial es muy alta y donde se genera la mayor parte del valor añadido.

La cadena de valor del cobalto enseña con precisión esta dinámica. La República Democrática del Congo (RDC) concentra aproximadamente el 70% de la producción minera mundial de cobalto (USGS, 2023), lo que le da una posición formalmente dominante en la extracción. Sin embargo, esta superioridad geológica no se traduce en poder de mercado, por dos razones estructurales. Primero, la RDC carece de la infraestructura industrial necesaria para procesar el cobalto extraído en su territorio, prácticamente la totalidad del mineral bruto

se exporta para su refinado, principalmente a China, que en 2022 controlaba aproximadamente el 73% de la capacidad mundial de refinado de cobalto (IEA, 2023). Segundo, el contexto de inestabilidad político-institucional de la RDC, sumado a la presencia de minería artesanal asociada a violaciones documentadas de derechos laborales y trabajo infantil, convierte al país en un proveedor de alto riesgo reputacional y operativo para las corporaciones occidentales que están obligadas a cumplir con estándares de diligencia debida en su cadena de suministro (Comisión Europea, 2023). El cobalto congoleño es, a fin de cuentas, el caso más paradigmático de una materia prima cuya riqueza geológica beneficia al país que la refina, no al que la extrae.

Esta disociación entre extracción y valor añadido se produce también en el mercado del litio. Australia y Chile concentran conjuntamente más del 75% de la producción minera mundial de litio (USGS, 2023), pero prácticamente la totalidad del mineral extraído en formato espodumena (Australia) o salmuera (Chile) es exportado a Asia para su etapa de conversión en hidróxido o carbonato de litio de grado batería, el proceso químico que determina la aplicabilidad industrial del mineral. En 2022, China tenía control sobre aproximadamente el 60% de la capacidad mundial de refinado de litio (IEA, 2023). El valor añadido no está en el dominio territorial sobre el yacimiento, sino en la infraestructura química y el capital tecnológico necesarios para producir el grado de pureza que requiere la industria de baterías. Desde la perspectiva de las GVC, el eslabón del refinado también juega el mismo rol que en el caso de la cadena del cobre, actuando como un cuello de botella que captura la renta industrial y convierte la dependencia del procesamiento en el verdadero núcleo de la vulnerabilidad occidental.

4.2. La Estrategia Industrial China: Dominio del Procesamiento y su Instrumentalización Geopolítica

El dominio de China sobre los eslabones de mayor valor añadido en las cadenas de suministro de minerales críticos es producto no de una ventaja comparativa estática, sino de una política industrial de Estado deliberada y sostenida durante décadas. A diferencia de las economías occidentales, que durante la década de los noventa y dos mil externalizaron la industria pesada de procesamiento para lograr una minimización de costes a corto plazo, China fue más lejos aplicando una estrategia de integración vertical de las cadenas de valor

de los minerales estratégicos, subsidiando la construcción de capacidad de refinado, controlando la inversión directa en minas extranjeras a través de empresas estatales, e implantando un marco regulatorio doméstico orientado a retener el valor añadido en territorio nacional (Overland, 2019).

El resultado de esta estrategia se manifiesta en cuotas de mercado de procesamiento que no tienen precedentes en ningún otro mercado de materias primas. En 2022, China controlaba aproximadamente el 85-90% de la capacidad mundial de refinado de tierras raras, el 73% del refinado de cobalto, el 60% del refinado de litio y más del 90% del procesado de grafito natural, mineral imprescindible para los ánodos de las baterías de ión-litio (IEA, 2023). Estas cifras no solo representan una ventaja competitiva industrial, sino que dan a China una palanca de presión geopolítica de primer orden sobre las economías que dependen de estos recursos para sus industrias estratégicas.

Probablemente el antecedente histórico más documentado de el uso de esta palanca sea la crisis de las tierras raras de 2010, cuando China redujo sus cuotas de exportación de tierras raras en aproximadamente un 40%, lo cual generó un shock de precios internacional que afectó gravemente a las industrias electrónica y de defensa de Japón, la UE y EE.UU. El episodio desencadenó un conflicto comercial ante la Organización Mundial del Comercio que China finalmente perdió en 2014 (Morrison & Tang, 2012), demostrando empíricamente que el control del refinado puede ejercerse como un instrumento de coerción económica con efectos equivalentes o superiores a los de un embargo de recursos primarios.

Por su parte, esta estrategia se actualizó con mayor precisión en 2023. En julio y agosto de ese año, China anunció restricciones de exportación sobre el galio y el germanio, elementos críticos para la fabricación de semiconductores y equipos de comunicaciones militares y, en diciembre, sobre el grafito de grado batería (IEA, 2024). Estas medidas, adoptadas en un contexto de tensiones tecnológicas con EE.UU. debido a las restricciones americanas a las exportaciones de semiconductores avanzados, demostraron que la instrumentalización geopolítica de los minerales críticos es una política activa y en curso, no un escenario hipotético (Eurasia Group, 2024).

4.3. Riesgos para Europa y Occidente: Respuestas de Política y Límites de la Soberanía Industrial

La concienciación de la profundidad de esta dependencia ha impulsado respuestas de política económica y regulatoria bastante ambiciosas en las economías occidentales, aunque su implementación efectiva enfrenta obstáculos estructurales significativos.

En el ámbito europeo, la respuesta más importante es el Reglamento de Materias Primas Críticas (Critical Raw Materials Act, CRMA), aprobado por el Parlamento Europeo y el Consejo en 2024. El CRMA establece objetivos cuantitativos explícitos para 2030: que la UE llegue a procesar internamente al menos el 40% de su consumo anual de materias primas críticas, que no más del 65% de ninguna materia prima estratégica proceda de un único tercer país, y que el reciclaje cubra al menos el 15% del consumo de materias primas estratégicas (Comisión Europea, 2024). Estos objetivos implican romper deliberadamente con el principio de libre mercado como determinante de la localización industrial, reconociendo explícitamente que la dependencia de China en el procesamiento de minerales constituye un riesgo de seguridad económica que no puede ser corregido por el propio mercado.

En Estados Unidos, la Inflation Reduction Act (IRA) de 2022 tomó una dirección alternativa: estableció créditos fiscales elevados para la adquisición de vehículos eléctricos y baterías, dada la condición de que un porcentaje creciente de los minerales críticos utilizados hayan sido extraídos o procesados en EE.UU. o en países con acuerdos de libre comercio con Washington (U.S. Congress, 2022). El efecto geopolítico de esta medida es dual, por lo que incentiva la construcción de capacidad de procesamiento en territorio americano y entre sus aliados, pero también excluye de a las cadenas de suministro chinas de los beneficios fiscales, creando presión sobre las empresas para diversificar sus proveedores.

La dimensión geográfica de esta competencia ya se está trasladando hacia territorios que hasta hace tan solo 10 años no resultaban para nada relevantes estratégicamente. El caso más emblemático es el de Groenlandia, cuyo territorio tiene documentadas reservas de tierras raras, uranio y otros minerales estratégicos. El interés estadounidense hacia dicho territorio groenlandés, que en 2019 se materializó en una propuesta de adquisición territorial, resulta prueba de una lógica de seguridad de suministro que va mucho más allá de cualquier administración particular y está conectada a la doctrina de la seguridad nacional americana

(Rahbek-Clemmensen, 2020). En el flanco oriental europeo, la guerra en Ucrania ha añadido explícitamente otra dimensión mineral al análisis geopolítico. Ucrania alberga los depósitos de litio más importantes de toda Europa, estimados en torno a 500.000 toneladas de reservas conocidas, así como reservas de titanio, manganeso y grafito, en parte localizadas en las regiones del este del país (Comisión Europea, 2023). El acceso a estas reservas ha adquirido relevancia estratégica explícita para la industria automovilística europea como vector que permitiría la reducción de la dependencia asiática, aunque su explotación efectiva está condicionada a la resolución del conflicto bélico.

En conjunto, la arquitectura de dependencia descrita en este apartado constata que el riesgo geopolítico de la transición energética no es simétrico. Mientras China ha hecho durante décadas una demostración de su capacidad de dominio industrial en los eslabones de mayor valor de las cadenas de suministro de minerales críticos, las economías occidentales están atrapadas en una fase de acción reactiva, construyendo marcos regulatorios e instrumentos de política industrial cuya efectividad a largo plazo está aún por demostrar. Sin una expansión coordinada de la capacidad de procesamiento en jurisdicciones diversificadas, la transición energética de Occidente tendrá el riesgo de volver a crear, con distintos actores y materiales, la misma estructura de dependencia que durante el siglo XX caracterizó al mercado del petróleo.

5. Vías de Mitigación: Innovación, Economía Circular y Marco Regulatorio

El análisis realizado en los capítulos anteriores ha demostrado que el problema de la escasez de minerales críticos y los riesgos geopolíticos de la cadena de suministro no son problemas coyunturales, sino restricciones estructurales con capacidad de aumentar los costes de la transición energética, ralentizar su desarrollo y provocar dilemas insolubles para la política industrial y monetaria occidental. La apertura rápida de nuevas explotaciones mineras convencionales, aunque necesaria, no es suficiente como única respuesta. El tiempo de maduración de entre diez y dieciséis años hace que cualquier decisión de inversión que se adopte en el presente no genere capacidad productiva relevante antes de la segunda mitad de la década de 2030 (IEA, 2021). Por lo tanto, una respuesta adecuada al problema necesita una actuación simultánea sobre tres factores: la reducción de la dependencia mineral mediante innovación en la química de los materiales, la creación de fuentes de suministro secundario mediante la economía circular, y el establecimiento de marcos regulatorios que corrijan los fallos de mercado e incentiven la inversión privada en la cadena de valor doméstica.

5.1. Innovación en la Química de Materiales: Reducción de la Dependencia Mineral

Desde la perspectiva de la microeconomía de la innovación, los precios persistentemente elevados de los bienes constituyen el incentivo más potente para el desarrollo de tecnologías sustitutivas. Cuando el coste de un input crítico aumenta de forma sostenida, las empresas tienen incentivos para invertir en investigación orientada a incrementar la elasticidad de sustitución técnica, es decir, a desarrollar alternativas funcionales que reduzcan o eliminen la dependencia del material encarecido sin sacrificar demasiado el rendimiento (Acemoglu et al., 2012). En la industria de almacenamiento de energía, este proceso se manifiesta en dos líneas de innovación convergentes, la evolución de las químicas de cátodo en las baterías de ión-litio y el desarrollo de tecnologías de baterías alternativas al litio.

Evolución de las químicas de cátodo: la reducción del cobalto

La primera y más inmediata línea de innovación se ejerce dentro del propio paradigma de las baterías de ión-litio, pero modificando la composición química del cátodo con el fin de reducir o eliminar el uso de los minerales más críticos. De hecho, las baterías de fosfato de hierro y litio (Lithium Iron Phosphate, LFP) prescinden por completo del cobalto y el níquel, sustituyéndolos por hierro y fósforo, materiales en mucha mayor abundancia y

geográficamente distribuidos, a costa de una menor densidad energética gravimétrica. La relevancia económica de esta transición ya se deja ver en los datos de mercado, en 2023, las baterías LFP representaban más del 40% del total del mercado global de baterías para vehículos eléctricos, superando parcialmente a las químicas NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto) de gran densidad (IEA, 2023). Esta tendencia tiene implicaciones directas sobre la demanda proyectada de cobalto, reduciendo las estimaciones más pesimistas de escasez vistas en el capítulo 3.

Baterías de ión-sodio: potencial y limitaciones reales

La segunda línea de innovación con mayor potencial disruptivo a medio plazo es el desarrollo de las baterías de ión-sodio (Na-ion). El sodio tiene ventajas estructurales muy potentes frente al litio desde la perspectiva de la economía de los recursos. Es el sexto elemento más abundante en la corteza terrestre y su distribución geográfica es uniforme a escala global, obtenible principalmente de la sal marina, y no tiene los riesgos de concentración geopolítica del suministro que caracterizan al litio o al cobalto (Vaalma et al., 2018). Además, las baterías Na-ion pueden fabricarse sin cobalto, litio y grafito, los tres minerales de mayor riesgo de suministro identificados en este trabajo.

Sin embargo, es necesario analizar su estado de desarrollo sin optimismo injustificado. La densidad energética gravimétrica de las celdas Na-ion disponibles comercialmente en 2023-2024 se sitúa entre 100 y 160 Wh/kg, frente a los 250-300 Wh/kg de las celdas NMC con alta densidad utilizadas en vehículos eléctricos de largo alcance (Faradion, 2023; IEA, 2024). Esta diferencia no ha sido eliminada, sino que se ha reducido hasta hacerlo competitivo desde sectores específicos: almacenamiento estacionario en redes eléctricas, vehículos urbanos de bajo coste y aplicaciones de movilidad de corta distancia. CATL, el mayor fabricante mundial de baterías, con sede en China, lanzó en 2021 su primera batería Na-ion y anunció su integración en vehículos en 2023 (CATL, 2023), lo que evidencia que el liderazgo tecnológico en este segmento emergente también se concentra en la misma geografía que tiene el dominio de la cadena de valor del litio, lo cual matiza el nivel de su potencial como herramienta de diversificación geopolítica para Occidente.

El efecto macroeconómico más importante de la difusión de las baterías Na-ion y LFP no sería la erradicación de la demanda de litio, sino su redistribución hacia aplicaciones de mayor valor añadido como vehículos de larga autonomía, aviación y aplicaciones

industriales. Lo que permitiría reducir la presión sobre el mercado spot, evitando así los episodios de volatilidad extrema de precios descritos anteriormente. En este sentido, la innovación en química de materiales no actúa como una solución total al problema de la escasez mineral, sino más bien como un estabilizador estructural de la curva de demanda.

5.2. Economía Circular y Minería Urbana: La Oferta Secundaria como Vector de Soberanía

La segunda palanca de mitigación se desarrollaría en el lado de la oferta, redefiniendo el ciclo de vida de los materiales críticos mediante la recuperación y el reciclaje sistemático de los minerales contenidos en las tecnologías limpias que han llegado al final de su vida útil. Esta opción, contemplada en la literatura como "minería urbana" (*urban mining*), permite transformar los residuos tecnológicos en fuentes de suministro secundario cuyas ventajas estructurales con la minería primaria convencional son considerables (Graedel et al., 2011).

En términos económicos, una batería de ión-litio agotada contiene concentraciones de litio, cobalto, níquel y manganeso muy por encima de la de los minerales en su estado natural. Los plazos de construcción de una planta de reciclaje son considerablemente inferiores a los de una mina convencional, entre dos y cuatro años frente a los dieciséis de media para una nueva explotación minera, lo que ofrece una flexibilidad de respuesta que el sector extractivo primario no puede proporcionar (IEA, 2021). Desde la perspectiva de la seguridad de suministro, las plantas de reciclaje instaladas en territorio europeo o norteamericano generan una fuente de suministro interior que reduce estructuralmente la dependencia de las importaciones asiáticas, abordando directamente la vulnerabilidad geopolítica analizada en el capítulo 4.

Por otro lado, la minería urbana se enfrenta a restricciones reales que la literatura económica que trata la economía circular documenta y que no pueden omitirse. En primer lugar, las tasas de reciclaje efectivo de litio en Europa son actualmente inferiores al 5% dado que no existe infraestructura industrial dedicada a ello, que existe una gran dispersión geográfica de los residuos y que históricamente no han existido suficientes incentivos regulatorios (Baars et al., 2021). En segundo lugar, los procesos de reciclaje en la actualidad presentan disyuntivas técnicas relevantes, por un lado, la pirometalurgia es el proceso que ha demostrado ser el más

extendido industrialmente pero no recupera cobalto y níquel con alta eficiencia, pero no recupera litio ni manganeso, que se pierden en la escoria (Harper et al., 2019). Por otro lado, la hidrometalurgia permite recuperar litio con mayor eficiencia, pero implica costes operativos significativamente superiores y genera efluentes químicos que requieren un tratamiento especializado. La elección del proceso de reciclaje determina, por tanto, qué minerales se benefician realmente de la oferta secundaria, con efectos directos sobre las proyecciones de demanda primaria por material.

En tercer lugar, y este último límite es el más determinante a corto plazo, el volumen de baterías disponibles para el reciclaje en esta década es insuficiente para generar una oferta secundaria estadísticamente significativa. La primera generación masiva de vehículos eléctricos, desplegada entre 2015 y 2020, comenzará a alcanzar el final de su vida útil entre 2025 y 2030, momento en que el flujo de material reciclable empezará a escalar (IEA, 2023). Hasta entonces, la rentabilidad de las inversiones en infraestructura de reciclaje depende en gran medida de la regulación e institucional, lo que conecta directamente con el tercer punto de mitigación.

El instrumento regulatorio específico que proporciona cobertura jurídica y obligatoriedad a la minería urbana en Europa es el Reglamento Europeo de Baterías (EU Battery Regulation, Reglamento UE 2023/1542), que entró en vigor en agosto de 2023. Este reglamento establece objetivos vinculantes de eficiencia de reciclaje para cada una de las diferentes categorías de baterías y, de forma más relevante, establece contenidos mínimos obligatorios de materiales reciclados para las nuevas baterías producidas o comercializadas en la UE. A partir de 2031, las baterías de tracción de vehículos eléctricos deberán contener un mínimo del 6% de cobalto reciclado, 6% de litio reciclado y 6% de níquel reciclado, con objetivos más ambiciosos fijados para 2036 (Parlamento Europeo y Consejo de la UE, 2023). Este mecanismo de demanda garantizada de los materiales reciclados es el instrumento más eficaz para conseguir el incentivo económico que respalde la inversión del capital privado en infraestructura de reciclaje a escala industrial.

5.3. Marco Regulatorio: La Critical Raw Materials Act como Política Industrial de Soberanía

Las soluciones tecnológicas y circulares descritas requieren un marco normativo que corrija los fallos de mercado que las impiden y proporcione las señales de largo plazo que el capital privado necesita para asumir inversiones de alta intensidad y larga maduración. Conscientes de esta necesidad, la Unión Europea ha dado un giro significativo respecto a su tradicional énfasis en la competencia de mercado, adoptando una política industrial de soberanía en el ámbito de los minerales críticos cuya hipótesis más completa es el Reglamento de Materias Primas Críticas.

El Reglamento de Materias Primas Críticas (Critical Raw Materials Act, CRMA), publicado en el Diario Oficial de la UE en mayo de 2024, establece un marco jurídico vinculante para reducir la dependencia europea de terceros países en el suministro de materias primas críticas y estratégicas. Es importante definir la distinción terminológica que introduce el reglamento: la CRMA diferencia entre 34 "materias primas críticas", definidas en función de su importancia económica y riesgo de suministro, de un subconjunto más restringido de 17 "materias primas estratégicas", definidas en función de su importancia específica para las tecnologías de la transición energética y digital y por presentar los mayores riesgos de suministro (Comisión Europea, 2024). Los objetivos cuantitativos vinculantes del reglamento están vinculados específicamente a estas últimas y fijan, para 2030, que la capacidad de la UE cubra al menos el 10% de su consumo anual en extracción, al menos el 40% en procesamiento y refinado, y al menos el 25% a través del reciclaje (Comisión Europea, 2024). Adicionalmente, el reglamento establece que ningún tercer país podrá suministrar más del 65% del consumo europeo de ninguna materia prima estratégica en ninguna fase de la cadena de valor, una disposición dirigida explícitamente a limitar la dependencia de China.

Más allá de los objetivos cuantitativos, la CRMA introduce instrumentos concretos orientados a superar los cuellos de botella identificados en el análisis de la oferta. El más relevante es la figura de los "Proyectos Estratégicos". Brinda a los proyectos de extracción, procesamiento o reciclaje de materias primas estratégicas en territorio europeo o en países con los que la UE ha suscrito acuerdos de asociación estratégica, el estatus de máximo interés público nacional, lo que facilita su tramitación administrativa y reduce los plazos de obtención de permisos (Comisión Europea, 2024). Concretamente, el reglamento establece

plazos máximos de 27 meses para la autorización de permisos de explotación minera y de 15 meses para proyectos de procesamiento, una reducción significativa respecto a los plazos medios actuales, que en algunos Estados miembros superan los diez años. La CRMA también contempla la imposición de un mandato de auditoría de la cadena de suministro para las grandes empresas consumidoras de materias primas estratégicas, obligándolas a identificar y gestionar activamente sus vulnerabilidades de aprovisionamiento.

La CRMA representa el instrumento de política industrial más ambicioso que la UE ha puesto en práctica en el área de los recursos minerales, pero su efectividad a largo plazo requerirá enfrentarse a grandes desafíos. Los objetivos de procesamiento doméstico del 40% para 2030 implican construir en menos de seis años una infraestructura industrial de refinado que Europa no ha desarrollado en décadas de desindustrialización de este sector. La competitividad de estas instalaciones frente a las chinas, que operan con economías de escala consolidadas y sin los mismos estándares medioambientales y laborales, no está garantizada si no hay subsidios permanentes o aranceles adicionales, lo que plantea tensiones con los compromisos de la UE en el marco de la OMC (Groves et al., 2023).

Las tres vías de mitigación analizadas no son alternativas excluyentes sino estrategias complementarias que contemplan horizontes temporales diferenciados, de forma que su eficacia agregada depende de su implementación simultánea y coordinada. A corto plazo (2024-2030), el impacto más inmediato viene de la difusión de las químicas LFP y Na-ion en las categorías de menor densidad energética, lo que reduce la presión sobre el mercado de cobalto y litio, y de la entrada en vigor de los marcos regulatorios CRMA y del Reglamento de Baterías, los cuales crean los incentivos para la inversión en reciclaje e infraestructura de procesamiento. A medio plazo (2030-2040), la minería urbana empezará a generar volúmenes de oferta secundaria estadísticamente relevantes a medida que la primera generación masiva de vehículos eléctricos alcance el final de su ciclo de vida. Finalmente, a largo plazo (más allá de 2040), la nueva capacidad minera y de procesamiento promovida por las políticas actuales empezará a diversificar estructuralmente las cadenas de suministro.

Sin embargo, a pesar de ello, es la conclusión analítica que enlaza este capítulo con la propia hipótesis del trabajo, ninguna de las tres vías, ni combinando estas, garantiza la eliminación completa del riesgo de escasez mineral antes de 2030. Las restricciones estructurales son muy profundas y los plazos de implementación demasiado largos para que la oferta, sea en la

forma que sea, siga el ritmo que impone la demanda y los calendarios regulatorios de descarbonización actualmente vigentes. La escasez mineral no paralizará la transición energética, pero sí la encarecerá y ralentizará, confirmando la hipótesis de que la escasez mineral es un obstáculo económico material de primera magnitud.

6. Conclusiones

El trabajo parte de una hipótesis fundamental para entender la complejidad de la transición energética: que la escasez física de minerales críticos y los riesgos geopolíticos que la cadena de suministro conlleva conforman un obstáculo económico para la transición energética. La primera conclusión del análisis es la de carácter estructural: la transición de una economía *flow-based*, basada en el consumo continuo de combustibles, a una economía *stock-based*, dependiente de la acumulación de materiales en infraestructuras, no elimina la dependencia energética de Occidente, sino que la transforma. La nueva dependencia no gira en torno al barril de petróleo, sino en torno a la tonelada de litio refinado, al kilogramo de cobalto procesado y a la cadena de suministro de tierras raras. Este cambio estructural, conceptualizado como la "mineralización" de la economía energética (IEA, 2021), es el punto de partida del resto del análisis.

El segundo resultado se basa en la dinámica de mercado. La brecha entre una demanda de minerales críticos anclada en mandatos regulatorios, y en consecuencia relativamente inelástica al ciclo económico, y una oferta minera con plazos de maduración de entre diez y dieciséis años genera las condiciones para tensiones de precio y ciclos de auge y decadencia. El mercado, en ausencia de mecanismos de estabilización equivalentes a los del mercado petrolero, no puede corregir por sí solo. La *Greenflation* que resulta de estas tensiones no es solo un fenómeno monetario sino que coloca a los bancos centrales ante un dilema sin precedentes en el que los instrumentos de estabilización de precios contrarrestan los objetivos de inversión en descarbonización (Schnabel, 2022).

En tercer lugar está la naturaleza geopolítica. El análisis de las cadenas de valor globales de los minerales críticos demuestra que el verdadero poder de mercado no se encuentra en la soberanía territorial sobre los yacimientos, sino en el control de los eslabones de mayor valor añadido: el procesamiento y el refinado. Frente a la posición consolidada de China, las respuestas occidentales, la Critical Raw Materials Act europea y la Inflation Reduction Act americana, suponen un giro estratégico hacia la política industrial de soberanía que, si bien es necesario, llega con un retraso de décadas y se enfrenta a plazos de implementación que no se ajustan a la urgencia de los calendarios climáticos.

La última parte del análisis intenta relativizar el pesimismo. Las vías de mitigación disponibles son reales y tienen capacidad de amortiguar, aunque no de eliminar. La difusión de las químicas LFP y el desarrollo de las baterías Na-ion reducen la presión sobre los minerales más críticos en segmentos específicos del mercado. La minería urbana, respaldada por el Reglamento Europeo de Baterías de 2023, creará a partir de 2030 una fuente de oferta secundaria que refuerza la autonomía industrial de las regiones sin recursos geológicos propios. Y los marcos regulatorios en curso, si se implementan con eficacia, pueden crear los incentivos adecuados para atraer el capital necesario.

La conclusión sintética es, por tanto, que ninguna de estas palancas opera con suficiente rapidez para parar el encarecimiento o la dependencia de actores geopolíticos. La transición es económicamente viable a largo plazo, y su viabilidad a corto y medio plazo está condicionada por decisiones de política industrial e inversión que todavía no han sido adoptadas a la escala necesaria.

7. Bibliografía

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, *102*(1), 131–166. https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131

Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R., Melin, H. E., & Heidrich, O. (2021). Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature Sustainability*, *4*(1), 71–79. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0

Benchmark Mineral Intelligence. (2022). *Lithium price assessment methodology and market report*. Benchmark Mineral Intelligence. https://www.benchmarkminerals.com (Consultado el 12 de marzo de 2026)

BloombergNEF. (2022). *Electric vehicle outlook 2022*. Bloomberg Finance L.P. about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/ (Consultado el 12 de marzo de 2026)

Boer, L., Pescatori, A., & Stuermer, M. (2021). *Energy transition metals* (IMF Working Paper No. 2021/243). International Monetary Fund. https://www.imf.org/en/publications/wp/issues/2021/10/12/energy-transition-metals-465899

CATL. (2023). *CATL sodium-ion battery: The first generation*. Contemporary Amperex Technology Co. https://www.catl.com/en/research/technology/ (Consultado el 16 de marzo de 2026)

Comisión Europea. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU: Final report*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2873/725585

Comisión Europea. (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1252 (Consultado el 14 de marzo de 2026)

Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. (1994). *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.

Eurasia Group. (2024). *Top risks 2024: The geopolitics of critical minerals*. Eurasia Group. https://www.eurasiagroup.net/issues/top-risks-2024 (Consultado el 15 de marzo de 2026)

Faradion. (2023). *Sodium-ion battery technology: Performance and applications*. Faradion Limited. https://www.faradion.co.uk/technology/ (Consultado el 16 de marzo de 2026)

Gereffi, G., Humphrey, J., & Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, *12*(1), 78–104. https://doi.org/10.1080/09692290500049805

Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F., & Sonnemann, G. (2011). What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, *15*(3), 355–366. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x

Groves, C., Bennasar-Figueras, R., & Lumbreras, S. (2023). Critical raw materials and the European Green Deal: Structural tensions and regulatory gaps. *Resources Policy*, *85*, 103869. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103869

Hache, E. (2018). Do renewable energies improve energy security in the long run? *International Economics*, *155*, 49–70. https://doi.org/10.1016/j.inteco.2018.01.005

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, *575*(7781), 75–86. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5

International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. IEA. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions (Consultado el 10 de marzo de 2026)

International Energy Agency. (2023). *Critical minerals market review 2023*. IEA. https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023 (Consultado el 10 de marzo de 2026)

International Energy Agency. (2024). *Critical minerals market review 2024*. IEA. https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2024 (Consultado el 10 de marzo de 2026)

Morrison, W. M., & Tang, R. (2012). *China's rare earth industry and export regime: Economic and trade implications for the United States* (CRS Report R42510). Congressional Research Service. https://sgp.fas.org/crs/row/R42510.pdf (Consultado el 13 de marzo de 2026)

Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(7), 1518–1523. https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114

Overland, I. (2019). The geopolitics of renewable energy: Debunking four emerging myths. *Energy Research & Social Science*, *49*, 36–40. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.10.018

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/1542 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de julio de 2023, relativo a las baterías y los residuos de baterías*. Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023R1542 (Consultado el 15 de marzo de 2026)

Pigou, A. C. (1920). *The economics of welfare*. Macmillan.

Prno, J., & Slocombe, D. S. (2012). Exploring the origins of 'social license to operate' in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories. *Resources Policy*, *37*(3), 346–357. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.002

Rahbek-Clemmensen, J. (2020). The Greenland card: Greenlandic sovereignty, the United States, and Danish foreign policy. *The RUSI Journal*, *165*(3), 22–33. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315265797-15/denmark-greenland-changing-sovereignty-security-challenges-arctic-jon-rahbek-clemmensen

Schnabel, I. (2022, febrero 17). *A new age of energy inflation: Climateflation, fossilflation and greenflation* [Discurso]. The ECB and its Watchers XXII Conference, Frankfurt. https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2022/html/ecb.sp220317_2~dbb3582f0a.en.html (Consultado el 8 de marzo de 2026)

Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W.-Q., Dewulf, J., Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Amtenbrink, M., Kosmol, J., La Brooy, C., Licht, C., Nansai, K., Nuss, P., Peck, D., … Sonnemann, G. (2020).

A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, *155*, 104617. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617

Stern, N. (2006). *Stern review on the economics of climate change*. HM Treasury. https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20100407163608/https://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm (Consultado el 5 de marzo de 2026)

Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, *414*(6861), 359–367. https://doi.org/10.1038/35104644

United States Geological Survey. (2023). *Mineral commodity summaries 2023*. U.S. Department of the Interior. https://doi.org/10.3133/mcs2023

U.S. Congress. (2022). *Inflation Reduction Act of 2022* (Public Law 117-169). U.S. Government Publishing Office. https://www.congress.gov/117/plaws/publ169/PLAW-117publ169.pdf (Consultado el 14 de marzo de 2026)

Vaalma, C., Buchholz, D., Weil, M., & Passerini, S. (2018). A cost and resource analysis of sodium-ion batteries. *Nature Reviews Materials*, *3*, 18013. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2018.13

Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, *3*(4), 122–128. https://doi.org/10.2514/8.155

Yergin, D. (2020). *The new map: Energy, climate, and the clash of nations*. Penguin Press.