

Informe C

Materiales y materias primas críticas en la transición energética

Introducción	1	Creación de cadenas de valor de materias primas resilientes, seguras y sostenibles	11
		Desafíos económicos y de gobernanza para la UE	11
El papel de las materias primas minerales en la transición energética	3	Retos sociales y ambientales	13
		<i>Impacto social de la minería</i>	13
Demanda de minerales: competencia entre sectores y tecnologías	3	<i>Impacto medioambiental de la minería</i>	14
<i>Sectores y aplicaciones tecnológicas intensivos en materias primas minerales</i>	3	<i>Respuesta social ante la actividad minera</i>	15
<i>Un aumento de la demanda sin precedentes</i>	3	<i>Diligencia debida y responsabilidad social corporativa</i>	15
Concentración desigual de recursos minerales	5	Refuerzo de la circularidad de materiales y materias primas: reparación, reutilización y reciclaje.	16
<i>Mirada a un nuevo tablero geopolítico global</i>	5		
<i>La vulnerabilidad europea</i>	7	Ideas fuerza	18
<i>España: un país con tradición minera</i>	8		
Una cadena de valor globalizada	9	Bibliografía	I-V
Materiales avanzados: una alternativa incipiente al uso de materias primas críticas.	10		

Cómo citar este informe:

Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Informe C. Materiales y materias primas críticas en la transición energética. (2024) www.doi.org/10.57952/gbrz-xn19

Personal experto consultado (por orden alfabético)

Alonso Zarza, Ana María¹. Directora, Instituto Geológico y Minero de España (IGME – CSIC).

Álvarez Pelegrí, Eloy¹. Académico de Número, Real Academia de Ingeniería de España. Profesor Ad-Honorem ETSIME Madrid.

Bobba, Silvia¹. Responsable de proyectos científicos, Centro Común de Investigación, Comisión Europea, Italia.

Carrara, Samuel¹. Responsable de proyectos científicos, Centro Común de Investigación, Comisión Europea, Países Bajos.

Conde Puigmal, Marta¹. Investigadora, Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental (ICTA), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

Cuesta López, Santiago¹. Director general, Centro internacional de materiales avanzados y materias primas (ICAMCYL). Director general, Clúster para la Minería Sostenible (ISMC).

de la Torre de Palacios, Luis¹. Director de la Cátedra Robeco/ UPM-ETSIME en Sostenibilidad y Recursos Primarios. Profesor Dr. ENAE Business School.

Dufour Andía, Javier¹. Catedrático de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC). Jefe de la Unidad de Análisis de Sistemas, IMDEA Energía.

Feás, Enrique¹. Investigador principal, Real Instituto Elcano.

Herrera García, Gerardo¹. Profesor de Investigación, Instituto Geológico y Minero de España (IGME – CSIC). Experto Nacional Destacado, Comisión Europea DG Grow II, Bélgica.

Hidalgo García, María del Mar¹. Analista principal, Instituto Español de Estudios Estratégicos.

Jorge Ricart, Raquel. Analista de política internacional y agenda tecnológica y digital, Real Instituto Elcano. Investigadora principal, Global Initiative on the Future of the Internet, European University Institute.

Kim, Tae Yoon. Analista de tecnologías de energía de la Agencia Internacional de la Energía (IEA). Francia.

Kuzov, Teodor¹. Responsable de proyectos científicos, Centro Común de Investigación, Comisión Europea, Países Bajos.

López Gómez, Félix Antonio¹. Investigador científico, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC).

Magnani, Nicola¹. Responsable de proyectos científicos, Centro Común de Investigación, Comisión Europea, Países Bajos.

Moratilla Soria, Yolanda Beatriz¹. Académica de número en la Real Academia de Doctores de España.

Palacín Peiró, M^o. Rosa¹. Profesora de Investigación, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB-CSIC).

Prior Arce, Ángel. Responsable de proyectos científicos, Centro Común de Investigación, Comisión Europea, Países Bajos.

Riera-Galindo, Sergi¹. Científico titular, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB-CSIC).

Sánchez García, Teresa¹. Investigadora, Instituto Geológico y Minero de España (IGME – CSIC).

Timón Sánchez, Susana María¹. Científica titular, Instituto Geológico y Minero de España (IGME – CSIC).

Valero Delgado, Alicia¹. Catedrática de Ingeniería Mecánica y directora del grupo de Ecología Industrial en el Instituto Energía, Universidad de Zaragoza.

Vidal Legaz, Beatriz¹. Investigadora, Agencia Europea de Medio Ambiente, Dinamarca.

Walter, Mariana¹. Investigadora Ramon y Cajal y Profesora del Institut Barcelona d'Estudis Internacionals.

EQUIPO C (por orden alfabético)

Este informe ha sido liderado por:

Maite Iriondo de Hond. Técnica de evidencia científica y tecnológica.

El equipo de trabajo está compuesto por:

Coordinación

Ana Elorza. Coordinadora de la Oficina C en la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

Pedro Peña. Letrado de las Cortes Generales. Director de Estudios, Análisis y Publicaciones.

Equipo técnico

Bárbara Cosculluela. Letrada de las Cortes Generales. Jefa del Departamento de Asuntos Europeos.

Cristina Fernández-García. Técnica de conexión con la comunidad científica y la sociedad.

Rüdiger Ortiz-Álvarez. Técnico de evidencia científica y tecnológica.

Sofía Otero. Técnica de evidencia científica y tecnológica.

Jose L. Roscales. Técnico de evidencia científica y tecnológica.

Equipo en prácticas

Claudia Pereira Domingues. Técnica en prácticas de la Oficina C.

Nelly Pérez Gutiérrez. Técnica en prácticas de la Oficina C.

Método de elaboración

Los Informes C son documentos sobre los temas seleccionados por la Mesa del Congreso que contextualizan y resumen la evidencia científica disponible para el tema de análisis. Además, recogen las áreas de consenso, disenso, las incógnitas y los debates en curso. Su proceso de elaboración se basa en una exhaustiva revisión bibliográfica que se complementa con entrevistas individuales y metodologías de consulta participativa y deliberativa basadas en el diálogo estructurado con el personal experto que posteriormente revisa el informe. La Oficina C colabora con la Dirección de Documentación, Biblioteca y Archivo del Congreso de los Diputados en este proceso.

Para la redacción del presente informe la Oficina C ha referenciado 237 documentos y consultado a un total de 25 personas expertas en la materia. Se trata de un grupo multidisciplinar en el que el 48 % pertenece a las ciencias físicas e ingenierías (ciencia de los materiales, física, ingeniería ambiental, ingeniería industrial, ingeniería mecánica, ingeniería de minas), el 28 % pertenece a las ciencias de la vida (ciencias ambientales, geología, química) y el 24 % a ciencias sociales, humanidades y economía (ciencias políticas, ciencias sociales, dirección de empresas, economía). El 68 % trabaja en centros o instituciones españolas mientras que el 32 % lo hace en una institución extranjera.

La Oficina C es la responsable del contenido del informe y actúa como supervisora editorial del mismo.

¹ Especialistas que también han participado en la revisión total o parcial del informe.

La transición energética hacia una economía descarbonizada en 2050 plantea nuevos desafíos para el suministro de materias primas minerales, necesarias para el desarrollo de las tecnologías e infraestructuras de las energías renovables.

La rapidez con la que crece la demanda de estos recursos, su distribución geográfica, la falta de sustitutos adecuados y asequibles, y su importancia para la economía global, los convierte en elementos de dependencia entre naciones, tensión geopolítica y herramientas de guerra comercial. La dependencia de estas materias primas minerales plantea desafíos geopolíticos, sociales y ambientales significativos, que deben tenerse en cuenta en un escenario en el que la Unión Europea (UE) busca reforzar su seguridad económica y autonomía estratégica. Todo ello con la finalidad de garantizar cadenas de suministro de materias primas minerales resilientes, seguras y sostenibles.

Este informe aborda la complejidad de las cadenas de valor de las materias primas minerales, sus impactos socioambientales y los desafíos económicos y de gobernanza que plantean a España y a la UE.

Materias primas fundamentales o críticas para la UE

Las materias primas fundamentales o críticas son aquellos elementos y recursos minerales que tienen gran importancia económica, y cuyo suministro tiene un elevado riesgo de sufrir interrupciones. La Comisión Europea ha identificado 34 materias primas fundamentales, de las cuales 17 son además consideradas estratégicas, ya que son esenciales para el funcionamiento y la integridad de sectores estratégicos como las energías renovables, la movilidad eléctrica, los ámbitos industrial, digital, aeroespacial y de la defensa. Algunos ejemplos incluyen el litio para la fabricación de baterías, el silicio metal para los paneles fotovoltaicos, las tierras raras para las turbinas eólicas, o los metales del grupo del platino para los electrolizadores empleados en la producción de hidrógeno. A la creciente demanda de materias primas minerales impulsada por la transición energética hay que sumar las exigencias en estos recursos del resto de sectores de la economía. Esto resulta en un desequilibrio entre la oferta y la demanda, que eleva el riesgo de rupturas en las cadenas de suministro de algunas materias primas.

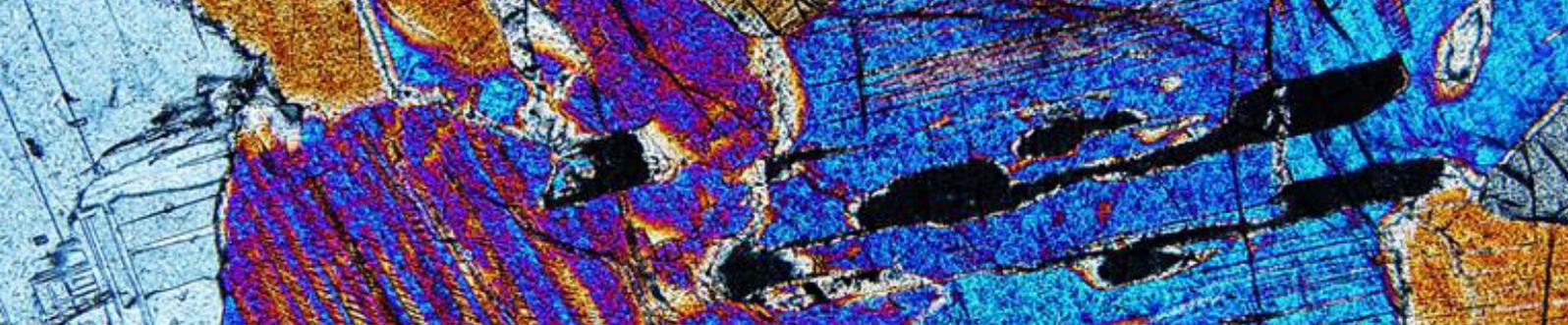
En el foco

La distribución geográfica de los recursos geológicos y el contexto geopolítico global son determinantes en la configuración del mercado de las materias primas minerales. La

elevada concentración geográfica de algunas materias primas minerales pone de manifiesto la hegemonía de ciertos países tanto a nivel de explotación minera como de procesamiento y refinado de los recursos minerales. Entre los proveedores a nivel mundial, destaca el papel de China (tierras raras), Rusia y Sudáfrica (metales del grupo del platino), Indonesia (níquel), Australia (litio), Estados Unidos (helio y berilio), Chile (cobre y litio), Brasil (niobio) y la República Democrática del Congo (cobalto), entre otros. Además, la competencia tecnológica entre EE.UU. y China, junto con las restricciones a la exportación de materias primas estratégicas por motivos de seguridad nacional, han generado una gran incertidumbre geopolítica en el comercio de estos recursos.

La producción de minerales en la UE, y por tanto España, no cubre las necesidades propias. Se trata de una región vulnerable con una alta dependencia de las importaciones de terceros países. Aun así, España es un país con tradición minera y recursos minerales propios, entre los que destaca la producción de minerales metálicos (cobre y estaño), minerales industriales, rocas ornamentales y productos de cantera. España puede aportar capacidad extractiva a la UE, para lo que necesita actualizar los datos sobre sus recursos geológicos, y tiene la oportunidad de incrementar su capacidad de procesamiento y refinado, haciendo uso de la innovación, las nuevas técnicas disponibles y las mejores prácticas sociales y ambientales, para generar productos de mayor valor añadido y reforzar la competitividad de su ecosistema industrial.

Por otra parte, la extracción de materias primas minerales y su procesamiento tienen un impacto directo sobre el medio ambiente y las comunidades locales, lo que puede generar oposición a los proyectos mineros tanto en España como en otras partes del mundo. Se pueden producir una serie de impactos negativos durante las distintas etapas del ciclo minero, que afectan al aire, el suelo y el agua, además de generar residuos peligrosos. A nivel social, la minería puede generar riqueza y empleo en las comunidades locales, pero también crear desigualdades sociales y económicas, desplazar comunidades y aumentar la competencia del suelo, así como producir cambios en la demografía y cultura de las mismas. Las desigualdades sociales pueden ser aún más agravantes en algunos países ricos en recursos minerales y con índices de gobernabilidad bajos, como ciertos países de América Latina o África.



Horizonte

La UE se enfrenta a diferentes desafíos sociales, económicos, ambientales y de gobernanza que aumentan el riesgo de perder competitividad en la transición energética. Este escenario ha llevado a

muchos países a adoptar políticas para garantizar el suministro resiliente, seguro y sostenible de materias primas fundamentales y de las tecnologías asociadas.

Para reforzar su autonomía estratégica, en el marco de la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales, la UE pretende aumentar la explotación de recursos mineros domésticos para producir al menos el 10 % del consumo anual de materias primas estratégicas de la UE y aumentar su capacidad de procesamiento para producir al menos el 40 % de su consumo anual en 2030. Para ello, impulsa el desarrollo de “proyectos estratégicos” que podrán tener procesos de permisos simplificados para agilizar los trámites y autorizaciones de los proyectos mineros. También pretende diversificar sus fuentes de suministro de manera que ningún tercer país represente más del 65 % del consumo anual de la UE para una materia prima estratégica concreta. La promoción de un ecosistema industrial ligado al territorio, que incluya varios eslabones de las cadenas de suministro, aumenta el valor añadido de los productos y genera riqueza y conexión con diferentes mercados.

El aumento en la demanda de recursos minerales pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la coordinación de los estándares de desempeño social y ambiental. Se busca llevar a cabo una transición energética que minimice los impactos negativos y se adapte al desarrollo de las comunidades locales. La creación de procesos participativos desde las fases iniciales de los proyectos de minería, la comunicación transparente y el cumplimiento de buenas prácticas sociales y ambientales son algunos de los mecanismos que pueden ayudar a establecer una relación de confianza entre las empresas, los gobiernos y las comunidades locales. Del mismo modo, el fomento de la economía circular y el diseño ecológico, basados en la reparación y reutilización de las tecnologías, y en el reciclado de las materias primas, pueden ayudar a reducir la presión sobre la extracción primaria de los recursos minerales. La UE tiene como objetivo aumentar su capacidad de reciclado para cubrir al menos el 25 % del consumo anual de materias primas estratégicas, y recuperar cantidades cada vez mayores de cada materia prima. Sin embargo, aún es necesario superar ciertas barreras para que el reciclado sea técnicamente viable y económicamente más competitivo.

Materiales y materias primas en la transición energética

Introducción

La transición energética demanda un gran volumen de materias primas minerales, generando competencia global. La UE, a través de La Ley Europea de Materias Primas Fundamentales, ha diseñado una estrategia para garantizar el abastecimiento de estos recursos minerales y fortalecer su autonomía estratégica abierta.

La transición energética hacia una sociedad y economía **climáticamente neutras** en 2050 pretende alejarse de la dependencia de los combustibles fósiles¹⁻³, pero supone la aparición de nuevos retos para el abastecimiento de ciertos materiales y materias primas minerales⁴.

Para cumplir con la neutralidad climática, la Unión Europea (UE) apuesta por la descarbonización del sector energético a través del desarrollo de un sistema eléctrico basado en energías renovables, con el fin de **electrificar** todos los usos finales de la energía posibles⁵. En el caso de sectores difíciles de electrificar⁶ (procesos industriales consumidores de calor de alta temperatura, transporte marítimo, aviación y terrestre pesado, etc.), propone la incorporación de alternativas energéticas renovables, como el **hidrógeno renovable**⁷. En este sentido, las materias primas minerales son indispensables para el desarrollo de las tecnologías e infraestructuras asociadas a la producción, almacenamiento, distribución y consumo de energía renovable en sus diferentes usos^{4,8,9}. Tanto es así, que se prevé un aumento de la demanda de materias primas minerales seis veces mayor que la actual para hacer una transición a tecnologías limpias y alcanzar la neutralidad climática en 2050⁴.

A efectos del presente informe, las materias primas se refieren a aquellos elementos, metales, minerales y materiales naturales procedentes de la actividad minera¹⁰. No incluyen las materias primas de origen agrícola ni aquellas empleadas en la producción de energía. La Comisión Europea distingue las **materias primas fundamentales** (también denominadas “críticas”) como aquellas que tienen gran importancia económica para la UE y cuyo suministro tiene un elevado riesgo de sufrir interrupciones¹¹. Esto se debe a que su producción está concentrada en unos pocos países y a la falta de sustitutos adecuados y asequibles^{10,11}. El último listado de materias primas fundamentales publicado por la Comisión Europea comprende 34 elementos (**Cuadro 1**). Algunas de ellas adquieren la categoría de **materias primas estratégicas**, que son esenciales para el funcionamiento y la integridad de sectores estratégicos como las energías renovables, la movilidad eléctrica, o los ámbitos industrial, digital, aeroespacial y de la defensa¹¹. El riesgo de alteraciones en el suministro y la fuerte competencia de estos recursos esenciales para sectores clave de la economía global, posiciona a las materias primas minerales como elementos de dependencia entre naciones, tensión geopolítica y herramientas de **guerra comercial**¹¹⁻¹³.

Teniendo en cuenta estas tendencias, diferentes países y regiones están adaptando medidas para garantizar el acceso a un suministro seguro y sostenible de materias primas minerales^{4,14-16}. En este sentido, en 2024 ha entrado en vigor la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales¹¹, que tiene como objetivo fortalecer la resiliencia económica y la **autonomía estratégica** abierta de la UE. Esta propuesta se construye sobre iniciativas previas como el Plan de Acción de Materias Primas Fundamentales de 2020¹⁷ y la Iniciativa Europea de Materias Primas de 2008¹⁸. Además, está en consonancia con otras disposiciones políticas ligadas a este ámbito como la estrategia del Pacto Verde Europeo³, la Legislación Europea sobre el Clima¹, o la actualización del nuevo modelo de industria de 2020¹⁹, entre otras. Las materias primas fundamentales cobran un papel central en la próxima Comisión Europea (2024-2029) dentro de iniciativas como el Pacto de Industria Limpia²⁰. España sigue los planteamientos

• **Neutralidad climática:** El objetivo de la UE implica alcanzar en 2050 emisiones netas cero de gases de efecto invernadero dentro de la Unión.

• **Electrificación:** Proceso de sustituir los combustibles fósiles por electricidad en los usos finales de la energía.

• **Hidrógeno renovable:** Hidrógeno producido mediante la electrólisis del agua usando electricidad procedente de energías renovables. Las emisiones de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de vida de la producción de hidrógeno renovable son casi cero. También podrá producirse a partir del reformado de biogás o conversión bioquímica de biomasa si se cumplen los requisitos de sostenibilidad.

• **Guerra comercial:** Conflicto económico derivado de la imposición de aranceles y otras medidas mercantiles contra uno o varios países, que responden con represalias.

• **Autonomía estratégica de la UE:** Deseo de la Unión Europea de mejorar su capacidad de actuar de forma independiente y hacer valer sus intereses en la escena mundial, en particular en los ámbitos de la seguridad, la defensa, la política exterior y la política económica.

estratégicos de la UE y ha publicado una Hoja de Ruta para la gestión sostenible de Materias Primas Minerales². Esta incluye 46 actuaciones de corte regulatorio, sectorial, de impulso a la I+D+i y otros instrumentos transversales para apoyar a la industria de las materias primas en la creación de cadenas de valor sostenibles y eficientes que contribuyan a un desarrollo industrial europeo sostenible y competitivo²¹.

La criticidad de los recursos minerales viene determinada por factores económicos, geopolíticos y técnicos. El listado de la UE está formado por 34 materias primas fundamentales, de las cuales 17 son consideradas estratégicas.

Cuadro 1: Materias primas fundamentales en la Unión Europea¹¹

La Comisión Europea publica cada tres años un listado actualizado de materias primas fundamentales. Desde la primera publicación en 2011, en el que se identificaron 14, el listado no ha dejado de incorporar nuevos elementos (20, 27 y 30 materias primas fundamentales en los años 2014, 2017 y 2020, respectivamente)²². En la última actualización de 2023 se evaluaron 87 elementos²³, de los cuales se definieron 34 materias primas fundamentales, 17 de ellas estratégicas (resaltadas en negrita):

Antimonio	Cobre	Litio	Escandio
Arsénico	Feldespato	Magnesio	Silicio metal
Bauxita/alúmina/aluminio	Fluorita	Manganeso	Estroncio
Barita	Galio	Grafito natural	Tántalo
Berilio	Germanio	Níquel	Titanio metal
Bismuto	Hafnio	Niobio	Wolframio
Boro	Helio	Fosforita	Vanadio
Cobalto	Tierras raras pesadas*	Fósforo	
Coque de carbón	Tierras raras ligeras**	Metales del grupo del platino***	

***Tierras raras pesadas**^{24,25}: **terbio, disprosio**, holmio, erbio, tulio, iterbio, lutecio e itrio.

****Tierras raras ligeras**^{24,25}: **lantano, cerio, praseodimio, neodimio**, prometio, **samario**, europio y **gadolinio**).

*****Metales del grupo del platino**: **rutenio, paladio, osmio, iridio, rodio y platino**.

La UE cuenta con el Sistema de información de materias primas, RMIS (por sus siglas en inglés, "Raw Materials Information System"). Ofrece un perfil de cada materia prima que permite ahondar en aspectos económicos, comerciales, flujos de reservas, usos principales, y aspectos medioambientales y sociales²⁶.

Los factores que determinan la "criticidad" de las materias primas minerales dependen de cada región²⁷, y están sujetos a factores económicos (relevancia para la industria nacional, diplomacia comercial, etc.), geopolíticos (cálculo de riesgos de disrupción en el suministro, [índice de gobernabilidad](#) de países proveedores de materias primas, etc.) y técnicos ([recursos y reservas minerales](#)²⁸ nacionales, capacidad de sustitución del material, reciclado, etc.) que pueden ir cambiando a lo largo del tiempo^{23,29-31}. Además, cada región puede considerar factores diferentes para identificar sus materias primas fundamentales. Por ello, a nivel internacional, las listas incluidas en las estrategias de los diferentes países pueden diferir en el número y el tipo de minerales identificados. Por ejemplo, la lista de materias primas críticas del Servicio Geológico de Estados Unidos de 2022, incluye 50 minerales³²; la lista de 2022 de Canadá, 31¹⁶; y el listado de 2023 de Australia, 26³³. En España, la Subdirección General de Minas (MITERD) encomendó al Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) en 2022 el diseño de una metodología para elaborar la lista nacional de materias primas fundamentales. La lista resultante tiene en cuenta indicadores de importancia económica, riesgo de suministro, índice de transición energética y el reto demográfico, y pone de manifiesto algunas diferencias con respecto a la de la UE. Aun así, las actuaciones previstas para dar respuesta a lo establecido en la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales utilizarán la lista de la UE como referencia.

· [Índice de gobernabilidad](#): Índice que trata de medir la calidad institucional y democrática de cada país productor o exportador de un mineral. Se calcula en función de una serie de indicadores de gobernanza que publica anualmente el Banco Mundial.

· [Recurso mineral](#): Depósito mineral de interés económico dentro o sobre la corteza terrestre en tal forma, ley (o calidad) y cantidad que hay expectativas razonables para una eventual extracción económica.

El papel de las materias primas minerales en la transición energética

La transición energética europea, un proceso multidimensional que abarca lo digital, industrial, ecológico y social, depende de un suministro seguro de materias primas minerales.

Las materias primas minerales son esenciales para el funcionamiento de los sectores estratégicos de la economía europea, como las energías renovables, la movilidad eléctrica, las tecnologías de la información, aeroespacial y de defensa, debido a su uso en la fabricación de productos clave, como baterías, paneles solares y componentes electrónicos.

La transición energética está impulsando una demanda sin precedentes de materias primas minerales, lo que puede generar una brecha entre la oferta y la demanda de ciertos recursos minerales y elevar el riesgo de disrupción en sus cadenas de suministro.

La transición energética enmarcada dentro del Pacto Verde Europeo constituye a su vez una transición digital, industrial, ecológica y social³. Todas ellas confluyen en un punto en común: el requerimiento de materias primas minerales. Estas son necesarias para el desarrollo de las infraestructuras y tecnologías asociadas a las energías renovables y la digitalización de todos los sectores, reforzar la competitividad industrial y alcanzar la sostenibilidad económica, social y ambiental^{34,35}.

Demanda de minerales: competencia entre sectores y tecnologías

Sectores y aplicaciones tecnológicas intensivos en materias primas minerales

Las materias primas minerales se sitúan al principio de todas las **cadena de valor** industriales³⁶. Se encuentran de manera omnipresente en todos los sectores, ya que la mayoría de los objetos que utilizamos están fabricados con ellas. Dada la competencia por los recursos, es relevante asegurar el suministro de materias primas fundamentales en los sectores estratégicos para la economía y el funcionamiento del mercado interior de la UE¹¹. Estos sectores estratégicos son: las energías renovables, la movilidad eléctrica, la industria, las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC), y los ámbitos aeroespacial y de la defensa^{8,11}.

En el sector de las energías renovables, el uso de materias primas minerales destaca en las tecnologías asociadas a la producción de energía eólica (turbinas eólicas), solar (paneles fotovoltaicos) e **hidrógeno renovable** (**electrolizadores** y **pilas de combustible**), así como en las baterías para el almacenamiento de la energía y las redes eléctricas para su distribución^{4,8}. Las tecnologías clave en la movilidad eléctrica comprenden las baterías, pilas de combustible, motores eléctricos y componentes eléctricos^{8,37}. La industria intensiva en energía puede favorecerse de la aplicación de bombas de calor e hidrógeno en sus procesos³. El sector de las TIC, además de revolucionar su campo con el desarrollo de tecnologías disruptivas (inteligencia artificial, tecnología 5G y 6G³⁸, cuántica), es transversal a todos los sectores de la economía, e incluye tecnologías asociadas a servidores, almacenes de datos, redes de transmisión de datos, microchips y aparatos electrónicos como ordenadores y teléfonos móviles, entre otros^{8,13}. La robótica, drones y satélites son clave para los ámbitos aeroespacial y de la defensa⁸. En el **Cuadro 2** se proporciona más información sobre la composición en materias primas minerales de algunas tecnologías para energías renovables y movilidad eléctrica, por ser las principales impulsoras del crecimiento en la demanda de materias primas^{4,8,39}.

Un aumento de la demanda sin precedentes

La demanda de materias primas fundamentales ha experimentado un auge vertiginoso en los últimos años, con los sectores de las energías renovables y la movilidad eléctrica como los principales impulsores de este crecimiento^{4,8,39}. En estos sectores, la invasión rusa de Ucrania ha supuesto un elemento de presión geopolítica para acelerar la transición energética y reducir las dependencias de gas y petróleo rusos (**plan REPowerEU**⁷⁸). Por tanto, son sectores que tienen una alta previsión de crecimiento en las próximas décadas y cuyas tecnologías son muy intensivas en materiales⁸. Esto implica un aumento en la demanda de materias primas fundamentales sin precedentes para poder alcanzar los objetivos de neutralidad climática⁸. En escenarios impulsados por el cumplimiento de los Acuerdos de París en 2040, la demanda de materias primas minerales para su uso en vehículos eléctricos y baterías para el almacenamiento de energía se estima que se multiplique por 30 con respecto a los valores de 2020^{2,4}.

- **Reserva mineral:** Parte económicamente explotable de un recurso mineral en un contexto de mercado determinado.
- **Cadena de valor de las materias primas:** Todas las actividades y procesos que intervienen en la exploración, la extracción, el procesamiento y el reciclado de las materias primas.
- **Electrolizador:** Dispositivo que mediante la aplicación de electricidad es capaz de separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno.
- **Pila de combustible:** Dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química del hidrógeno en energía eléctrica.
- **Plan RePowerEU:** Plan para reducir rápidamente la dependencia con respecto a los combustibles fósiles rusos y avanzar con rapidez en la transición ecológica.

Las materias primas minerales son esenciales para fabricar componentes de tecnologías renovables como paneles solares, turbinas eólicas, electrolizadores y baterías.

Cuadro 2. Materias primas minerales empleadas en la generación de energía solar, eólica, hidrógeno y baterías

Tecnología	Materias primas y avances en I+D
<i>Solar fotovoltaica</i>	El silicio metal es el material semiconductor más utilizado en la fabricación de paneles solares debido a su estabilidad y coste ^{40,41} . Abarca alrededor del 90 % del mercado actual. Se requiere una pureza extremadamente alta para aplicaciones solares, además del uso de fósforo o boro para dopar el silicio ⁸ . Los metales juegan un papel crucial en la construcción de los contactos eléctricos, sobre todo el aluminio, y en menor medida, el cobre y la plata ⁸ . Otras tecnologías fotovoltaicas comerciales utilizan diferentes materiales semiconductores, como el telurio de cadmio (CdTe) y el diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) ^{8,42,43} . Se avanza hacia el uso de nuevos materiales altamente eficientes como las perovskitas ⁴⁴⁻⁴⁶ y celdas de compuestos orgánicos ⁴⁷ que, por sus propiedades de flexibilidad y color, permiten una mejor integración de la tecnología fotovoltaica en diferentes ámbitos y superficies (interior de edificios, agrivoltaica, ventanas semitransparentes, textil, etc.) ⁴⁸ . La Estrategia de Energía Solar de la UE coloca a la energía solar como eje central para reducir la dependencia de los combustibles fósiles en todos los sectores de la economía ⁴⁹ . Algunos ejemplos de proyectos europeos que abordan estos temas son RESILEX ⁵⁰ y PHOTORAMA ⁵¹ .
<i>Eólica</i>	Las turbinas eólicas requieren boro y tierras raras como praseodimio, neodimio, terbio y disprosio para los imanes permanentes de los motores , así como aluminio, cobre y acero para su estructura ⁵²⁻⁵⁵ . La I+D está avanzando en la producción, recuperación y reciclado, eficiencia, reducción y sustitución de imanes permanentes ⁸ . Algunos ejemplos de proyectos europeos que abordan estos temas son BEETHOVEN ⁵⁶ , REEcycle ⁵⁷ o REF MAG ⁵⁸ .
<i>Hidrógeno renovable</i>	Las necesidades de materias primas dependen del tipo de electrolizador y pila de combustible empleados en la producción y consumo de hidrógeno ^{4,59} . Estas tecnologías pueden requerir metales del grupo del platino, tierras raras, grafito natural, cobre, níquel y aluminio, entre otros ^{60,61} . Se avanza en la reducción de la cantidad de iridio y platino en estos equipos ⁴ , en su potencial sustitución ⁸ , y en aumentar la durabilidad y estabilidad de los materiales en la producción de hidrógeno ⁶² . El Partenariado de Hidrógeno Limpio ⁶³ es uno de los principales mecanismos de financiación de proyectos de investigación en este ámbito, que van en línea con los objetivos de la Estrategia Europea del Hidrógeno ⁶⁴ .
<i>Baterías para movilidad eléctrica y almacenamiento de energía</i>	Las baterías de ion-litio son la tecnología predominante del mercado ⁴ . Pueden requerir un abanico amplio de materiales, entre los que destacan el litio, el manganeso, el cobalto, el níquel, el grafito natural, el cobre, el fósforo, o el aluminio ⁸ . Se avanza en mejorar su densidad energética, durabilidad, seguridad y reciclado, así como la reducción y sustitución de materias primas fundamentales ^{65,66} . Otras tendencias en I+D incluyen el desarrollo de baterías de estado sólido ⁶⁷ , que ofrecen mayor densidad de energía, y baterías de sodio y otros elementos ^{4,68,69} , que requieren menos materias primas fundamentales que las baterías de ion-litio. La UE está impulsando el ecosistema de las baterías a través de plataformas como la Alianza Europea de Baterías ⁷⁰ , la Academia Europea de las Baterías ⁷¹ , Battery 2030+ ⁷² o Batteries Europe ⁷³ . Algunos ejemplos de proyectos europeos que abordan estos temas son CarE-Service ⁷⁴ , Free4LIB ⁷⁵ , Renovate ⁷⁶ y Respect ⁷⁷ .

⁴ **Imán permanente:** Imán que conserva su magnetismo tras haber sido retirado de un campo magnético externo.

Pero no todas las materias primas minerales tienen las mismas previsiones de crecimiento en su demanda, ya que dependen de las diferentes actividades económicas y tecnologías en las que se apliquen⁷⁹. El aluminio se considera un material de gran volumen; se obtiene a partir de materias primas abundantes con una amplia distribución geográfica y la transición energética no va a suponer un aumento significativo de su demanda total^{80,81}. Por otro lado, se prevé que el litio experimente el crecimiento más rápido en la demanda⁸². Las tecnologías de las energías renovables y movilidad eléctrica pueden llegar a representar en 2040 un aumento de la demanda de litio 40 veces superior a los valores de 2020, seguido por el grafito, cobalto y níquel (entre 20-25 veces) y las tierras raras (7 veces)^{2,4}. Asimismo, la expansión de las redes eléctricas significa que la demanda de cobre para las líneas de la red puede duplicarse con creces durante el mismo período². Sin embargo, estas estimaciones pueden variar debido a cambios en la demanda de vehículos eléctricos o en la composición de las baterías. Por ello, la tendencia de los precios es una buena opción para medir la escasez en el suministro de un mineral⁸³.

Los riesgos de disrupción en el suministro de las materias primas minerales derivan de la interacción entre múltiples factores (rapidez de crecimiento de la demanda, contexto geopolítico, competencia entre sectores y aplicaciones, cuestiones logísticas y administrativas de las cadenas de suministro, y consideraciones ambientales y sociales, entre otros.) y resultan en un desacoplamiento entre la oferta y la demanda en el mercado⁴. En el lado de la oferta, a medida que se agotan los yacimientos más fácilmente extraíbles habrá que recurrir a otros con una concentración menor de los minerales de interés y que serán más difíciles de acceder, por encontrarse a mayores profundidades. Esto supone un mayor gasto energético para su explotación y un aumento de los costes de producción. Además, puede generar mayores impactos en las personas y el medio ambiente, y generar mayores cantidades de residuos mineros⁴³. Por otro lado, la demanda presenta una elevada velocidad de crecimiento para ciertos minerales, asociada a las tecnologías energéticas, de movilidad y digitales. Sin embargo, estas aplicaciones representan tan solo una parte de la demanda total, que debe completarse con las necesidades del resto de sectores de la economía⁷⁹. En este contexto, algunos estudios indican la necesidad de aplicar medidas dirigidas a reducir la demanda y la presión sobre la **extracción primaria de minerales**^{81,84-86}. Las propuestas incluyen alargar la vida útil de las tecnologías^{81,84}, aumento del reciclado^{81,84}, limitar el tamaño de baterías^{81,84}, dar una segunda vida a baterías de vehículos eléctricos en almacenamiento de energía^{81,84}, sistemas alternativos de movilidad urbana⁸⁷ e, incluso, modelos de **postcrecimiento**⁸⁸⁻⁹⁴. En los escenarios de postcrecimiento se reflexiona sobre qué materias primas se necesitan y en qué cantidades para ajustar la demanda a unos niveles de bienestar social equitativo, donde se consiga un equilibrio del consumo entre las partes más y menos consumidoras de recursos de la sociedad⁹⁵.

Concentración desigual de recursos minerales

Mirada a un nuevo tablero geopolítico global

Las diferentes materias primas minerales están distribuidas geográficamente a lo largo de la **corteza terrestre** de manera desigual². Algunas partes pueden presentar estos elementos en concentraciones más elevadas, formando lo que se denomina un yacimiento o depósito mineral⁹⁶. Aunque existan yacimientos conocidos potencialmente explotables de un elemento en muchos países (denominados recursos minerales), solo es rentable extraerlo en unos pocos lugares (conocidos como reservas minerales)⁴³. La distribución de algunas materias primas minerales está mucho más concentrada a nivel geográfico que la del petróleo o el gas natural, de manera que se introducen nuevos patrones de comercio en los que intervienen nuevos países y diferentes consideraciones geopolíticas⁴. La comunidad experta señala

La distribución geográfica de los recursos geológicos y el contexto geopolítico global son determinantes en la configuración del mercado de las materias primas minerales.

- **Materias primas primarias:** Material natural terrestre obtenido a partir de la extracción minera y del que se puede obtener un beneficio económico.
- **Postcrecimiento:** Sociedad y/o economía que haya superado la orientación al objetivo del crecimiento económico y que pone la atención en medidas públicas que contribuyen al bienestar social.
- **Corteza terrestre:** Parte sólida más superficial de la Tierra, que supone menos del 1% de la masa terrestre. La mayor parte de la corteza terrestre está constituida por ocho elementos principales: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, magnesio, y potasio. Estos se combinan para formar la mayor parte de minerales y rocas. Los elementos minoritarios, entre los que se incluyen los metales, están presentes en la corteza en concentraciones medias extremadamente bajas.

que es improbable que cambien los actores de producción en el corto plazo, debido a los largos períodos de tiempo que transcurren para poner en marcha una nueva explotación minera, entre otros factores^{4,97}.

China es el principal proveedor mundial de diferentes materias primas fundamentales, entre las que destacan las tierras raras, de las que produce un 58 % y procesa un 80 % en su territorio aproximadamente, según datos del 2020^{24,83} (**Cuadro 3**). Otros proveedores relevantes son Rusia y Sudáfrica (metales del grupo del platino), Indonesia (níquel), Australia (litio), Estados Unidos (helio y berilio), Chile (cobre y litio), Brasil (niobio) y la República Democrática del Congo (cobalto), entre otros^{23,29}. La concentración geográfica de recursos pone en evidencia la hegemonía de ciertos países. En algunos casos, un solo país es responsable de alrededor de la mitad de la extracción mundial⁴. Es el caso de la República Democrática del Congo (RDC), China y Australia, que en 2019 fueron responsables de aproximadamente el 70 %, el 60 % y el 50 % de la extracción mundial de cobalto, tierras raras y litio, respectivamente⁴. El nivel de concentración es aún mayor para las operaciones de procesamiento de minerales, donde China tiene una fuerte presencia en todos los ámbitos: alrededor del 80 % del procesado de tierras raras, 70 % de cobalto, y casi el 60 % de litio y manganeso^{4,29,83}.

La estrategia a largo plazo de China para asegurar el suministro de tierras raras y otros minerales estratégicos ha sido fundamental para su ascenso como potencia industrial. Las restricciones chinas en las exportaciones de ciertos minerales estratégicos generan una distorsión en los mercados y una creciente tensión geopolítica.

Cuadro 3. ¿Cómo ha logrado China convertirse en el líder del sector de las materias primas?

La competencia geopolítica no reside solo en la innovación tecnológica, sino en el acceso a las materias primas minerales, esenciales para su desarrollo¹². China ha sabido concebir las tierras raras como un recurso estratégico y, desde mediados de la década de 1980, ha implantado medidas para el desarrollo del sector de las materias primas minerales. Tras una política de desgravaciones fiscales a las exportaciones, en la década de 1990, comienza a aplicar un enfoque proteccionista, que prohíbe a las empresas extranjeras la extracción de tierras raras dentro de China y restringe su participación en proyectos de procesamiento¹². Además, comienza a crear cuotas para desincentivar la exportación de materias primas minerales y fomentar el desarrollo de productos de mayor valor añadido dentro de sus fronteras¹². Con su política "Go Global", ha fomentado la inversión en el sector minero en Latinoamérica y África para asegurarse un suministro seguro de materias primas minerales y no limitar su desarrollo⁹⁸. Las empresas chinas han mostrado una alta tolerancia al riesgo político y económico gracias al respaldo de su gobierno y a la capacidad del país de adoptar estrategias a largo plazo⁹⁸.

De esta manera China se consolida como el primer productor de materias primas minerales. Domina también el procesamiento y la fabricación de componentes necesarios para la transición energética y digital. Consciente de esta ventaja, ha utilizado el comercio de determinadas materias primas minerales como instrumento de guerra comercial. En 2010, cortó las exportaciones de tierras raras a Japón alegando motivos medioambientales por una disputa en las islas Senkaku, caso que fue denunciado por EE. UU., Japón y la UE ante la Organización Mundial del Comercio^{4,99}. En 2023, China implantó nuevas restricciones a las exportaciones de minerales estratégicos alegando motivos de seguridad nacional (galio y germanio para la fabricación de microchips en tecnología militar; grafito, para baterías, y tierras raras, para imanes permanentes)⁹⁹. Ante esta justificación, la tensión entre China y EE. UU. está distorsionando el mercado de estos recursos, en el que cada vez tiene más peso la geopolítica⁹⁹.

La minería submarina y de asteroides son potenciales fuentes de recursos minerales a futuro, que presentan numerosos desafíos para su explotación.

Cuadro 4: La exploración de nuevas fronteras: minería submarina y espacial

El incremento de la demanda ha puesto el foco en zonas no convencionales del planeta para la extracción de materias primas minerales. En este contexto se encuentra la minería submarina, que ofrece oportunidades para la exploración y posible explotación de metales como el níquel, cobre, cobalto y tierras raras⁹⁶. Este tipo de minería plantea numerosos desafíos a nivel técnico (elevadas presiones, oscuridad total, temperaturas extremas, etc.). Además, genera dudas sobre el potencial impacto de esta actividad en los ecosistemas marinos (potencial toxicidad de metales y sedimentos liberados al océano)⁹⁶ y su impacto socioeconómico (actividad pesquera, comunidades locales, geopolítica, etc.)^{104,105}. Las investigaciones avanzan en conocer la calidad de los recursos marinos, para lo que se está desarrollando tecnología de minería submarina en colaboración con otros sectores que ya trabajan en este medio (petróleo y gas)⁹⁶. Algunos países han realizado proyectos de exploración minera en sus jurisdicciones nacionales (**zona económica exclusiva**), como Noruega, Papúa Nueva Guinea o Japón⁴. El marco normativo para la explotación en aguas internacionales, cuya competencia se atribuye a la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos, está aún pendiente de formularse^{106,107}. A pesar del potencial y el interés creciente de algunos países¹⁰⁸, en la comunidad científica y experta, así como en la Comisión Europea^{11,109}, rige el principio de cautela, hasta que se conozcan los efectos y riesgos de dicha actividad en el medio marino¹¹⁰⁻¹¹³.

Otra opción a futuro es la minería de **asteroides**¹¹⁴. Actualmente se está estudiando la composición en minerales de los asteroides cercanos a la Tierra a través de técnicas de caracterización remotas, con telescopio, y otras técnicas *in situ* a través de misiones¹¹⁵⁻¹¹⁷. Aunque la explotación minera de asteroides plantea muchos retos e incertidumbres a nivel técnico, podría ser una opción con potencial para minerales que tienen precios muy elevados, como los metales del grupo del platino⁴³. Existen varias empresas especializadas en este campo, como por ejemplo Planetary Resources¹¹⁸, Asteroid Mining Corporation¹¹⁹ o Trans Astronautica Corporation¹²⁰. Sin embargo, la minería espacial tiene poco potencial para satisfacer la demanda de minerales para la descarbonización inmediata en la Tierra¹²¹.

España alberga una gran variedad de recursos minerales, entre los que destaca el cobre y el estroncio. Se necesita actualizar la información geológica para identificar nuevas oportunidades de explotación.

España: un país con tradición minera

España es el tercer país de Europa con más recursos mineros⁹⁶. Según datos de 2022, su industria extractiva, constituida por la producción de minerales metálicos, no metálicos, rocas y minerales industriales, cuenta con alrededor de 2.700 explotaciones activas, emplea a más de 29.000 personas y supera los 3.900 millones en facturación^{122,123}. Actualmente, la minería de metales es el motor de la minería española^{122,124}. Además, cuenta con una industria que lidera la producción de otros materiales que, aunque no son necesariamente catalogados como fundamentales según la UE, son cruciales para la economía española. Se trata de determinados minerales industriales (feldespato, magnesita, potasa, caolín, celestina, y arcillas especiales que incluyen atapulgita, sepiolita y bentonita), rocas ornamentales (calizas y mármoles, granitos y pizarras de techar) y productos de cantera (yeso, margas, arenas y gravas)^{122,123}.

En relación con las materias primas fundamentales, España es el segundo productor de mineral de cobre y el único productor de estroncio dentro de la UE¹²². Proporciona el 34 % del suministro global de estroncio a la UE, además de cantidades menores de feldespato, wolframio y silicio metal²³. Asimismo, se produce espato flúor y tántalo, y existen depósitos identificados de antimonio, barita, bismuto, cobalto, litio y tierras raras². Aunque estos recursos se encuentran distribuidos por todo el territorio nacional, la mayor parte se concentran en el noroeste de la península, en el llamado Macizo Ibérico¹²⁵⁻¹²⁷. En la Zona Sudportuguesa destaca la Faja pirítica ibérica, que se extiende desde Sevilla hasta Lisboa y supone la mayor concentración de sulfuros masivos del planeta, donde se puede encontrar azufre, hierro, cobre, zinc, plomo, plata y oro^{122,128}. En la Zona Centro Ibérica está el Cinturón ibérico de estaño y wolframio, que comprende Galicia, el noroeste de Castilla y León y Extremadura, donde se encuentran depósitos de estaño y wolframio que pueden llevar asociados litio, niobio, tántalo, berilio y

· **Zona económica exclusiva:** Área entre la costa de un Estado hasta 200 millas marinas en la que el estado soberano tiene derechos especiales en relación con la exploración, explotación, conservación y administración de los recursos naturales vivos y no vivos.

· **Asteroide:** Cuerpo rocoso del sistema solar, de dimensiones inferiores a 1000 km de diámetro y que frecuentemente gira alrededor del sol entre las órbitas de Marte y Júpiter.

tierras raras, entre otros^{102,129,130}. Otros yacimientos de interés se localizan en la Zona de Ossa Morena (hierro, plomo, zinc, cobre, níquel, elementos del grupo del platino, oro y plata)¹³¹, en la Zona Cantábrica (fluorita, barita, plomo, zinc, cobre, níquel, cobalto, hierro y manganeso)¹³² y en la Zona Asturoccidental Leonesa (hierro, plomo, zinc, cobre, plata, oro, molibdeno, antimonio, manganeso, wolframio, arsénico y cobalto, además de coque de carbón)¹³³. España cuenta con alrededor de 40 proyectos de minería metálica, que pueden encontrarse en fase de producción, de desarrollo, de obtención de permisos e investigación, o bien se encuentran paralizados^{96,97}. España también tiene una capacidad de procesamiento y refinamiento de minerales competitiva, particularmente en lo referente al cobre, aluminio y zinc^{23,134}.

Un número importante de estos recursos fueron identificados durante campañas de exploración realizadas hasta la década de 1980, momento a partir del cual el interés por la minería comenzó a decaer². El Instituto Geológico y Minero de España atesora un gran conocimiento sobre la cartografía y geología nacional, que está disponible en sus sistemas de información, entre los que destacan el Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000, el mapa GEODE de cartografía continua¹³⁵ y la Base de Datos de Indicios Mineros (BDMIN)¹³⁶, entre otros. Una acción prioritaria para el instituto es la actualización de la información recogida y el diseño de un programa nacional de investigación público-privada para realizar nuevas exploraciones y conocer qué materias primas minerales podrán explotarse en el territorio español².

Una cadena de valor globalizada

El ciclo de vida de las tecnologías de la transición energética se inicia con la extracción de minerales, continúa con procesos de manufactura de productos tecnológicos y culmina con la gestión de los productos a través de la reparación, reutilización y reciclaje.

Las cadenas de valor de las materias primas minerales y las tecnologías asociadas forman un ecosistema complejo, deslocalizado y altamente fragmentado⁹⁹. La UE, en su esfuerzo por reducir la dependencia y diversificar sus relaciones, necesita abordar un enfoque multinivel¹², lo que implica dirigir medidas hacia todas las etapas de la cadena de valor. Esta comprende todas las actividades y procesos del ciclo minero, que resultan en la extracción primaria de materias primas minerales y su procesamiento, y se conecta con las actividades de manufactura de las tecnologías a desarrollar^{96,137}. Además, incluye los procesos de reparación y reutilización de productos tecnológicos y reciclado de los minerales. Ello supone un **flujo secundario de materias primas** que tiene el potencial de cubrir parte de la demanda y disminuir la presión sobre su extracción primaria. A continuación, se describen de manera simplificada las diferentes etapas de la cadena de valor:

Etapas del ciclo minero: Comienza con la **exploración e investigación minera**, cuyo objetivo es la búsqueda y caracterización de un yacimiento mineral⁹⁶. Se trata de una etapa con alto nivel de riesgo para las empresas (1 de cada 500-1.000 proyectos llega a la fase de explotación¹³⁸). Implica una inversión económica sustancial y a largo plazo, dado que esta fase puede prolongarse hasta 10 años¹³⁹. Se continúa con una **evaluación del yacimiento (recursos y reservas)**, en la que se analiza la viabilidad técnica y económica del proyecto. En España, la titularidad de los derechos de los recursos minerales forma parte del dominio del Estado, por lo que es necesario tramitar con la Administración una licencia de operación (competencia transferida a las comunidades autónomas)^{96,140}. Cuando el proyecto es técnica, económica y ambientalmente viable y cuenta con la aprobación administrativa, comienza la etapa de **explotación minera**, en la que se extrae y procesa el mineral del yacimiento. Las minas pueden ser a cielo abierto o subterráneas⁹⁶. Dependiendo del tipo de material y la calidad del recurso, la práctica minera conlleva generalmente la generación de un alto volumen de residuos, que son almacenados y tratados. Los productos de la mina son trasladados a la planta de tratamiento mineralúrgico, que se encuentra normalmente en las inmediaciones de la mina. En la planta, se tratan los elementos extraídos y se concentran. Durante todas las etapas del ciclo minero, se deben realizar labores de **rehabilitación del medio** para reducir los impactos ambientales y sociales asociados a la extracción. Estas medidas se recogen en los documentos de evaluación de impacto ambiental y en un plan de restauración, que se incluyen de manera obligatoria antes de comenzar el proyecto. En la fase final de cierre de la mina, debe dejarse un espacio rehabilitado⁹⁶. La digitalización de los procesos que comprenden el ciclo minero y el procesamiento posterior supone una de las principales líneas de innovación en el sector (**Cuadro 5**).

· **Materias primas secundarias:** Material obtenido de un proceso de recuperación y reciclaje de otros materiales y desechos.

La digitalización y la automatización están transformando la minería, lo que permite una explotación más segura y eficiente de los recursos minerales a través de tecnologías como la inteligencia artificial y la robótica.

Cuadro 5. Minería inteligente: innovación digital en la industria minera

La innovación y la tecnología son esenciales para el desarrollo de una minería inteligente, que promueve que la minería y la metalurgia sean cada vez más seguras, más sostenibles (aumento de la eficiencia energética, disminución del consumo de agua, electrificación, etc.) y con menor impacto sobre las personas y el medio ambiente¹⁴¹⁻¹⁴³. Por otro lado, se consigue aumentar la productividad y el acceso a recursos minerales de peor calidad⁹⁶. Para ello se emplean técnicas de digitalización en las diferentes etapas del ciclo minero y procesamiento metalúrgico, en ámbitos relativos a la modelización de yacimientos, equipos de perforación robotizados y **volquetes** autónomos (sin presencia humana), gestión de flotas de volquetes, monitorización de muestras y explosivos, análisis en tiempo real de diferentes parámetros mediante sensores y mejora de los procesos metalúrgicos^{96,144-146}. Algunas de las tecnologías empleadas incluyen internet de las cosas, **sistemas ciberfísicos**, simulación, **gemelos digitales**, análisis de datos, inteligencia artificial, **robótica colaborativa**, impresión 3D, **realidad virtual** y **realidad aumentada**^{96,147}.

Procesamiento y refinado: Los minerales metálicos requieren procesos adicionales de refinado en la planta metalúrgica, donde se procesan y se obtienen los metales de alta pureza. En la actualidad, China lidera las operaciones de refinado: recibe materias primas minerales de todo el planeta para ser procesadas en su territorio. Esto supone un aumento de la huella de carbono de las materias primas minerales que, en muchas ocasiones, son enviadas de nuevo a otras partes del mundo en estado refinado (como materias primas minerales de alta pureza) para ser empleadas en procesos de fabricación de diferentes productos tecnológicos.

Fabricación: Los minerales y metales son empleados para la fabricación de diferentes componentes y equipos, según la tecnología desarrollada. A medida que se avanza en la cadena de producción se añade valor a los productos obtenidos.

Reparación, reutilización y reciclaje: Esta fase es uno de los pilares de la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales¹¹ y del nuevo Reglamento sobre diseño ecológico¹⁴⁸, que persiguen alargar el **ciclo de vida** de las materias primas mediante la mejora de la durabilidad, el mantenimiento y la reparación de equipos, su reutilización en un uso similar o distinto, y su reciclado al final de su vida útil.

Materiales avanzados: una alternativa incipiente al uso de materias primas críticas

El desarrollo de materiales avanzados busca reducir la dependencia de materias primas fundamentales y optimizar los procesos productivos.

Las materias primas fundamentales tienen propiedades que hacen que en muchos casos sean muy difíciles de sustituir. Por ejemplo, las tierras raras tienen unas propiedades físicas y químicas necesarias para la producción de imanes permanentes²⁴, y el litio presenta unas propiedades electroquímicas óptimas que se aprovechan en las baterías recargables⁸².

Los materiales avanzados son aquellos diseñados para tener propiedades especiales o superiores a las tradicionales¹⁴⁹. Su papel en el desarrollo de tecnologías contribuye a maximizar los rendimientos de los materiales, disminuir costes o aumentar la sostenibilidad. Algunos ejemplos incluyen aleaciones de metales complejas¹⁵⁰, polímeros, nanomateriales, materiales magnéticos y superconductores, entre otros. Pueden ser diseñados para reemplazar el uso de algunas materias primas fundamentales o para reducir la cantidad de materia prima empleada. El objetivo es sustituir una materia prima potencialmente escasa y crítica por una abundante

- **Volquete:** Vehículo automóvil provisto de una caja articulada, con un dispositivo mecánico que permite volcarla para vaciar la carga transportada.
- **Sistemas ciberfísicos:** Tecnología, software, sensores, procesadores, redes y técnicas de comunicación que permiten la interacción entre los objetos físicos y el mundo computacional.
- **Gemelo digital:** Réplica virtual de algo físico, ya sea un proceso, un producto o una persona.
- **Robótica colaborativa:** Posibilidad de poder hibridar las posibilidades de un robot con la inteligencia y habilidades que tiene una persona.
- **Realidad virtual:** Representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real.
- **Realidad aumentada:** Superposición de información digital sobre un escenario real, permitiendo proyectar sobre la realidad del entorno o contexto, tanto objetos (estáticos o dinámicos) como cualquier otro tipo de información adicional de carácter digital.
- **Ciclo de vida:** Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto, desde la adquisición de las materias primas o su generación a partir de recursos naturales hasta la eliminación final (ISO 14040:2006)

(por ejemplo, indio por zinc). Sin embargo, tiene poco beneficio si el sustituto en sí mismo es crítico (por ejemplo, platino por paladio o indio por germanio), o podría volverse crítico debido a la sustitución^{121,151}. La sustitución también puede ir más allá del nivel del material. En lugar de reemplazar una sustancia por otra, puede ser más beneficioso evaluar el propio producto y su sistema de producción para buscar alternativas de diseño o procesos de fabricación que requieran menos materiales o materiales más comunes¹⁵¹. Todo ello puede contribuir a reducir la dependencia europea de materias primas minerales y componentes de tecnologías de terceros países.

Creación de cadenas de valor de materias primas resilientes, seguras y sostenibles

La sostenibilidad tiene una visión sistémica que integra las dimensiones económicas, sociales y ambientales^{96,152}. Estos tres pilares conforman la base sobre la que se asientan los principios de la UE para unas materias primas sostenibles¹⁵³.

Desafíos económicos y de gobernanza para la UE

Algunas de las estrategias de gobernanza disponibles para fortalecer la seguridad económica de la UE incluyen aumentar la explotación de recursos mineros domésticos, diversificar el suministro de materias primas minerales, agilizar trámites y autorizaciones de los proyectos mineros, así como reforzar la colaboración internacional entre productores y consumidores. También se requiere monitorear y mitigar riesgos, promover un ecosistema industrial ligado al territorio, fomentar la resiliencia, transparencia e inversión económica en el mercado de materias primas, fortalecer la coordinación de los estándares de desempeño social y ambiental, reducir la demanda y promover la economía circular.

El contexto geopolítico de aumento de tensiones y de aceleración de los cambios tecnológicos ha llevado a la UE a asumir una mayor responsabilidad con respecto a su [seguridad económica](#)²¹⁵⁴⁻¹⁵⁶. El objetivo es reducir su posición de vulnerabilidad y excesiva dependencia, y fortalecer su autonomía estratégica abierta. Esto significa cooperar multilateralmente en lo que sea posible y actuar de manera autónoma cuando sea necesario, en relación con los ámbitos de la seguridad, la defensa, la política exterior y la economía¹⁵⁷⁻¹⁵⁹. Algunas de las estrategias para reducir la dependencia de terceros países y garantizar un suministro adecuado y sostenible de materias primas incluyen:

Explotación de recursos mineros domésticos. La UE pretende extraer materias primas minerales de su territorio para producir al menos el 10 % del consumo anual de materias primas estratégicas de la Unión y aumentar su capacidad de procesamiento para producir al menos el 40 % de su consumo anual en 2030¹¹. Para ello, impulsa el desarrollo de “proyectos estratégicos” que pasarán a ser elegibles para procesos de permisos simplificados y un acceso más fácil a la financiación¹¹. En este contexto, España puede aportar capacidad extractiva y de procesamiento de minerales al mercado nacional y a la UE.

Diversificación en el suministro. La UE postula una estrategia de diversificación y reducción de los riesgos de una excesiva interdependencia de otros países (*de-risking*), pero evitando la desvinculación comercial con ellos (*decoupling*), que implicaría una desglobalización con enormes costes económicos para los estados miembros^{12,155}. En este sentido, la Ley de Materias Primas Fundamentales establece que ningún tercer país represente más del 65 % del consumo anual de la UE para una materia prima estratégica concreta¹¹.

Optimización de trámites y autorizaciones. Las autorizaciones de proyectos estratégicos para la economía de la UE no superarán los 27 meses para los proyectos de extracción y los 15 meses para los proyectos de procesamiento y reciclado¹¹. Esta medida responde a los largos plazos de tiempo que transcurren desde la exploración del yacimiento hasta la explotación de una mina⁴, que pueden durar 10 años o más en España⁹⁶. Una regulación clara, transparente y ejecutiva puede ayudar a las empresas a la hora de solicitar permisos para los proyectos mineros. Para la realización del trabajo, las Administraciones requieren una dotación adecuada de recursos humanos y materiales¹⁰⁰.

Refuerzo de la colaboración internacional entre países productores y países consumidores. Ningún país por sí solo podrá impulsar los cambios necesarios para autoabastecerse al completo. Por tanto, la colaboración internacional sigue siendo un elemento indispensable para el correcto funcionamiento del mercado^{4,100}. Desde 2021, la UE ha firmado más de diez acuerdos bilaterales^{160,161} y está involucrada en diferentes partenariados, como el “Minerals Security Partnership Forum”¹⁶². Las relaciones estratégicas con África, América Latina y el

· [Seguridad económica](#): Minimización de riesgos y protección de intereses vinculados a la existencia de relaciones energéticas, industriales, comerciales y financieras con el resto del mundo.

Caribe podrían garantizar cierta estabilidad de suministro a Europa. Para ello, la comunidad experta señala la importancia de avanzar hacia relaciones internacionales fluidas y de beneficio mutuo, que garanticen el desarrollo industrial de estas regiones más allá de la extracción de recursos¹⁰⁰, como por ejemplo, a través de su transformación en productos de mayor valor añadido¹⁶³. Esto puede implicar cesiones o sacrificios comerciales por parte de la UE (como el acuerdo comercial UE-Mercosur^{164,165}). A nivel de estrategias colaborativas de mercado, la UE puede beneficiarse de un sistema de compras único para aumentar su capacidad negociadora a nivel internacional y poder garantizar un precio competitivo para los estados miembros¹⁶⁶, tal y como se hizo con las vacunas para el COVID-1.

Monitoreo y mitigación de riesgos. Se establece un mecanismo europeo para la monitorización coordinada y pruebas de estrés de las cadenas de suministro de materias primas fundamentales. Esto obliga a las grandes empresas que dependen de estos materiales y componentes (fabricación de baterías, hidrógeno, equipos de energía renovable, dispositivos electrónicos, robótica, drones, aeronaves, satélites, chips avanzados, etc.) a establecer medidas para mitigar los riesgos de disrupción en el suministro¹⁰⁰. Otra medida de seguridad ante un corte en el suministro es la constitución de reservas estratégicas de algunas materias primas^{4,100}.

Promoción de un ecosistema industrial completo ligado al territorio. Se busca el desarrollo industrial en el territorio europeo de las diferentes etapas de la cadena de valor para generar riqueza y conexión en los diferentes mercados^{11,21,34}: empresas de extracción minera, metalurgia, fabricantes de componentes y equipos, de restauración e integración con el medio, y mercado de reparación, reutilización y reciclado de productos tecnológicos. En la misma línea, se persigue generar valor en torno al conocimiento tecnológico con la capacitación de personal, desarrollo de centros de I+D, universidades, etc.^{11,96}. Este es un escenario propicio para la creación de ecosistemas industriales que contemplen la cadena de valor para una determinada tecnología al completo, desde la actividad minera y la metalurgia hasta el procesado de los productos al final de su vida útil. Todo ello desde una perspectiva de simbiosis industrial, en la que los residuos de un proceso de una industria sirvan como recurso para otra⁹⁶. La creación de un mercado de materias primas secundarias cobra máxima relevancia a nivel comunitario, con la diversificación de las infraestructuras de reciclado para maximizar las tecnologías de reciclaje, reducir la inversión y acumular suficientes residuos.

Resiliencia y transparencia de mercados. Los precios de los minerales y metales tienden a ser volátiles, lo que impacta en el coste total de los productos y tecnologías. Esto se debe al desajuste entre la oferta o la capacidad de producción de minerales, y la velocidad con la que aumenta la demanda⁴. Algunas medidas para mejorar la transparencia y el apoyo al desarrollo del mercado incluyen establecer puntos de referencia de precios, evaluaciones periódicas del mercado, creación de reservas estratégicas y sistemas de trazabilidad en las cadenas de suministro^{4,121}.

Fomento de la inversión económica en el mercado de materias primas. Los planes de inversión actuales están orientados hacia una transición energética de cambio gradual. Dado el largo tiempo de preparación para nuevos proyectos, esto podría crear un cuello de botella cuando la implementación de tecnologías de energía limpia comience a crecer rápidamente⁴. Es necesario invertir y tener en cuenta que los proyectos requieren tiempo para desarrollarse y prepararse. En esta línea, destacan como ejemplos los fondos de financiación público-privados de materias primas propuestos por Francia, Alemania e Italia¹⁶⁷. Además de financiación para fomentar la innovación de empresas y otros organismos, los fondos de garantía son una medida de seguridad que puede promover el desarrollo de proyectos de inversión de alto riesgo tecnológico¹⁰⁰. Estados Unidos, con la Ley de Reducción de la Inflación (IRA, por sus siglas en inglés), ha realizado inversiones masivas en tecnologías de energía limpia junto con una serie de rebajas fiscales¹⁶⁸.

Fortalecimiento y coordinación de los estándares de desempeño social y ambiental. Dada la falta de una acción política global coordinada, se apunta hacia la necesidad de crear un marco de gobernanza internacional para las materias primas que proporcione a los países herramientas comunes para abordar las emisiones de gases de efecto invernadero, los impactos ambientales locales y regionales, y los riesgos sociales y de derechos humanos^{4,169}.

Reducción de la demanda y economía circular. La creciente demanda de materias primas minerales para la transición energética tiene varios limitantes sociales y ambientales, por lo que se plantean estrategias de reducción de dicha demanda para disminuir la presión sobre la extracción primaria de minerales⁹⁶. Entre ellas, destaca la transición hacia una economía circular, cuyo modelo de producción y consumo pretende desacoplar el crecimiento económico del crecimiento de la demanda de recursos naturales^{170,171}. Esto conlleva una serie de medidas ligadas al **ecodiseño** para reducir la demanda de las materias primas minerales: alargar el ciclo de vida de los productos y materiales, facilitar su reparación y reutilización y posibilitar el reciclado final de sus materiales. Asimismo, implica innovar en el diseño de sistemas de producción menos intensivos en materiales y energía, y de productos con mayor vida útil (evitar obsolescencia programada), así como promocionar iniciativas de consumo responsable^{148,170,172}. Se estima que una reducción del 1 % del consumo global ahorraría anualmente 840 millones de toneladas de metales, combustibles fósiles, minerales y biomasa, y 39 billones de litros de agua¹⁷³. En este sentido, la UE establece para 2030 aumentar su capacidad de reciclado para cubrir al menos el 25 % del consumo anual de materias primas estratégicas y recuperar cantidades cada vez mayores de cada materia prima¹¹. En la misma línea, desde 2019, tiene como objetivo garantizar que al menos el 65 % del peso total de los aparatos eléctricos y electrónicos que se pusieron en el mercado en los tres años anteriores sea recogido y gestionado de manera adecuada¹⁷⁴. Asimismo, el nuevo reglamento relativo a pilas, baterías y sus residuos, establece objetivos alineados con las estrategias de ecodiseño y economía circular aplicado a toda la cadena de valor de las baterías¹⁷⁵.

Retos sociales y ambientales

Los impactos en minería se dividen frecuentemente en categorías ambientales, sociales, políticas, culturales y económicas, aunque en la práctica están interrelacionadas y son difíciles de considerar de manera aislada¹⁷⁶. Los diferentes impactos ocurren a lo largo de las distintas etapas del ciclo minero y, de no ser debidamente gestionados, pueden perjudicar a las comunidades locales y los ecosistemas de los territorios donde se insertan¹⁷⁶. Existe un rango variado de potenciales impactos, cuya ocurrencia depende del contexto particular de cada proyecto minero¹⁷⁶.

Impacto social de la minería

Desde las primeras etapas de un proyecto minero, la interacción entre las empresas, los gobiernos y las comunidades locales comienza a modelar las expectativas e interrogantes de la población local sobre los potenciales beneficios e impactos socioeconómicos y ambientales que dicha actividad podría tener en la zona. Se trata de un momento crítico en la construcción de una relación de confianza entre las partes interesadas, donde la transparencia en la información y la comunicación son clave¹⁷⁷. La actividad minera puede generar empleo, formar y capacitar a profesionales, crear infraestructura en zonas menos pobladas y aportar riqueza a la comunidad local a través de inversiones en servicios públicos o la explotación minera como atractivo turístico¹⁷⁸. Al mismo tiempo, también puede generar desigualdades en la distribución de los beneficios entre la comunidad local¹⁷⁹, masculinización del entorno debido al influjo de empleados externos¹⁷⁹, competencia por el uso del suelo¹⁸⁰ y subida de precios de la tierra¹⁷⁹, dificultad de acceso a la vivienda¹⁷⁹, dificultad para encontrar mano de obra en actividades que no pueden competir con la minería¹⁷⁸, desplazamiento de las comunidades locales o coincidir con áreas protegidas¹⁶⁹ o zonas de alto patrimonio histórico cultural. Además, las explotaciones mineras pueden coincidir con territorios de comunidades indígenas (como el pueblo Sami en el norte de la península escandinava), lo que puede causar su desplazamiento e interferir con el vínculo de las poblaciones con su territorio^{181,182}. Por otra parte, los trabajadores están expuestos a diferentes riesgos (productos químicos tóxicos, ruido o polvo en suspensión, entre otros)¹⁸³, que requieren especial atención para evitar accidentes y problemas salud¹⁸⁴⁻¹⁸⁶. Por último, en la etapa de cierre de la mina se presenta el desafío de contar, al inicio del proyecto, con una partida económica suficiente para la rehabilitación y remediación del entorno, para que no se transfiera al Estado la gestión de los pasivos ambientales de largo plazo¹⁷⁶.

· **Ecodiseño:** Integración de los aspectos medioambientales en el diseño del producto con el fin de mejorar su comportamiento medioambiental a lo largo de todo su ciclo de vida.

Las diferentes etapas de la actividad minera pueden generar beneficios en las comunidades locales, asociados a la creación de empleo y capacitación profesional. Sin embargo, también conllevan impactos negativos, como desigualdad en la distribución de los beneficios o cambios en la demografía y cultura local, entre otros.

En el caso de algunos países de América Latina o África ricos en recursos y con un índice de gobernabilidad bajo, los ingresos obtenidos no siempre revierten en el crecimiento económico e industrial local, algo que puede dar lugar a desajustes en la economía, inflación, competencia con otros sectores, corrupción, violencia, vulneración de los derechos humanos e, incluso, conflictos armados^{4,121,187} (por ejemplo, situaciones de trabajo infantil en la extracción de cobalto de la República Democrática del Congo¹⁸⁸). En estas zonas los trabajadores también se enfrentan a condiciones laborales difíciles, que se acentúan en las instalaciones de minería artesanal y de pequeña escala, donde en muchos casos no existe regulación en materia de protección social, o no se aplica^{4,121}.

Impacto medioambiental de la minería

La minería genera impactos ambientales significativos sobre el aire, el suelo y el agua, además de generar residuos peligrosos. Los riesgos ambientales deben ser evaluados con carácter previo a la autorización de un proyecto minero.

La naturaleza de la actividad extractiva implica necesariamente un impacto sobre el medio ambiente. En España, para garantizar que estos riesgos están debidamente considerados con carácter previo a la autorización de un proyecto, las empresas mineras están obligadas a presentar un estudio de impacto ambiental, que será evaluado por la Administración, cuyas directrices vienen marcadas en la Directiva 2011/92/UE¹⁸⁹ y su trasposición en España con la Ley 21/2013 de evaluación ambiental¹⁹⁰. Asimismo, es necesario presentar un plan de restauración, acorde con el Real Decreto 975/2009, para rehabilitar el espacio afectado por la actividad minera¹⁹¹. La legislación de ámbito estatal aplicable al desarrollo de proyectos mineros es extensa e incluye normativa de corte autonómico relacionada con el agua, las emisiones a la atmósfera, los residuos, cuestiones de emergencia, etc⁹⁶.

Los impactos de cada mina varían dependiendo de las características locales del entorno, el tipo de actividad (la minería a cielo abierto causa generalmente mayor impacto en el ambiente que la minería subterránea), de la geología y contenido mineral del yacimiento^{176,192}. Los principales impactos medioambientales son:

- **Impacto sobre la atmósfera:** El sector minero es una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera debido al alto consumo energético de sus procesos^{4,193,194}. Se estima que la producción de minerales y metales primarios contribuyeron con alrededor del 10 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía en 2018¹⁹⁵. Además, impacta negativamente en la calidad del aire, ya que produce polvo, ruido, olores y contaminantes atmosféricos (ej. mercurio y plomo)^{43,196,197}.
- **Impacto sobre el suelo:** La minería provoca cambios importantes en el suelo, que pierde su función y sufre degradación del paisaje, fragmentación de ecosistemas, aumento de la erosión, alteraciones en el equilibrio de los terrenos (ej. hundimientos) y efectos adversos en la biodiversidad^{43,196}. La minería potencialmente influye en 50 millones de km² de la superficie terrestre, con zonas que se solapan con áreas protegidas y áreas clave para la biodiversidad¹⁹⁸. Todo ello puede resultar en el desplazamiento de comunidades y la pérdida de hábitats que son hogar de numerosas especies, incluidas algunas en peligro de extinción¹⁹⁹.
- **Impacto sobre la gestión del agua:** La protección del agua es una de las prioridades ambientales dado que es el factor más vulnerable en las actividades mineras¹⁹⁶. La extracción y procesamiento de algunos minerales requieren grandes volúmenes de agua para sus operaciones, cuyo suministro está amenazado por la escasez de recursos hídricos actuales y los efectos del cambio climático. El litio es particularmente vulnerable al estrés hídrico debido a sus altos requisitos de agua⁸³. Más de la mitad de las minas para su producción se concentra en áreas de alto estrés hídrico y se espera que esta proporción aumente con el tiempo^{4,83,200}. Además, las actividades mineras plantean riesgos de contaminación a través del drenaje ácido de minas, la descarga de aguas residuales y la disposición de residuos sólidos. También incrementan la competencia por los usos del agua (agricultura, industria y consumo de agua urbana)²⁰¹.
- **Generación de residuos:** La minería y el procesamiento de minerales pueden generar desechos peligrosos, como metales pesados y material radiactivo. El colapso de las balsas

de residuos puede causar desastres ambientales a gran escala, como el producido por la rotura de la balsa minera de Aznalcóllar en 1998 en el Parque Nacional de Doñana. Por otra parte, la disminución de la calidad del mineral puede provocar un aumento importante en los desechos mineros en la actividad extractiva de las próximas décadas.

- La gestión medioambiental cobra aún más relevancia en un contexto de cambio global. Los activos mineros están expuestos a crecientes riesgos climáticos (sequías, calor extremo, inundaciones, etc.), de tal forma que los desastres naturales se han convertido en una de las causas más frecuentes de interrupción en el suministro de materias primas minerales. De hecho, ocupan el tercer lugar, solo después de los accidentes en las instalaciones mineras y las huelgas laborales²⁰². Por ejemplo, las inundaciones pueden provocar roturas en balsas de residuos de minería peligrosos, con extensos daños ambientales²⁰³. Esto requiere que las empresas evalúen los riesgos físicos del cambio climático en sus operaciones e integren la planificación de resiliencia climática en sus estrategias de sostenibilidad.

Respuesta social ante la actividad minera

Los esfuerzos europeos hacia la reducción de la dependencia de terceros países en materias primas minerales suponen la apertura o reapertura de minas en territorio comunitario. En este contexto, las comunidades locales pueden reaccionar de diversas maneras, según sus ideas preconcebidas y experiencias previas con la minería, así como su percepción sobre la transparencia y equidad en el proceso de toma de decisiones de los proyectos¹⁷⁶. Por un lado, pueden dar la bienvenida a la oportunidad de desarrollo y de generación de nuevos empleos en la zona. Esta circunstancia es más frecuente en zonas con tradición minera previa²⁰⁴. Por otro lado, las poblaciones locales pueden reaccionar en contra de estos proyectos, debido principalmente a su preocupación sobre el impacto ambiental en la zona y los efectos sobre su modo de vida y su salud^{176,205,206}. Se provoca, así, una situación de tensión entre las empresas mineras, las instituciones y las comunidades locales, que puede resultar en conflicto^{176,205}. En este sentido, el Atlas de Justicia Ambiental recoge ejemplos sobre conflictos socioambientales, entre los que se encuentran casos vinculados a la industria extractiva en diferentes contextos territoriales²⁰⁷.

Las principales demandas de las comunidades locales son poder decidir sobre su propio modelo de desarrollo, y si esto implica o no la opción minera, así como poder participar en las decisiones del proyecto minero^{206,208,209}. En la UE, la fase de evaluación de impacto ambiental durante la etapa de permisos del proyecto minero se utiliza frecuentemente para poner en práctica los derechos de participación pública¹⁷⁶. En estos casos, la participación temprana y la comunicación son clave para promover un diálogo colaborativo y constructivo²¹⁰. Si se deja para una etapa avanzada del proceso de permisos, la comunidad puede percibir que el proceso está demasiado avanzado para que su participación tenga un impacto real¹⁷⁶. Además, minimizar la información o no dar a conocer con total transparencia los detalles del proyecto puede generar desconfianza y tensiones que serán difíciles de revertir. Algunas de las propuestas para diseñar proyectos de minería más responsables a nivel social y ambiental, adaptados a las circunstancias de cada zona, incluyen: integrar la dimensión social en la fase de evaluación de impacto ambiental, mejorar los procesos de consulta participativos, comunicar de manera transparente para generar expectativas claras en cada fase del proyecto⁴, incluir un sistema de compensación ambiental obligatorio, promover el cumplimiento empresarial voluntario de buenas prácticas sostenibles sociales y ambientales, emplear tecnologías punteras que reduzcan el impacto (**Cuadro 5**), fomentar la cultura minera y concienciar sobre el consumo responsable¹⁷⁶.

Diligencia debida y responsabilidad social corporativa

Los avances en el desarrollo de cadenas de valor de materias primas responsables y sostenibles requieren una acción coordinada a nivel internacional para promover el cumplimiento de los estándares sociales y ambientales. La adopción de marcos, como las guías de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)^{211,212}, ayudan a las empresas a prevenir y abordar los impactos sociales y ambientales. Para ello, proponen el establecimiento

· **Debida diligencia:** Es la forma en que una empresa entiende, gestiona y comunica el riesgo. Esto incluye los riesgos que genera para otros, y los riesgos a los que se enfrenta a través de sus decisiones y acciones estratégicas y operativas.

Los proyectos mineros en Europa despiertan diversas reacciones en las comunidades locales, que oscilan entre el apoyo por las oportunidades económicas y la oposición por los potenciales impactos ambientales y sociales. Las comunidades locales demandan una mayor participación en los proyectos mineros para garantizar que sus intereses sean considerados y para fomentar la confianza en las empresas y las instituciones.

Existen marcos internacionales de carácter voluntario que ayudan a las empresas a prevenir y abordar los impactos socioambientales.

de una política de **debida diligencia** monitorizada con regularidad y de acceso público, la identificación y evaluación de los riesgos y la aplicación de medidas de control de los últimos²¹³. En el marco de la Ley de Materias Primas Fundamentales de la UE, se promueve el establecimiento de garantías que aseguren que los proyectos de materias primas estratégicas en territorio comunitario o en terceros países se ejecuten respetando los derechos humanos, el medio ambiente y la transparencia en las prácticas empresariales¹¹. La UE ha demostrado prácticas de excelencia en toda la cadena de valor de los recursos minerales a través de varios proyectos, entre los que destaca el liderazgo de los países nórdicos¹⁰¹. En España, se fomenta que las empresas cumplan los indicadores de calidad establecidos en las normas UNE 22480:2019²¹⁴ y UNE 22470:2019²¹⁵, que se encuentran alineadas con las iniciativas más avanzadas en materia de sostenibilidad social y ambiental, como las indicadas por Naciones Unidas^{216,217}, la OCDE²¹¹ y los Principios de Ecuador²¹⁸. Estas estrategias de responsabilidad social corporativa son de carácter voluntario, de manera que en caso de no cumplimiento no existen penalizaciones ni consecuencias reales para las empresas⁴. En este sentido, el Parlamento Europeo ha solicitado a la Comisión presentar una propuesta legislativa sobre la diligencia debida obligatoria en las operaciones empresariales y cadenas de suministro²¹⁹.

Refuerzo de la circularidad de materiales y materias primas: reparación, reutilización y reciclaje

La reparación, la reutilización de tecnologías y el reciclado de metales son estrategias para promover la circularidad de las materias primas minerales y reducir la presión sobre su extracción primaria. Estas medidas se ven reforzadas por el marco regulatorio de diseño ecológico europeo. Aun así, existen una serie de factores que limitan el reciclado de algunas materias primas minerales.

La propuesta de Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050⁵ y la Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030²²⁰, señalan la reducción del consumo, y la promoción de la reparación, reutilización y reciclado como estrategias para que las materias primas secundarias puedan satisfacer una mayor parte de la demanda de minerales en la transición energética. Se trata de medidas que pueden reducir la presión sobre la extracción primaria, aunque en ninguno de los escenarios predictivos podrían llegar a sustituirla en su totalidad^{4,141}.

- **Reutilización:** una tecnología, durante su vida útil, puede reutilizarse para el mismo uso o adaptarse para otro uso diferente. Por ejemplo, cuando una batería de un vehículo eléctrico llega al final de su vida útil, la legislación actual permite en algunos casos remanufacturarla para que pueda emplearse de nuevo en movilidad, o adaptarla para un uso diferente al original, como el almacenamiento de energía producida por paneles solares¹⁷⁵. De esta manera, la reparación de los productos tecnológicos es una medida que puede alargar su vida útil. En este sentido, el Parlamento Europeo ha aprobado un mandato negociador sobre un nuevo “derecho a la reparación” de bienes (lavadoras, aspiradoras, teléfonos, etc.) para los consumidores, que pretende fomentar un consumo más sostenible, facilitar el arreglo de productos defectuosos, reducir los residuos y apoyar al sector de la reparación^{221,222}.
- **Reciclaje:** Comprende la recolección física y separación de materias primas, y el procesamiento para recuperarlas. En conjunto, combina múltiples vías con una amplia gama de tecnologías y prácticas⁴. Las materias primas minerales que nutren los procesos de reciclado pueden proceder de dos fuentes: del final de la vida útil de los productos y de los subproductos que se extraen durante los procesos mineros y metalúrgicos (**Cuadro 6**)²²³.

Las materias primas recicladas comienzan a ser cada vez más competitivas a nivel de costes con respecto a las fuentes primarias²²⁴. Su uso supone generalmente un ahorro en recursos energéticos, agua y emisiones de CO₂. El reciclado está más avanzado para aquellos minerales metálicos producidos en grandes cantidades, como aluminio, hierro, cobre^{4,96}, que para otras materias primas críticas.

En este sentido, aún cabe señalar varios retos que no están todavía resueltos en relación con el reciclaje. Entre ellos, destacan la falta de madurez tecnológica para el reciclado de algunos elementos, debido a la alta complejidad de los productos que los contienen, y el elevado coste económico de algunos procesos de reciclado⁹⁶. Este es el caso de las tierras raras para la fabricación de imanes permanentes, cuya tasa de reciclado está por debajo del 1 %, por el elevado coste de los procesos de reciclado y la falta de sistemas de recolección adecuados⁸. Por tanto, una línea prioritaria de investigación es la mejora de los procesos metalúrgicos de reciclado²²⁵.

Otra limitación para determinadas tecnologías es la necesidad de usar materias primas de pureza extrema, de manera que no puede emplearse material reciclado. En otros casos, los procesos de reciclaje no pueden recuperar el 100 % del material por motivos técnicos o económicos (por ejemplo, el litio de las baterías de ion-litio).⁹⁶ También son factores limitantes del reciclado la recolección de desechos inadecuada y la existencia de condiciones económicas y legales desfavorables (tanto para el reciclado como para el uso de materiales reciclados)^{225,226}. La dimensión temporal es otro de los grandes factores a tener en cuenta. El reciclaje depende de la disponibilidad de productos que hayan alcanzado el final de su vida útil, lo que puede suponer una espera de muchos años, dependiendo de la tecnología⁸. Por ejemplo, el de paneles solares es todavía incipiente, dado estos tienen una vida media entre 25 y 30 años y aún no hay volumen suficiente para su reciclado⁸.

Para facilitar la circularidad y el reciclado de las tecnologías se apuesta por el **ecodiseño**, una estrategia que tiene en cuenta requisitos de sostenibilidad ambiental en el diseño de un producto y los procesos que tienen lugar a lo largo de su cadena de valor¹⁴⁸. Se favorece la durabilidad, la reutilización, la reparación, el reciclado y la eficiencia energética de los productos. De igual manera, se busca minimizar la presencia de sustancias químicas peligrosas, así como su huella de carbono y huella ambiental^{148,227}. En este sentido, la transparencia de datos en cuanto a la composición en materiales de los diferentes componentes y equipos tecnológicos es esencial para facilitar su reciclado. La UE está trabajando en la creación de un “pasaporte digital” que proporcionará información sobre la sostenibilidad ambiental (durabilidad y capacidad de reparación, contenido reciclado o disponibilidad de piezas de repuesto) de las tecnologías que entren al mercado europeo y mejorará su trazabilidad en toda la cadena de suministro^{11,148,228}. Este es el caso de todas aquellas que puedan contener imanes permanentes¹¹ (dispositivos para realizar resonancias magnéticas, turbinas eólicas, robots industriales, bombas de calor, etc.) y baterías¹⁷⁵, entre otras. El pasaporte del producto también puede ayudar a las autoridades a realizar mejores controles y verificaciones²²⁸.

La minería urbana permite obtener materias primas a partir de los residuos generados en una ciudad, como la basura electrónica. Su recuperación cuenta con una serie de factores limitantes que comparte con el reciclaje, como la complejidad de los procesos de separación y la necesidad de tecnologías específicas.

Cuadro 6: Minería urbana: de residuos a riqueza

La minería urbana consiste en la obtención de materias primas a partir de los residuos generados en una ciudad, región o país⁴³. Muchos aparatos eléctricos y electrónicos (basura electrónica) y residuos de sectores de la construcción, industria y minería acaban en vertederos^{43,229,230}. En ocasiones, la concentración de metales en estas minas de residuos urbanos sobrepasa la concentración de los depósitos naturales. Por ejemplo, el oro presente en teléfonos móviles y ordenadores (rango entre 200–350 gramos de oro por tonelada), supera la concentración de los depósitos naturales explotados actualmente (rango entre 4 – 10 gramos de oro por tonelada extraída)²³¹.

La basura electrónica se produce a un ritmo vertiginoso, con más de 60 millones de toneladas producidas en 2022 a nivel mundial²³². En muchos casos estos residuos se mandan a terceros países, lo que supone una desventaja doble: por la pérdida de riqueza en materias primas de los residuos y por el impacto negativo social y medioambiental asociado (los países de destino pueden tener estándares sociales y medioambientales menos estrictos para la gestión de residuos, aumento de la huella de carbono por el transporte de residuos, etc.)²³³.

La recuperación de materias primas a partir de residuos urbanos es una medida que puede reducir la demanda sobre la extracción minera primaria, la cantidad de basura electrónica y los impactos negativos sobre el ambiente y las personas²³⁴. Sin embargo, se enfrenta a numerosos retos: aumentar la recolección de equipos, mejorar la separación de residuos de otros materiales (vienen mezclados con madera, plástico, textiles, etc.) o la dificultad de recuperar los metales a partir de una variedad de equipos de composición muy variada^{234,235}. Otros desafíos son la gestión de residuos tóxicos, el alto consumo energético necesario para extraer algunos metales que aparecen en concentraciones muy bajas o incluso la imposibilidad de separar ciertos metales a nivel técnico^{234,235}. Con todo ello, se sigue avanzando para alcanzar la viabilidad económica de las explotaciones²³⁶. En España existen varios ejemplos de proyectos de recuperación de residuos mineros, como la mina de estaño de Penouta en Galicia o la mina de wolframio de Los Santos en Salamanca. También se están desarrollando proyectos de recuperación de materias primas a partir de residuos urbanos, como el proyecto CirCular de Atlantic Copper en Huelva, que tiene como objetivo la recuperación de metales de aparatos eléctricos y electrónicos que han alcanzado el final de su vida útil²³⁷.

Ideas fuerza

- Las materias primas minerales denominadas fundamentales o críticas se emplean en la fabricación de productos tecnológicos asociados a sectores relevantes para la economía y tienen un riesgo elevado de sufrir interrupciones en su cadena de suministro. Estas incluyen a las materias primas estratégicas, que son clave para los sectores estratégicos de las energías renovables, la movilidad eléctrica, y los ámbitos industrial, digital, aeroespacial y de la defensa.
- La rapidez con la que crece la demanda de materias primas fundamentales debido a la transición energética puede provocar una potencial brecha entre la oferta disponible y las necesidades proyectadas, lo que eleva el riesgo de sufrir disrupciones en las cadenas de suministro globales. Esto ha generado una competencia estratégica entre los estados para garantizar el suministro de materias primas fundamentales y de tecnologías asociadas.
- La distribución de algunas materias primas minerales está mucho más concentrada a nivel geográfico que la del petróleo o el gas natural, lo que ha creado un nuevo escenario geopolítico entre países productores y países consumidores. Si bien es improbable que la concentración de la producción cambie en el largo plazo, los elevados precios de los minerales fomentan nuevos proyectos en ubicaciones menos habituales y a partir de nuevas fuentes.
- Las restricciones a las exportaciones de determinadas materias primas estratégicas, alegando motivos de seguridad nacional en un contexto de competencia tecnológica entre EEUU y China, ha creado un entorno económico incierto en el comercio de estas materias primas, en donde la geopolítica está adquiriendo cada vez una mayor relevancia.
- La Unión Europea, y por tanto España, presenta una elevada vulnerabilidad como región dependiente de las importaciones de materias primas fundamentales y de productos procesados de terceros países, en especial de China. En este contexto, destacan los objetivos de la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales para aumentar la extracción, procesamiento y reciclaje de materias primas estratégicas en el territorio comunitario al 10 %, 40 % y 25 % respectivamente, con la disminución de su dependencia externa al 65 %.
- El riesgo de perder competitividad en la transición energética ha llevado a muchos países, incluida la UE, a adoptar políticas para garantizar el suministro seguro, sostenible y diversificado de materias primas fundamentales y de las tecnologías asociadas.
- España tiene el potencial de suministrar materias primas al mercado nacional y a la UE, así como mejorar su capacidad de procesamiento y refinado para desarrollar productos de alto valor añadido. La actualización de los datos de sus recursos geológicos utilizando las nuevas técnicas disponibles, la inversión en investigación para el descubrimiento de nuevos yacimientos, así como la agilización de los trámites para la obtención de licencias son puntos clave para aumentar la competitividad de las industrias mineras y reforzar la autonomía estratégica nacional
- El desarrollo de cadenas de valor que integren varios eslabones en el propio territorio, desde la minería y la metalurgia, a la fabricación de componentes y equipos y su reciclado, contribuye a la creación de valor en el territorio y a fortalecer el ecosistema industrial nacional y europeo.
- La extracción de materias primas y su procesamiento tienen un impacto directo sobre el medio ambiente y las comunidades locales, lo que genera oposición a los proyectos mineros. En este sentido, el personal especializado en su estudio destaca la importancia de que las comunidades locales puedan decidir sobre su propio modelo de desarrollo en el territorio, y si este incluye o no la opción minera.
- La creación de procesos participativos desde las fases iniciales de los proyectos de minería, la comunicación transparente y el cumplimiento de buenas prácticas sociales y ambientales pueden ayudar a diseñar un plan de desarrollo que beneficie a la comunidad local y minimice los impactos negativos de la actividad.
- El contexto actual plantea la necesidad de aplicar medidas dirigidas a reducir la demanda y la presión sobre la extracción primaria de minerales para mejorar la sostenibilidad de las cadenas de valor y alcanzar los objetivos de la agenda climática europea.
- El ecodiseño, la reparación y la reutilización de productos tecnológicos, así como el reciclado de metales, son estrategias clave para el desarrollo de un flujo secundario de materias primas minerales. Esto aumenta la circularidad y eficiencia del sistema, y reduce la presión sobre la extracción primaria de los recursos minerales, pero sin llegar a sustituirla. El incremento de las tasas de reciclaje requiere la mejora de los canales de recogida y separación de productos al final de su vida útil, el desarrollo de procesos de reciclado técnicamente viable y económicamente más competitivos, y un marco legal favorable, entre otros factores.

Bibliografía:

1. Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima»). (2021).
2. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/materias-primas-minerales/hr-materias-primas-minerales_23-8-22_web_tcm30-544770.pdf (2022).
3. Comisión Europea. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. El Pacto Verde Europeo. (2019).
4. International Energy Agency (IEA). The role of critical minerals in clean energy transitions. (2022).
5. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050. https://ec.europa.eu/clima/sites/its/its_es_es.pdf (2020).
6. International Renewable Energy Agency (IRENA). Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables: Perspectives for the G7. <https://www.irena.org/Publications/2024/Apr/Decarbonising-hard-to-abate-sectors-with-renewables-Perspectives-for-the-G7> (2024).
7. Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Informe C: Hidrógeno verde como combustible. (2022) <https://doi.org/10.57952/87d5-vg85>.
8. Carrara, S. et al. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. European Commission: Joint Research Centre <https://data.europa.eu/doi/10.2760/386650> (2023).
9. Baldassarre, B., Buesa, O. A., Albizzati, P., Jakimow-Canton, M., Saveyn, H. & Carrara, S. Analysis of Circular Economy Research and Innovation (R&I) intensity for critical products in the supply chains of strategic technologies. Joint Research Centre, Publications Office of the European Union <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC134253> (2023).
10. Consejo Europeo & Consejo de la Unión Europea. Un Reglamento de la UE sobre materias primas fundamentales para el futuro de las cadenas de suministro de la UE. <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/critical-raw-materials/> [11/03/2024].
11. 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 y por el que se modifican los Reglamentos (UE) n.º 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 y (UE) 2019/1020 Texto pertinente a efectos del EEE. (2024).
12. Jorge-Ricart, R. Riesgo geopolítico: materias primas y dependencia tecnológica. Real Instituto Elcano <https://www.realinstitutoelcano.org/blog/riesgo-geopolitico-materias-primas-y-dependencia-tecnologica/> [18/03/2024].
13. Hidalgo García, M. del M. Aspectos geopolíticos de los minerales estratégicos. Cuaderno de Estrategia 209 Minerales: Una Cuestión Estratégica en el siglo XXI (Instituto Español de Estudios Estratégicos, 2022).
14. U.S. Department of Energy. Critical Minerals and Materials. U.S. Department of energy's strategy to support domestic critical mineral and material supply chains (FY 2021- FY 2031). <https://www.energy.gov/eere/ammto/2021-doe-critical-materials-strategy> (2021).
15. Department of Industry, Science and Resources, Australian Government. Critical Minerals Strategy 2023–2030. <https://www.industry.gov.au/publications/critical-minerals-strategy-2023-2030> (2023).
16. Minister of Natural Resources, Government of Canada. The Canadian Critical Minerals Strategy. From exploration to recycling: powering the green and digital economy for Canada and the world. <https://www.canada.ca/content/dam/nrcan-rncan/site/critical-minerals/Critical-minerals-strategyDec09.pdf> (2022).
17. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN> (2020).
18. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo. La iniciativa de las materias primas: cubrir las necesidades fundamentales en Europa para generar crecimiento y empleo. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:es:PDF> (2008).
19. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Actualización del nuevo modelo de industria de 2020: Creación de un mercado único más sólido para la recuperación de Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52021DC0350> (2021).
20. Ursula von der Leyen. Europe's choice. Political guidelines for the next European Commission 2024–2029. https://commission.europa.eu/document/download/e6cd4328-673c-4e7a-8683-f63ffb2cf648_en?filename=Political%20Guidelines%202024-2029_EN.pdf (2024).
21. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Un Plan Industrial del Pacto Verde para la era de cero emisiones netas. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023DC0062> (2023).
22. European Commission. Critical raw materials. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en [22/05/2024].
23. European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Study on the critical raw materials for the EU 2023: final report. (Publications Office, 2023).
24. Gielen, D. & Lyons, M. Critical materials for the energy transition: Rare earth elements. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Rare-Earth-elements> (2022).
25. United States Congressional Research Service. An Overview of Rare Earth Elements and Related Issues for Congress. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46618> (2020).
26. European Commission. RMS – Raw Materials Information System. <https://rms.jrc.ec.europa.eu/> [19/03/2024].
27. European Parliament. STOA, Panel for the Future of Science and Technology. The role of research and innovation in ensuring a safe and sustainable supply of critical raw materials in the EU. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/54343> (2024).
28. Joint Ore Reserves Committee, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists & Minerals Council of Australia. The JORC Code. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. (2012).
29. International Renewable Energy Agency (IRENA). Geopolitics of the energy transition: Critical materials. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Geopolitics-of-the-Energy-Transition-Critical-Materials> (2023).
30. Schrijvers, D. et al. A review of methods and data to determine raw material criticality. Resources, Conservation and Recycling **155**, 104617 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>.
31. Pennington, D. et al. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials: guidelines. European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs <https://data.europa.eu/doi/10.2873/769526> (2017).
32. U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Releases 2022 List of Critical Minerals. <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals> [20/04/2024].
33. Parliament of Australia. Australian list of critical minerals. https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/Joint/Joint_Standing_Committee_on_Trade_and_Investment_Growth/GreenEnergySuperpower/Report/C_Australian_list_of_critical_minerals [20/04/2024].
34. Comisión Europea. Estrategia industrial europea. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_es [24/05/2024].
35. Consejo Europeo & Consejo de la Unión Europea. Pacto Verde Europeo. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/> [02/04/2024].
36. Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece un marco para garantizar el suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales y se modifican los Reglamentos (UE) 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 y (UE) 2019/1020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:3A52023PC0160> (2023).
37. Ortego, A., Valero, A., García-Díaz, I., López, F. A. & Iglesias-Émbil, M. Advances in the Treatment of Waste Derived from Electronic Components: The Future of Cars: An Assessment through Raw Materials. Materials Research Foundations **149**, 311–367 (2023) <https://doi.org/10.21741/9781644902639-9>.
38. 6G-BRICKS: Building Reusable testbed Infrastructures for validating Cloud-to-device breakthrough technologies. CORDIS, European Commission <https://cordis.europa.eu/project/id/101096954/es> [18/07/2024].
39. United Nations Environment Programme. Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901> (2024).
40. Ballif, C., Haug, F.-J., Boccard, M., Verlinden, P. J. & Hahn, G. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. Nature Reviews Materials **7**, 597–616 (2022) <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>.
41. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable technology innovation indicators: Mapping progress in costs, patents and standards. <https://www.irena.org/Publications/2022/Mar/Renewable-Technology-Innovation-Indicators> (2022).
42. Valero, A., Valero, A., Calvo, G., Ortego, A., Ascaso, S. & Palacios, J.-L. Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways. Energy **159**, 1175–1184 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.149>.
43. Valero, A., Valero, A. & Calvo, G. The Material Limits of Energy Transition: Thanatia. (Springer International Publishing, 2021). ISBN: 978-3-030-78532-1.
44. Zhu, H. et al. Long-term operating stability in perovskite photovoltaics. Nature Reviews Materials **8**, 569–586 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00582-w>.
45. Khatoun, S., Kumar Yadav, S., Chakravorty, V., Singh, J., Bahadur Singh, R., Hasnain, M. S. & Hasnain, S. M. M. Perovskite solar cell's efficiency, stability and scalability: A review. Materials Science for Energy Technologies **6**, 437–459 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.04.007>.
46. O'Neill, S. Perovskite Pushes Solar Cells to Record Efficiency. Engineering **7**, 1037–1040 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.009>.
47. Leo, K. Organic photovoltaics. Nature Reviews Materials **1**, 1–2 (2016)

<https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.56>

48. Hu, Y., Wang, J., Yan, C. & Cheng, P. The multifaceted potential applications of organic photovoltaics. *Nature Reviews Materials* **7**, 836–838 (2022)

<https://doi.org/10.1038/s41578-022-00497-y>

49. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Estrategia de Energía Solar de la UE.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52022DC0221> (2022).

50. Resilex – Resilient Enhancement for the Silicon Industry Leveraging the European Matrix. <https://www.resilex-project.eu/> [21/10/2024].

51. Photorama – Photovoltaic waste management – advanced Technologies for recovery & recycling of secondary raw materials from end-of-life modules. <https://www.photorama-project.eu/> [21/10/2024].

52. U.S. Department of Energy. Wind Energy. Supply Chain Deep Dive Assessment.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Wind%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final%202.25.22.pdf> (2022).

53. Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B. & Pavel, C. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Publications Office of the European Union JRC119941 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119941> (2020).

54. Alves, D. P., Bobba, S., Carrara, S. & Plazzotta, B. The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility. Publications Office of the European Union, JRC122671

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC122671> (2020).

55. Herrington, R. Mining our green future. *Nature Reviews Materials* **6**, 456–458 (2021)

<https://doi.org/10.1038/s41578-021-00325-9>

56. European Commission. Substitution of rare-earths for advanced novel magnets in energy and transport applications. BEETHOVEN Project. CORDIS <https://cordis.europa.eu/project/id/101129912> [03/07/2024].

57. European Commission. An environmental-friendly alternative to recovery Rare Earth Elements from spent NdFeB permanent magnets by electrochemical recycling process. REEcycle Project. CORDIS

<https://cordis.europa.eu/project/id/101106819/es> [03/07/2024].

58. European Commission. Bulk rare earth free permanent magnets. REFAMAG Project. CORDIS <https://cordis.europa.eu/project/id/101069203> [03/07/2024].

59. Moreira, S. & Laing, T. J. Sufficiency, Sustainability, and Circularity of Critical Materials for Clean Hydrogen. World Bank Group <https://hdl.handle.net/10986/38413> (2022)

<https://doi.org/10.1596/38413>

60. Mori, M., Stropnik, R., Sekavčnik, M. & Lotrič, A. Criticality and life-cycle assessment of materials used in fuel-cell and hydrogen technologies. *Sustainability* **13**, (2021)

<https://doi.org/10.3390/su13063565>

61. Kiemel, S., Smolinka, T., Lehner, F., Full, J., Sauer, A. & Mieke, R. Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. *International Journal of Energy Research* **45**, 9914–9935 (2021)

<https://doi.org/10.1002/er.6487>

62. Alamiery, A. Advancements in materials for hydrogen production: A review of cutting-edge technologies. *ChemPhysMater* **3**, 64–73 (2024)

<https://doi.org/10.1016/j.chphma.2023.09.002>

63. European Commission. Clean Hydrogen Partnership. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en [05/07/2024].

64. European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. (2020).

65. Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Costa, C. M. & Lancers-Mendez, S. Recent Advances on Materials for Lithium-Ion Batteries. *Energies* **14**, 3145 (2021)

<https://doi.org/10.3390/en14113145>

66. Costa, C. M., Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Castro, H., Campo, F. J. D. & Lancers-Méndez, S. Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials* **37**, 433–465 (2021)

<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.02.032>

67. Janek, J. & Zeier, W. G. Challenges in speeding up solid-state battery development. *Nature Energy* **8**, 230–240 (2023)

<https://doi.org/10.1038/s41560-023-01208-9>

68. Arroyo-De Dompablo, M. E., Ponrouch, A., Johansson, P. & Palacín, M. R. Achievements, Challenges, and Prospects of Calcium Batteries. *Chemical Reviews* **120**, 6331–6357 (2020)

<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00339>

69. Ponrouch, A. & Rosa Palacín, M. Post-Li batteries: Promises and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **377**, (2019)

<https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0297>

70. Building a European battery industry. European Battery Alliance

<https://www.eba250.com/> [05/07/2024].

71. EBA Academy. European Battery Alliance

<https://www.eba250.com/tag/eba-academy/>

[05/07/2024].

72. Battery2030+. Sustainable batteries of the future <https://battery2030.eu/> [05/07/2024].

73. Batteries Europe.

<https://batterieseurope.eu/> [05/07/2024].

74. CarE-Service Project. Circular Economy Business Models for innovative hybrid and electric mobility through advanced reuse and remanufacturing technologies and services.

<https://www.careserviceproject.eu/> [25/09/2024].

75. Free4LiB project. Feasible recovery of critical raw materials through a new circular ecosystem for a Li-ion battery cross-value chain in Europe. European Commission <https://cordis.europa.eu/project/id/101069890/results> [25/09/2024].

76. Renovate.

<https://renovate-project.eu/> [21/10/2024].

77. Respect Recycling.

<https://www.respect-recycling.eu> [21/10/2024].

78. Comisión Europea. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo de las Regiones: REPowerEU: Acción conjunta para una energía más asequible, segura y sostenible. (2022).

79. OECD. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. (OECD, 2019). ISBN: 978–92–64–30744–5.

80. International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives 2023 Analysis*.

<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> [29/05/2024].

81. Lallana, M., Torrubia, J. & Valero, A. Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de suficiencia.

<https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2023/11/Minerales-para-la-transicion-energetica-y-digital.pdf> (2023).

82. Gielen, D. & Lyons, M. Critical materials for the energy transition: Lithium. *International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Lithium.*

83. International Energy Agency (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2024*. (2024).

84. CIRCE-UNIZAR & Amigos de la Tierra. Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de ahorro.

https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2023/12/informe_minerales_para_la_Transicion.pdf (2023).

85. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1–34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

86. European Environment Agency. *Accelerating the circular economy in Europe. State and outlook 2024*. EEA Report 13/2013.

<https://www.eea.europa.eu/publications/accelerating-the-circular-economy>

87. Cattaneo, C. et al. A degrowth approach to urban mobility options: just, desirable and practical options. *Local Environment* **27**, 459–486 (2022)

<https://doi.org/10.1080/13549839.2022.2025769>

88. Müller, B., Ghiotto, L. & Bárcena, L. The Raw Materials Rush. How the European Union is using trade agreements to secure supply of critical raw materials for its green transition.

https://www.tni.org/files/2024-01/The_Raw_Materials_Rush.pdf (2024).

89. Kikstra, J. S. et al. Downscaling down under: towards degrowth in integrated assessment models. *Economic Systems Research* (2024)

<https://doi.org/10.1080/09535314.2023.2301443>

90. Likaj, X., Jacobs, M. & Fricke, T. Growth, Degrowth or Post-growth? Towards a synthetic understanding of the growth debate. *Basic Papers* (2022).

91. Van Den Bergh, J. C. J. M. A third option for climate policy within potential limits to growth. *Nature Climate Change* **7**, 107–112 (2017)

<https://doi.org/10.1038/nclimate3113>

92. Hickel, J. et al. Degrowth can work – here’s how science can help. *Nature* **612**, 400–403 (2022)

<https://doi.org/10.1038/d41586-022-04412-x>

93. van den Bergh, J. C. J. M. & Kallis, G. Growth, A-Growth or Degrowth to Stay within Planetary Boundaries? *Journal of Economic Issues* **46**, 909–920 (2012)

<https://doi.org/10.2753/JEI0021-3624460404>

94. Slameršak, A., Kallis, G., O’Neill, D. W. & Hickel, J. Post-growth: A viable path to limiting global warming to 1.5°C. *One Earth* **7**, 44–58 (2023)

<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.11.004>

95. Hayden, A. The wellbeing economy in practice: sustainable and inclusive growth? Or a post-growth breakthrough? *Humanities and Social Sciences Communications* **11**, 1–15 (2024)

<https://doi.org/10.1057/s41599-024-03385-8>

96. Álvarez Pelegrí, E. & Blanco Álvarez, F. Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización. El papel de la minería y la metalurgia. (Real Academia de Ingeniería de España, 2023). ISBN: 978–84–95662–88–0.

97. Álvarez Pelegrí, E., Blanco Álvarez, F. & Larrea Basterra, M. Las materias primas minerales para la transición energética. *La Ley europea de materias primas fundamentales. Cuadernos de energía* **75**, 54–68 (2023).

98. de la Torre Palacios, L. China y el control de las materias primas críticas. *Política exterior* **37**, 58–71 (2023).

99. Hidalgo García, M. del M. Las restricciones en el comercio de los minerales críticos: hacia la fragmentación geoeconómica mundial. Documento de análisis. Instituto Español de Estudios Estratégicos (2024).

100. Feás, E. & Arnal, J. Materias primas fundamentales en la Unión Europea: 10 recomendaciones para mejorar la contribución de la industria española. Real Instituto Elcano

<https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/materias-primas-fundamentales-en-la-union-europea/> [29/05/2024].

101. Draghi, M. The future of European competitiveness – In-depth analysis and recommendations. https://commission.europa.eu/document/download/ec1409c1-d4b4-4882-8bdd-3519f86bbb92_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness_%20In-depth%20analysis%20and%20recommendations_O.pdf (2024).

102. Soría, B. Y., Sáenz de Santamaría Benedit, J. A., Alonso Martínez de Salinas, Á. & Martín Colino, A. Recursos minerales para la industria española. Análisis de la nueva movilidad. ICAI– Catedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas (2023).

103. European Commission. *RMIS, Raw Materials Information System. Critical, strategic and advanced materials*. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials> [26/05/2024].

104. Conde, M., Mondré, A., Peters, K. & Steinberg, P. Mining questions of 'what' and 'who': deepening discussions of the seabed for future policy and governance. *Maritime Studies* **21**, 327–338 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40152-022-00273-2>.
105. Chen, W. et al. Assembling the Seabed: Pan-European and Interdisciplinary Advances in Understanding Seabed Mining. *Ocean Governance: Knowledge Systems, Policy Foundations and Thematic Analyses* (eds. Partelow, S., Hadjimichael, M. & Hornidge, A.-K.) 275–294 (Springer International Publishing, 2023). ISBN: 978-3-031-20740-2.
106. Autoridad Internacional de los Fondos Marinos. <https://www.isa.org/jm/> [06/07/2024].
107. Lodge, M. La Autoridad Internacional de los Fondos Marinos y la explotación minera de los fondos marinos. Naciones Unidas <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-autoridad-internacional-de-los-fondos-marinos-y-la-explotacion-minera-de-los-fondos-marinos> [22/04/2024].
108. Sustainable Ocean Alliance. Norway to Begin Deep-Sea Mining Exploration in the Arctic. <https://www.soalliance.org/soablog/norway-dsm-vote> [22/04/2024].
109. Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Setting the course for a sustainable blue planet – Joint Communication on the EU's International Ocean Governance agenda. https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/document/download/77056529-clfe-49e4-9776-11c54b060a97_en?filename=join-2022-28_en.pdf (2022).
110. Nature Editorial. Deep-sea mining plans should not be rushed. *Nature* **627**, 704–704 (2024). <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00890-3>.
111. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Estrategia de la UE sobre la biodiversidad de aquí a 2030 Reintegrar la naturaleza en nuestras vidas. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0380> (2020).
112. Nature Editorial. Norway's approval of sea-bed mining undermines efforts to protect the ocean. *Nature* **625**, 424–424 (2024). <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00104-w>.
113. Stokstad, E. As prospect of unregulated deep-sea mining looms, scientists sound the alarm. <https://www.science.org/content/article/prospect-unregulated-deep-sea-mining-looms-scientists-sound-alarm> [06/07/2024].
114. Ferus, M., Žabka, J., Schmidt, N. & Heays, A. Asteroid Prospecting and Space Mining. *Governance of Emerging Space Challenges: The Benefits of a Responsible Cosmopolitan State Policy* (ed. Schmidt, N.) 217–232 (Springer International Publishing, 2022). ISBN: 978-3-030-86555-9.
115. NASA. Robotic Asteroid Prospector (RAP) Staged from L-1: Start of the Deep Space Economy – NASA. <https://www.nasa.gov/general/robotic-asteroid-prospector-rap-staged-from-l-1-start-of-the-deep-space-economy/> [05/07/2024].
116. NASA. Psyche. Mission to a metal-rich world. Eyes on the Solar System – NASA/JPL <https://eyes.nasa.gov/apps/solar-system> [05/07/2024].
117. NASA. OSIRIS-REx. Origins, spectral interpretation, resource identification, and security – Regolith Explorer. <https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex/> [05/07/2024].
118. Consensus Space. <https://www.consensus.space/> [06/07/2024].
119. Asteroid Mining Corporation. Asteroid Mining Corporation <https://www.asteroidminingcorporation.co.uk> [06/07/2024].
120. TransAstra. <https://transastra.com/> [06/07/2024].
121. Sovacool, B. K., Ali, S. H., Bazilian, M., Radley, B., Nemery, B., Okatz, J. & Mulvaney, D. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science* **367**, 30–33 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>.
122. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Estadística Minera de España 2022. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/mineria/Estadistica/DatosBibliotecaConsuner/2022/Estad%20C3%ADstica%20Minera%20de%20Espa%C3%Bl%202022.pdf> [08/07/2024].
123. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Minería y Explosivos. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/mineria-explosivos.html> [07/05/2024].
124. Instituto Geológico y Minero de España (CSIC-IGME). Panorama minero 2022. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (2022).
125. Julivert, M., Fonboté, J. M., Ribeiro, A. & Conde, L. A. Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares E: 1:1.000.000 y memoria explicativa. Publ IGME (1974).
126. Quesada, C. Geological constraints on the Paleozoic tectonic evolution of tectonostratigraphic terranes in the Iberian Massif. *Tectonophysics* **185**, 225–245 (1991). [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90446-Y](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90446-Y).
127. Martínez Catalán, J. R. et al. The late Variscan HT/LP metamorphic event in NW and Central Iberia: relationships to crustal thickening, extension, oroclinal development and crustal evolution. *Geological Society, London, Special Publications* **405**, 225–247 (2014). <https://doi.org/10.1144/SP405.1>.
128. Inverno, C. et al. Introduction and Geological Setting of the Iberian Pyrite Belt. 3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe (ed. Weihed, P.) 191–208 (Springer International Publishing, 2015). ISBN: 978-3-319-17428-0.
129. Llorens González, T., García Polonio, F., López Moro, F. J., Fernández Fernández, A., Sanz Contreras, J. L. & Moro Benito, M. C. Tin-tantalum-niobium mineralization in the Penouta deposit (NW Spain): Textural features and mineral chemistry to unravel the genesis and evolution of cassiterite and columbite group minerals in a peraluminous system. *Ore Geology Reviews* **81**, 79–95 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.034>.
130. Gumiel, P. & Arribas, A. Part IV. Central-Iberian Zone. 2.5. Metallogeny. Pre-Mesozoic Geology of Iberia (eds. Dallmeyer, R. D. & Martínez-García, E.) 212–219 (Springer, 1990). ISBN: 978-3-642-83980-1.
131. Tornos, F., Oliveira, V. M., Inverno, C. M. C., Casquet, C., Mateus, A. & Ortiz, G. The metallogenic evolution of the Ossa-Morena Zone. *Journal of Iberian Geology* **143**–181 (2004).
132. Luque, C., Martínez-García, E. & Ruiz, F. Part II. Cantabrian and Palentian Zones. 5. Metallogenesis. Pre-Mesozoic Geology of Iberia (eds. Dallmeyer, R. D. & Martínez-García, E.) 80–87 (Springer, 1990). ISBN: 978-3-642-83980-1.
133. Luque, C. & Ruiz, F. Part III. West Asturian-Leonese Zone. 6. Metallogenic characteristics. Pre-Mesozoic Geology of Iberia (eds. Dallmeyer, R. D. & Martínez-García, E.) 134–139 (Springer, 1990). ISBN: 978-3-642-83980-1.
134. International Copper Association. Copper – The Pathway to Net Zero Regional Focus: Europe. <https://internationalcopper.org/resource/copper-pathway-to-net-zero-europe/> (2023).
135. Instituto Geológico y Minero de España (CSIC-IGME). Portal de cartografía del IGME: MAGNA 50 – Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie). <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx> [08/07/2024].
136. Instituto Geológico y Minero de España (CSIC-IGME). Navegador de Información Geocientífica. <https://info.igme.es/visor/> [08/07/2024].
137. Ayuk, E. T., Antonio, M. P. & Ekins, P. Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing extractive industries towards sustainable development. *International Resource Panel, United Nations Environment Programme* <https://www.resourcepanel.org/reports/mineral-resource-governance-21st-century> (2020).
138. Eggert, R. Mineral exploration and development: risk and reward. *International Conference on Mining* (2010).
139. International Council on Mining and Metals (ICMM). The role of mining in national economies. Mining's contribution to sustainable development. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/social-performance/2012/research_romine-1.pdf (2012).
140. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Registro Minero. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/mineria-explosivos/mineria/registro.html> [08/07/2024].
141. World Bank Group. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf> (2020).
142. World Bank Group. Climate-Smart Mining Framework. <https://www.worldbank.org/en/programs/climate-smart-mining/csm-framework> [06/07/2024].
143. Jiskani, I. M., Zhou, W., Hosseini, S. & Wang, Z. Mining 4.0 and climate neutrality: A unified and reliable decision system for safe, intelligent, and green & climate-smart mining. *Journal of Cleaner Production* **410**, 137313 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137313>.
144. Chen, L. et al. Autonomous mining through cooperative driving and operations enabled by parallel intelligence. *Communications Engineering* **3**, 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00220-5>.
145. Tripathi, A. K. et al. Integrated smart dust monitoring and prediction system for surface mine sites using IoT and machine learning techniques. *Scientific Reports* **14**, 7587 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58021-x>.
146. Muntin, A. V., Shamshin, M. N., Ziniagin, A. G., Hlybov, O. S., Zonov, A. S., Kavitsian, L. M. & Skachkov, S. D. Digitalization as the Most Important Tool for the Improvement of Metallurgical Technologies. *Metallurgist* **66**, 1051–1067 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01418-2>.
147. López Jimeno, C. La cuarta revolución industrial y la digitalización en el sector extractivo. *Rocas y minerales* **596**, 38–56 (2022).
148. Reglamento (UE) 2024/1781 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, por el que se instaaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos sostenibles, se modifican la Directiva (UE) 2020/1828 y el Reglamento (UE) 2023/1542 y se deroga la Directiva 2009/125/CE (Texto pertinente a efectos del EEE). (2024).
149. Joint Research Centre, European Commission. Advanced materials for substitution in the clean energy sector. JRC136474 https://setis.ec.europa.eu/advanced-materials-substitution-clean-energy-sector_en (2024).
150. Mitrica, D. et al. Complex Concentrated Alloys for Substitution of Critical Raw Materials in Applications for Extreme Conditions. *Materials* **14**, 1197 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14051197>.
151. EIT Raw Materials Academy. What is substitution? <https://rmschools.isof.cnr.it/category/substitution/> [03/06/2024].
152. Endl, A., Tost, M., Hitch, M., Moser, P. & Feiel, S. Europe's mining innovation trends and their contribution to the sustainable development goals: Blind spots and strong points. *Resources Policy* **74**, 101440 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101440>.
153. European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. EU principles for sustainable raw materials. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/27875> (2021).
154. Comisión Europea. Un enfoque de la UE para la mejora de la seguridad económica. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_23_3358 [22/04/2024].
155. Arteaga, F., Feas, E., Molina, I., Otero Iglesias, M., Simón, L. & Steinberg, F. La seguridad económica de Europa. Real Instituto Elcano <https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/la-seguridad-economica-de-europa/> (2023).
156. Castellet Nogués, E. Seguridad económica: una nueva era para la Unión Europea. Real Instituto Elcano <https://www.realinstitutoelcano.org/comentarios/seguridad-economica-una-nueva-era-para-la-union-europea/>.
157. European Union External Action. Por qué es importante la autonomía estratégica europea. https://www.eeas.europa.eu/eeas/por-que-c3%A9-es-importante-la-autonom%C3%ADa-estrat%C3%A9gica-europea_es [10/04/2024].

158. Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia del Gobierno de España. Autonomía Estratégica Abierta. España 2050. <http://futuros.gob.es/nuestro-trabajo/AEA> [22/04/2024].
159. Feás, E. La geopolítica actual y la autonomía estratégica. El resurgir del conflicto librecambio-proteccionismo. *ICE, Revista de Economía* 935, (2024) <https://doi.org/10.32796/ice.2024.935.7793>.
160. European Commission. Raw materials diplomacy. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/raw-materials-diplomacy_en [10/07/2024].
161. Consejo Europeo & Consejo de la Unión. Europea. Acuerdos comerciales de la UE. Consilium <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/trade-policy/trade-agreements/> [18/07/2024].
162. European Commission. EU and international partners agree to expand cooperation on critical raw materials. EU and partners launch Minerals Security Partnership Forum https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1807 [17/10/2024].
163. Calzada Olvera, B. & Foster-McGregor, N. What is the potential of natural resource based industrialisation in Latin America? An Input-Output analysis of the extractive sectors. MERIT Working Papers (2018).
164. Ghiotto, L. Mercosur y Unión Europea: un acuerdo que profundiza las asimetrías comerciales y reduce las asimetrías regulatorias. Observatorio Latinoamericano y Caribeño 6, 64–82 (2022).
165. Estevadeordal, A., Werner, A. & Talvi, E. Acuerdo UE-Mercosur: una oportunidad estratégica de primer orden para la Unión Europea y América Latina. Real Instituto Elcano <https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/acuerdo-ue-mercosur-una-oportunidad-estrategica-de-primer-orden-para-la-union-europea-y-america-latina/> (2023).
166. Letta, E. Much more than a market. Speed, security, solidarity. Empowering the Single Market to deliver a sustainable future and prosperity for all EU Citizens. <https://www.consilium.europa.eu/media/ny3j24sm/much-more-than-a-market-report-by-enrico-letta.pdf> (2024).
167. Pacheco, M. France, Germany, Italy seek private input for €2.5bn critical mineral investment. <https://www.euronews.com/green/2024/05/17/france-germany-italy-look-private-input-for-25bn-critical-mineral-investment> [17/10/2024].
168. Ruiz Guix, P. El impacto de la Inflation Reduction Act en las relaciones transatlánticas. Real Instituto Elcano <https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/el-impacto-de-la-inflation-reduction-act-en-las-relaciones-transatlanticas/> (2023).
169. Valero, A., Valero, A. & Calvo, G. Resumen y análisis crítico del informe especial de la Agencia Internacional de la Energía: El Rol de los minerales críticos en la transición hacia energías limpias. *Revista de Metalurgia* 57, e197 (2021) <https://doi.org/10.3989/revmetalm.197>.
170. European Commission. Circular economy. https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en [10/04/2024].
171. Naciones Unidas. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://sdgs.un.org/2030agenda> (2015).
172. Parlamento Europeo. Economía circular: definición, importancia y beneficios. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/articulo/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios> [10/04/2024].
173. Rubel, H., Schmidt, M. & Meyer zum Felde, A. The Urgency—and the Opportunity—of Smart Resource Management. BCG Global <https://www.bcg.com/publications/2017/sustainability-operations-urgency-opportunity-smart-resource-management> [23/09/2024].
174. Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). (2024).
175. Reglamento (UE) 2023/1542 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de julio de 2023, relativo a las pilas y baterías y sus residuos y por el que se modifican la Directiva 2008/98/CE y el Reglamento (UE) 2019/1020 y se deroga la Directiva 2006/66/CE. (2023).
176. Mononen, T., Kivinen, S., Kotilainen, J. M. & Leino, J. Social and environmental impacts of mining activities in the EU. European Parliament. Policy Department for Citizens' Rights and Constitutional Affairs. Policy Department for Citizens' Rights and Constitutional Affairs Directorate-General for Internal Policies PE 729.156 (2022).
177. Lesser, P., Gugerell, K., Poelzer, G., Hitch, M. & Tost, M. European mining and the social license to operate. *The Extractive Industries and Society* 8, 100787 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.021>.
178. Hosseinpour, M., Osanloo, M. & Azimi, Y. Evaluation of positive and negative impacts of mining on sustainable development by a semi-quantitative method. *Journal of Cleaner Production* 366, 132955 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132955>.
179. Mancini, L. & Sala, S. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy* 57, 98–111 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>.
180. Lèbre, É. et al. The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications* 11, 4823 (2020) <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>.
181. Scheidel, A. et al. Global impacts of extractive and industrial development projects on Indigenous Peoples' lifeways, lands, and rights. *Science Advances* 9, eade9557 (2023) <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade9557>.
182. Raitio, K., Allard, C. & Lawrence, R. Mineral extraction in Swedish Sápmi: The regulatory gap between Sami rights and Sweden's mining permitting practices. *Land Use Policy* 99, 105001 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105001>.
183. Naeini, S. A. B. & Badri, A. Identification and categorization of hazards in the mining industry: A systematic review of the literature. 15, 1–19 (2023) <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00621>.
184. Organización Internacional del Trabajo. Convenio sobre seguridad y salud en las minas. [https://normlex.ilo.org/dyn/normlex/es/f?p=NORMLEX-PUB:12100:0:NO:P12100_INSTRUMENT_ID:312321\(1995\)](https://normlex.ilo.org/dyn/normlex/es/f?p=NORMLEX-PUB:12100:0:NO:P12100_INSTRUMENT_ID:312321(1995)).
185. Organización Internacional del Trabajo. Repertorio de recomendaciones prácticas sobre seguridad y salud en las minas a cielo abierto. <https://www.ilo.org/es/resource/otro/repertorio-de-recomendaciones-practicas-sobre-seguridad-y-salud-en-las> [19/09/2024].
186. Organización Internacional del Trabajo. Seguridad y salud en las minas de carbón subterráneas. <https://www.ilo.org/es/resource/seguridad-y-salud-en-las-minas-de-carbon-subterraneas-O> [19/09/2024].
187. Reglamento (UE) 2017/ 821 del Parlamento Europeo y del Consejo - de 17 de mayo de 2017 - por el que se establecen obligaciones en materia de diligencia debida en la cadena de suministro por lo que respecta a los importadores de la Unión de estaño, tantalio y wolframio, sus minerales y oro originarios de zonas de conflicto o de alto riesgo. (2017).
188. International Labour Organization. Child labour in mining and global supply chains. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---asia/---ro-bangkok/---ilo-manila/documents/publication/wcms_720743.pdf (2019).
189. Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 2011, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (texto codificado) Texto pertinente a efectos del EEE. OJ L vol. 026 (2011).
190. Jefatura del Estado. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. vol. BOE-A-2013-12913 98151–98227 (2013).
191. Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras. BOE-A-2009-9841. (2009).
192. Haddaway, N. R., Cooke, S. J., Lesser, P., Macura, B., Nilsson, A. E., Taylor, J. J. & Raito, K. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol. *Environmental Evidence* 8, 9 (2019) <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0152-8>.
193. Aramendia, E., Brockway, P. E., Taylor, P. G. & Norman, J. Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. *Global Environmental Change* 83, 102745 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745>.
194. Torrubia, J., Valero, A. & Valero, A. Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition. *Resources, Conservation and Recycling* 199, 107281 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107281>.
195. Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H. & Edraki, M. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience* 13, 100–104 (2020) <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>.
196. Hamor, T., Vidal, L. B., Zampori, L., Eynard, U. & Pennington, D. A review of European Union legal provisions on the environmental impact assessment of non-energy minerals extraction projects. *JRC Publications Repository* <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125111> [11/05/2024] <https://doi.org/10.2760/705726>.
197. Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Calidad del aire. (2023) <https://doi.org/10.57952/h3ye-1663>.
198. Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M. & Valenta, R. K. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications* 11, 4174 (2020) <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>.
199. Junker, J. et al. Threat of mining to African great apes. *Science Advances* 10, ead10335 (2024) <https://doi.org/10.1126/sciadv.ad10335>.
200. World Resources Institute. Aqueduct Water Risk Atlas. <https://www.wri.org/data/aqueduct-water-risk-atlas> [03/06/2024].
201. Lakshman, S. More Critical Minerals Mining Could Strain Water Supplies in Stressed Regions. *World Resources Institute* <https://www.wri.org/insights/critical-minerals-mining-water-impacts> (2024).
202. Hatayama, H. & Tahara, K. Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past. *Resources Policy* 55, 96–102 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.002>.
203. Rüttinger, L., van Ackern, P., Lepold, T., Vogt, R. & Auberger, A. Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply. *German Environment Agency* 106/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_106-2020_impacts_of_climate_change_on_mining_related_environmental_risks_and_raw_material_supply.pdf (2020).
204. Conde, M. & Le Billon, P. Why do some communities resist mining projects while others do not? *Extractive Industries and Society* 4, 681–697 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.04.009>.
205. Kivinen, S., Kotilainen, J. & Kumpula, T. Mining conflicts in the European Union: environmental and political perspectives. *Fennia - International Journal of Geography* 198, 163–179 (2020) <https://doi.org/10.11143/fennia.87223>.
206. Conde, M. Resistance to Mining: A Review. *Ecological Economics* 132, 80–90 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025>.
207. Global Atlas of Environmental Justice.

<https://ejatlas.org/> [11/07/2024].

208. Tiainen, H., Sairinen, R. & Sidorenko, O. Governance of Sustainable Mining in Arctic Countries: Finland, Sweden, Greenland & Russia. Arctic Yearbook 2015

https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2015/Scholarly_Papers/7.Governance-of-Sustainable-Mining.pdf (2015).

209. Tuulentie, S., Halseth, G., Kietäväinen, A., Ryser, L. & Similä, J. Local community participation in mining in Finnish Lapland and Northern British Columbia, Canada – Practical applications of CSR and SLO. Resources Policy 61, 99–107 (2019)

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.015>.

210. Pölonen, I., Allard, C. & Raitio, K. Finnish and Swedish law on mining in light of collaborative governance. Nordisk miljörettslig tidskrift 99–134 (2020).

211. Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OECD). Líneas Directrices de la OCDE para Empresas Multinacionales sobre Conducta Empresarial Responsable. (OECD, 2023). ISBN: 978-92-64-69948-9.

212. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). Marco de Monitoreo y Evaluación: Guía de Debida Diligencia de la OCDE para Cadenas de Suministro Responsables de Minerales en Áreas de Conflicto o de Alto Riesgo. (2021).

213. Comisión Europea. Explicación de la debida diligencia.

https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/duo-diligence-ready/duo-diligence-explained_es [03/06/2024].

214. Asociación Española de Normalización. UNE 22480:2019 Sistema de gestión de minería-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Requisitos.

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0061905> [01/06/2024].

215. Asociación Española de Normalización. UNE 22470:2019 Sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Indicadores.

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0061904> [01/06/2024].

216. Pacto Mundial de las Naciones Unidas. Diez Principios de la ONU. ¿Qué puedes hacer tú? Pacto Mundial <https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/diez-principios/> [01/06/2024].

217. Naciones Unidas. Principios Rectores Sobre las Empresas y los Derechos Humanos: Puesta en Práctica del marco de las Naciones Unidas para "proteger, Respetar y Remediar". (United Nations, 2011). ISBN: 978-92-1-056599-8.

218. Equator Principles. About equator Principles. A financial industry benchmark for determining, assessing and managing environmental and social risk in projects. <https://equator-principles.com/> [01/06/2024].

219. Parlamento Europeo. Diligencia debida de las empresas y responsabilidad corporativa. P9_TA(2021)0073. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0073_ES.html [22/09/2024].

220. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030.

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_defl_tcm30-509532_mod_tcm30-509532.pdf.

221. Spinaci, S. Right to repair: Strengthened consumer rights | Think Tank | Parlamento Europeo. European Parliament. European Parliamentary Research Service. PE 753.927

[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document/EPRS_BRI\(2023\)753927](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document/EPRS_BRI(2023)753927) (2023).

222. Parlamento Europeo. Nueva normativa europea para promover la reparación de productos y dispositivos. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/2023/11/17/PRI2211/nueva-normativa-europea-para-promover-la-reparacion-de-productos-y-dispositivos> [03/06/2024].

223. Moss, R. et al. Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector: assessing rare metals as supply chain bottlenecks in low carbon energy technologies. (Publications Office of the European Union, 2013). ISBN: 978-92-79-30390-6.

224. Spooren, J. et al. Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends. Resources, Conservation and Recycling 160, 104919 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>.

225. Kehl, C. & Rioussat, P. Strategies and instruments for improving the use of recycled materials. TAB-Fokus. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000169039> (2024) <https://doi.org/10.5445/IR/1000169039>.

226. European Environment Agency. Investigating Europe's secondary raw material markets. <https://www.eea.europa.eu/publications/investigating-europes-secondary-raw-material> (2022).

227. Comisión Europea. Recomendación (UE) 2022/2510 de la Comisión de 8 de diciembre de 2022 relativa al establecimiento de un marco europeo de evaluación de sustancias químicas y materiales «seguros y sostenibles desde el diseño». OJ L

<http://data.europa.eu/eli/reco/2022/2510/oj/spa> (2022).

228. European Commission. Ecodesign for Sustainable Products Regulation.

https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labeling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en [11/04/2024].

229. Talens Peiró, L., Castro Girón, A. & Gabarrell i Durany, X. Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives. Journal of Cleaner Production 248, 119216 (2020)

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119216>.

230. Gu, F., Summers, P. A. & Hall, P. Recovering materials from waste mobile phones: Recent technological developments. Journal of Cleaner Production 237, 117657 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117657>.

231. Hagelüken, C. & Corti, C. W. Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling'. Gold Bulletin 43, 209–220 (2010) <https://doi.org/10.1007/BF03214988>.

232. United Nations Institute for Training and Research. Global e-Waste Monitor 2024: Electronic Waste Rising Five Times Faster than Documented E-waste Recycling. <https://www.unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling> [09/07/2024].

233. Zhang, K., Schnoor, J. L. & Zeng, E-Waste Recycling: Where Does It Go from Here? | Environmental Science & Technology. 46(20), 10861–10867 (2012) <https://doi.org/10.1021/es303166s>.

234. van der Merwe, A., Cabernard, L. & Günther, I. Urban mining: The relevance of information, transaction costs and externalities. Ecological Economics 205, 107735 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107735>.

235. Habib, H., Wagner, M., Baldé, C. P., Martínez, L. H., Huisman, J. & Dewulf, J. What gets measured gets managed – does it? Uncovering the waste electrical and electronic equipment flows in the European Union. Resources, Conservation and Recycling 181, 106222 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106222>.

236. Zeng, X., Mathews, J. A. & Li, J. Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining. Environmental Science & Technology 52, 4835–4841 (2018) <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04909>.

237. Atlantic Copper. Atlantic Copper presenta el proyecto 'circular' a siete asociaciones de vecinos de Huelva. <https://www.atlantic-copper.es/sala-de-prensa/comunicados-de-prensa/812-atlantic-copper-presenta-el-proyecto-circular-a-siete-asociaciones-de-vecinos-de-huelva> [24/09/2024].