

# Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de ahorro



Amigos de  
la Tierra

## + Coordinación técnica y edición de contenidos

Adriana Espinosa (Amigos de la Tierra)

## + Edición de contenidos y supervisión de imagen

Teresa Rodríguez Pierrard (Amigos de la Tierra)

## + Investigación, redacción y asesoramiento

Martín Lallana, Jorge Torrubia, Alicia Valero

Instituto Universitario de Investigación Mixto CIRCE - Universidad de Zaragoza

## + Diseño y maquetación

Zuriñe de Langarika Samaniego

## + Fotografías

### + Desde Rawpixel

Imagen de mina a cielo abierto (portada, pags. 4 y 7)

Imagen de aerogenerador y placas fotovoltaicas (pag. 20)

Imagen de coches en atasco (pag. 24)

### + Desde Pixabay

Imagen nocturna de la excavación (pag. 12), por nettetal10

Imagen aerogenerador (pag. 16), por Pfüderi

Imagen coche eléctrico (pag. 30), por andreas160578

Imagen placas sobre tejado (pag. 57), por Manfred Antranias Zimmer

Imagen placas sobre tejado (pag. 67), por Roy Buri

### + Desde Unsplash

Imagen de mina a cielo abierto (pag. 60), por Aedrian



## + Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



Diciembre de 2023

# Índice

<b>Resumen ejecutivo</b>	5
<b>1. Motivación del estudio y objetivos</b>	13
<b>2. Metodología y modelo de cálculo</b>	21
<b>3. Políticas públicas y escenarios</b>	25
<b>4. Resultados</b>	41
<b>4.1. Resultados tecnológicos</b>	41
<b>4.2. Demanda y recuperación de metales</b>	44
<b>4.3. Extracción primaria</b>	50
<b>4.4. Ahorro en la demanda y extracción de metales</b>	55
<b>5. Evaluación de la extracción primaria</b>	61
<b>5.1. Impactos de la extracción primaria</b>	61
<b>5.2. Comparaciones con perspectiva de justicia global</b>	65
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	69
<b>7. Notas</b>	77







# Resumen ejecutivo

## Prólogo de Amigos de la Tierra

**P**ara mantener una economía basada en el crecimiento continuo, la Unión Europea necesita garantizar el suministro de materias primas, incluyendo los recursos minerales fundamentales para su industria. En este marco, la UE se suma a otras potencias globales como Estados Unidos en su preocupación ante las proyecciones de aumento de la demanda mineral asociado a unas políticas de transición energética y digital que buscan descarbonizar nuestra economía sin plantear cambiar nuestro modelo de producción y de consumo.

En este contexto, la Comisión Europea presentó en marzo de 2023 su propuesta para una “*Ley Europea de Materias Primas Fundamentales*”, que tiene el objetivo de “garantizar un suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales para la industria europea y reducir significativamente la dependencia de la UE”. El texto se publicó como parte del “Plan Industrial del Pacto Verde”, un paquete normativo centrado en aumentar la producción europea de “energías limpias” y reducir la dependencia de potencias como China o Rusia. Aunque la propuesta de ley de materias primas se presenta vinculada a la transición energética y digital, en realidad sus objetivos van más allá de garantizar la descarbonización de nuestra economía. Con el Plan Industrial para el Pacto Verde, la Unión Europea busca posicionarse en un contexto global marcado por una carrera por los recursos, tensiones geopolíticas, aumento del precio de la energía e inflación, dinámicas aceleradas por la pandemia y por la guerra de Ucrania<sup>1</sup>.

Al mismo tiempo, organismos como la Agencia Internacional de la Energía han proyectado un fuerte incremento en la demanda de minerales críticos para la transición energética y digital (y para otros sectores como defensa<sup>2</sup> y la carrera aeroespacial) y la Unión Europea es consciente de su dependencia respecto a otros actores, principalmente China, para el sumi-



nistro de estos recursos. En este contexto, la respuesta europea a través de políticas como la citada Ley de materias primas se centra en varios ejes: aumentar la extracción de minerales dentro de Europa al tiempo que se amplía y diversifica el suministro desde terceros países, agilizar los permisos y facilitar apoyo económico para los proyectos considerados “estratégicos” y fomentar la circularidad en las cadenas de suministro. Lo que este enfoque ignora, como critican diferentes organizaciones<sup>3</sup>, es la adopción de medidas que podrían reducir o mitigar la demanda de minerales y, así, la necesidad de extracción primaria.

En el plano estatal, en 2022 el Gobierno aprobó la “Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales”, que ya recogía la necesidad de aumentar la extracción minera doméstica. No obstante, esta hoja de ruta no se sustenta en ningún estudio específico sobre el aumento de la demanda de minerales asociada a los actuales planes de transición ecológica en España, ni contempla medidas para mitigar o reducir dicha demanda. Al mismo tiempo, diferentes organizaciones, como Amigos de la Tierra, alertamos sobre la aparición de un nuevo “boom minero” en España y sobre los impactos socioambientales de la actividad extractiva, tanto vinculados a los proyectos pasados y presentes, como los que se intensificarán en el futuro.

## **Estudio**

Esta investigación pretende cubrir una de las carencias identificadas en el marco descrito: la ausencia de un análisis específico sobre la demanda mineral asociada a los planes de transición energética y digital en España así como del potencial impacto de medidas dirigidas a aumentar la recuperación de minerales y reducir la demanda. Este análisis tiene como trasfondo una pregunta esencial: la de si es posible lograr una transición ecológica sostenible y socialmente justa por medio de una mera sustitución de las fuentes de energías y sin cambiar nuestro modelo de producción y consumo. La crisis ecosocial en la que estamos inmersas nos lleva a plantearnos diferentes alternativas para afrontar el futuro. Es necesario avanzar hacia una transición energética, ¿pero es posible hacerlo en los términos actuales, en el marco de una economía que no contempla los límites planetarios ni el bienestar de sus sociedades?







Esta investigación realiza un **análisis de las consecuencias minerales de los planes de transición energética y digital de España hasta 2050. Asimismo, evalúa el impacto que diferentes medidas de reciclaje, economía circular y suficiencia podrían tener en la reducción de la demanda y de los requerimientos de extracción primaria.** El estudio se centra en 10 grupos de metales: aluminio (Al), cobre (Cu), cobalto (Co), litio (Li), manganeso (Mn), níquel (Ni), oro (Au), plata (Ag), PGM (platino (Pt) y paladio (Pd)) y tierras raras (disprosio (Dy) y neodimio (Nd)) y en seis ámbitos tecnológicos relacionados con la generación de energía renovable, el almacenamiento energético, la movilidad eléctrica y la tecnología digital.

En el *Capítulo 1* se describe el alcance y los objetivos del estudio. En el *Capítulo 2* se describen brevemente la metodología y el modelo de cálculo. La investigación está basada en la metodología de *análisis del flujo de materiales* (MFA por sus siglas en inglés), que nos permite conocer tanto la demanda de metales asociados a las diferentes tecnologías como la cantidad de metales contenidos en las tecnologías que llegan al final de su vida útil. En el *Capítulo 3* se describen las políticas públicas estatales que sirven de base para evaluar la demanda de minerales, así como los 3 escenarios diferentes que se han definido. Estos escenarios permiten comparar las variaciones en la demanda mineral futura en función de si la transición energética se lleva a cabo contemplando un impulso decisivo del reciclaje así como otras medidas para ahorrar recursos minerales, por ejemplo cambiar el modelo de movilidad reduciendo la flota de turismos y apostando por el transporte público.



## Resultados

En el *Capítulo 4* se describen los resultados de la investigación, que se presentan en tres pasos: resultados de las (i) tecnologías que deben fabricarse como consecuencia de las políticas públicas de transición energética; (ii) demanda de metales que se deriva de esos escenarios y la recuperación de metales según las tasas de recogida y reciclaje consideradas, y por último, (iii) requerimientos de extracción primaria vinculados con los resultados anteriores. Para todos estos resultados se hace un análisis comparativo, examinando cómo aumentan o disminuyen los materiales (tecnologías, demanda, reciclaje y extracción primaria) según se apliquen o no las medidas de economía circular y suficiencia mencionadas.

Algunos de **los principales resultados** para el periodo hasta 2050 son:

- » **La movilidad eléctrica domina la demanda de metales**, siendo responsable del 54-58% de la demanda acumulada de aluminio y cobre, del 73-92% de manganeso, cobalto, níquel y litio, y del 79% de disprosio y neodimio en 2020-2050. Para el caso concreto del paladio y platino el principal motor de la demanda es la fabricación de electrolizadores para **hidrógeno verde** (77%).
- » **El aumento en la recogida y reciclaje de metales a partir de los residuos tecnológicos lograría cubrir el 57% de la demanda de minerales** en el escenario de transición en el que se aplican las actuales políticas de transición energética y digital junto a una mejora en los sistemas de reciclaje.
- » La demanda de metales así como la extracción primaria asociada se pueden reducir aplicando una **combinación de medidas de economía circular y suficiencia (alargar la vida útil de las tecnologías, medidas ambiciosas de reciclaje y su aceleración, limitar el tamaño de las baterías de coches eléctricos y fomentar su reutilización, y reducir la flota de vehículos privados, aumentando el número de autobuses)**, logrando:

- + Una **reducción media del 34% de la demanda de metales** y del 50% para metales clave para la transición como el litio;
- + Aumentar **la contribución de los metales reciclados cubriendo hasta un 67%** de la demanda;
- + **Reducir los requerimientos de extracción primaria de media un 49%** para el conjunto de los metales, y hasta un 61% en el caso del aluminio o un 52% en el caso del manganeso.

» **Las medidas relacionadas con la movilidad son las que mayor impacto tienen en la reducción de la extracción primaria.** Disminuir la flota de vehículos privados en circulación (alcanzando en 2050 una flota de turismos tres veces menor que la actual) y apostar por los autobuses lograría reducir entre un 5 y un 35% la necesidad de extracción primaria según el metal analizado.

En el Capítulo 5 se examinan las **consecuencias de la extracción primaria** asociada a las políticas públicas analizadas en función de sus impactos ambientales y desde un enfoque de justicia global. Respecto a los impactos ambientales, observamos que la contribución de la extracción primaria al consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> en España podría reducirse hasta un 52% aplicando las medidas de economía circular y suficiencia.

Al mismo tiempo, la demanda de metales asociada a la transición energética y digital **supera con creces lo que sería la fracción equitativa de recursos de España para algunos metales, consumiendo casi el doble de lo que nos corresponde de cobalto, y casi alcanzando nuestra fracción en el caso del litio.** Esto, considerando que mejoramos las tasas de reciclaje actuales. Si apostamos por un escenario de transición sin ninguna mejora en reciclaje, los datos son mucho peores, pero pueden mejorarse aplicando las medidas de ahorro señaladas. Estos datos no tienen en cuenta la demanda del resto de sectores de la economía, lo que aumentaría considerablemente la demanda en algunos metales.



## **Principales recomendaciones**

El *Capítulo 6* finaliza este trabajo resumiendo las principales conclusiones y recomendaciones para las autoridades públicas. A la luz de los datos y análisis presentados en este trabajo, Amigos de la Tierra propone las siguientes **recomendaciones**:

- » **Abordar el necesario cambio en el modelo de movilidad en España, de forma que se reduzca de forma drástica la flota de vehículos privados en circulación** y se apueste por el transporte público. En relación con el coche eléctrico, establecer al mismo tiempo un límite al tamaño de las baterías.
- » **Alargar la vida útil de las tecnologías eólicas, fotovoltaicas y los turismos eléctricos.**
- » **Impulsar el desarrollo de la industria de la minería urbana en España**, de forma que al menos se alcancen unas tasas de recogida y reciclaje que permitan que los metales secundarios contribuyan al 57% de la demanda entre 2020 y 2050.
- » **Abordar el debate y planificación sobre el suministro de materias primas minerales desde una perspectiva de justicia global** que evite reproducir las desigualdades internacionales existentes.
- » **Garantizar que la planificación y adopción de políticas relacionadas con las materias primas minerales y los proyectos de extracción primaria cuentan con la participación de las comunidades locales potencialmente afectadas (dentro y fuera de Europa).**
- » **A la hora de planificar la gestión y destino de las materias primas minerales relacionadas con la transición energética, priorizar aquellos modelos colectivos que garantizan una soberanía energética**, además del conocimiento y alfabetización energética de la población y por tanto un consumo eficiente, tales como las **comunidades energéticas**.



- » **Aprobar la condición de terrenos no registrables para todos los lugares de la red Natura 2000 y aquellos otros que hayan sido merecedores de protección** incompatible con las actividades extractivas, como es el caso de las reservas fluviales y sus cuencas, los perímetros de protección de las captaciones de aguas para el abastecimiento urbano, entre otras.

Asimismo, recomendamos al Gobierno de España adoptar **las siguientes medidas encaminadas a avanzar hacia un modelo de producción y de consumo respetuoso** con las personas y el planeta:

- » Establecer objetivos y medidas para reducir de forma absoluta el consumo de recursos minerales y la huella material e impulsar en la UE la adopción de un objetivo vinculante de reducción de la huella material del 65% para 2050.
- » Diseñar políticas post-crecimiento para reducir sectores económicos que son destructivos con el medio ambiente y cuyos beneficios sociales son escasos o nulos, y mantener o incrementar aquellos sectores que satisfacen las necesidades básicas y el bienestar para todas.
- » Promover una economía circular que incluya el diseño de infraestructuras y productos duraderos y que cumplan los principios de “suficiencia y eficiencia”.
- » Garantizar el respeto de los derechos humanos y la rendición de cuentas de todas las empresas, incluyendo las que desarrollan proyectos para la extracción y procesamiento de materias primas minerales, allá donde operan, así como el derecho de las comunidades a decir no a los proyectos mineros.
- » Acabar con la explotación económica y de recursos del Sur Global, poniendo fin a acuerdos comerciales y de protección de inversiones que socavan la acción de los gobiernos para proteger los derechos humanos y el medio ambiente, tales como el acuerdo UE-Mercosur.





# Motivación del estudio y objetivos

# 1

«La edad de piedra llegó a su fin pero no porque se agotaran las piedras, y la era del petróleo llegará a su fin, pero no por el agotamiento del petróleo»

Esta cita se le suele atribuir a Ahmed Zaki Yamani, quien fue ministro de petróleo y recursos minerales de Arabia Saudita entre 1962 y 1986. Décadas después del momento en el que se pronunció, nos encontramos con la urgencia de poner fin a la era del petróleo dejando bajo tierra el 60% de sus reservas para así tener una mínima posibilidad de no superar un calentamiento global de 1.5°C<sup>4</sup>. Sin embargo, justo cuando la historia parecía empezar a darle la razón, miramos desde un prisma diferente la primera parte de la frase: ¿agotarán las piedras el fin de la era del petróleo?

Durante los últimos años ha aumentado el interés y la preocupación por la demanda de minerales en la fabricación de las tecnologías requeridas para la transición energética. Investigaciones del Banco Mundial<sup>5</sup>, la Agencia Internacional de la Energía<sup>6</sup> o la Comisión Europea<sup>7</sup> pronostican un fuerte incremento en la demanda de metales como el cobre, el litio, el cobalto, el níquel o las tierras raras. Más allá de las previsiones, entre 2017 y 2022 la demanda global de litio se ha triplicado, la de cobalto ha aumentado un 70% y la de níquel un 40%<sup>8</sup>. Un incremento que se vincula principalmente con el sector energético.

Esta situación está provocando que múltiples gobiernos en todo el mundo establezcan listas de materias primas fundamentales o estratégicas y tomen medidas para garantizar el suministro para sus economías. En Estados Unidos, la «Inflation Reduction Act» (IRA) establece un descuento de 3.750 \$ al precio de compra de un vehículo eléctrico si los minerales críticos de su batería han sido extraídos, procesados o reciclados en el país<sup>9</sup>. La Comisión Europea presentó en 2023 su propuesta para una «Ley Europea de Materias Primas Fundamentales»<sup>10</sup> como uno de los tres pilares fundamentales del «Plan Industrial del Pacto Verde»<sup>11</sup>. En esta ley se establece una lista



**Entre 2017 y 2022 la demanda global de litio se ha triplicado, la de cobalto ha aumentado un 70% y la de níquel un 40%<sup>13</sup>. Un incremento que se vincula principalmente con el sector energético y el transporte.**

de materias primas estratégicas<sup>12</sup> y se fijan objetivos concretos para 2030: 10% del consumo europeo se cubrirá con la extracción doméstica, un 40% con la transformación y un 25% con el reciclado en la Unión Europea.

Bajo la óptica de garantizar la seguridad de suministro de materias primas y la sostenibilidad en su extracción, múltiples gobiernos están subvencionando y reduciendo el riesgo económico de proyectos mineros<sup>14</sup>. A esto se le suma también una reducción de la carga administrativa y los procedimientos de concesión de permisos para proyectos. Organizaciones ecologistas como Amigos de la Tierra, OMAL o Ecologistas en Acción advierten de cómo esta nueva situación está facilitando e impulsando prácticas especulativas<sup>15</sup> y un *boom minero* en España<sup>16</sup>.

La «Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales»<sup>17</sup> elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) en 2022, reafirma la necesidad de aumentar la actividad de extracción minera doméstica. Sin embargo, este documento no se basa en ningún estudio específico sobre la demanda de minerales futura de España bajo los actuales planes de transición energética<sup>18</sup>.

Es aquí donde se inserta nuestra investigación. Buscamos cubrir el hueco en la información disponible y examinar las consecuencias minerales de los planes de transición energética y digital de España. Para ello, nos fijamos los siguientes cuatro objetivos:

- » Estimar la **demanda** de metales asociada a las políticas públicas de transición energética en España hasta 2050.
- » Determinar qué parte de dicha demanda podría ser cubierta con metales obtenidos desde el **reciclaje** y qué parte debería suministrarse desde la **extracción primaria**.
- » Explorar diferentes **alternativas de economía circular y suficiencia** que reducirían la demanda y minimizarían los requerimientos de extracción primaria.
- » Evaluar la extracción primaria resultante desde dos perspectivas: sus **impactos medioambientales** y una **distribución equitativa de las reservas minerales globales**.

En este estudio examinamos los requerimientos minerales asociados a las tecnologías que se instalarán en el futuro en España, independientemente de donde hayan sido fabricadas. Nos centramos en seis ámbitos tecnológicos específicos:

- » **Generación renovable de electricidad:** eólica y fotovoltaica
- » **Movilidad eléctrica:** turismos y autobuses eléctricos
- » **Infraestructuras eléctricas:** puntos de recarga de vehículos eléctricos, líneas y subestaciones eléctricas
- » **Hidrógeno verde:** electrolizadores
- » **Almacenamiento energético:** baterías para el almacenamiento energético
- » **Tecnologías digitales:** Aparatos eléctricos y electrónicos (AEE)

Para garantizar la atención y profundidad requerida hemos centrado nuestra investigación en diez grupos de metales: **aluminio** (Al), **cobre** (Cu), **cobalto** (Co), **litio** (Li), **manganeso** (Mn), **níquel** (Ni), **oro** (Au), **plata** (Ag), PGM (**platino** (Pt) y **paladio** (Pd)) y tierras raras (**disproσιο** (Dy) y **neodimio** (Nd)). Realizamos esta selección en base a tres criterios:





(1) importancia en el aumento de concesiones de licencias mineras en España, (2) centralidad de su demanda en las tecnologías de transición energética y digital y (3) consideración como materia prima fundamental o estratégica por la Unión Europea.

## + Resumen de la sección +

### Motivación del estudio y objetivos

+ **La fabricación de las tecnologías asociadas a la transición energética** está generando un **incremento en la demanda global de varios metales**.

+ **Los gobiernos están tomando medidas** para garantizar el **suministro de los minerales** que consideran **estratégicos para su economía**.

+ Los **planes europeos y estatales ya prevén un aumento de la actividad extractiva**. A nivel estatal, esta previsión no se basa en estudios específicos sobre la demanda asociada a los planes de transición energética. Organizaciones ecologistas advierten del impulso de prácticas especulativas y un boom minero en España como consecuencia de estas medidas.

+ **Esta investigación busca estimar la demanda, el reciclaje y la extracción primaria, en España y hasta 2050, de diez grupos de metales asociados a seis ámbitos tecnológicos bajo las actuales políticas públicas de transición energética y digital, así como identificar escenarios donde las medidas de economía circular y suficiencia puedan permitir un ahorro de materiales.**

# + Reservas y extracción anual de cada uno de los metales...



## Reservas globales (2022)

Parte de los yacimientos minerales conocidos en la corteza terrestre que puede ser extraída a día de hoy de forma económica (rentable para el capital).



## Producción anual global (2022)

Toneladas de metales contenidos en la extracción anual de los yacimientos minerales.



Metal	Producción anual global (2022)	Reservas globales (2022)
Aluminio (Al) (bauxita)	380 Mt	31 Gt
Cobre (Cu)	22 Mt	890 Mt
Cobalto (Co)	190 kt	8.300 kt
Litio (Li)	130 kt	26 Mt
Manganeso (Mn)	20 Mt	1.700 Mt
Níquel (Ni)	3,3 Mt	100 Mt
Oro (Au)	3,1 kt	52 kt
Plata (Ag)	26 kt	550 kt
PGM: Platino (Pt) y Paladio (Pd)	Pt: 300 t Pd: 210 t	70 Mt
Tierras raras (REE)	300 kt	130 Gt

+ Fuente

Elaboración propia a partir de datos del United States Geological Survey USGS, <https://www.usgs.gov>





<b>Níquel</b>	7 %	<b>Níquel</b>	7 %
<b>Oro</b>	10 %	<b>Oro</b>	13 %
<b>Platino</b>	11 %	<b>Platino</b>	
<b>Paladio</b>	42 %	<b>y Paladio</b>	8 %
<b>Cobalto</b>	5 %		

## Rusia



<b>Manganeso</b>	16 %	<b>Manganeso</b>	16 %
<b>Plata</b>	14 %	<b>Plata</b>	13 %
<b>Tierras raras</b>	70 %	<b>Tierras raras</b>	34 %
<b>Aluminio</b>	24 %		
<b>Litio</b>	15 %		
<b>Oro</b>	11 %		

## China



<b>Aluminio</b>	23 %	<b>Aluminio</b>	24 %
-----------------	------	-----------------	------

## Guinea



<b>Aluminio</b>	19 %	<b>Tierras raras</b>	17 %
-----------------	------	----------------------	------

## Vietnam



<b>Níquel</b>	10 %
---------------	------

## Filipinas



<b>Cobalto</b>	68 %	<b>Cobalto</b>	48 %
<b>Cobre</b>	10 %	<b>Plata</b>	18 %

## R.D. Congo



<b>Manganeso</b>	23 %
------------------	------

## Gabón



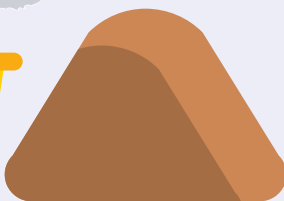
<b>Platino</b>	8 %	<b>Platino</b>	
<b>y Paladio</b>	2 %		

## Zimbabwe



<b>Cobalto</b>	5 %	<b>Cobalto</b>	7 %
<b>Níquel</b>	48 %	<b>Níquel</b>	21 %

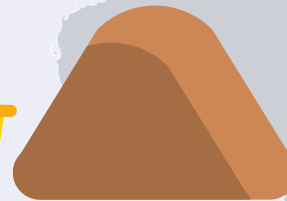
## Indonesia



<b>Manganeso</b>	36 %
<b>Platino</b>	74 %
<b>Paladio</b>	38 %

## Sudáfrica

<b>Manganeso</b>	38 %
<b>Platino</b>	
<b>y Paladio</b>	90 %
<b>Oro</b>	10 %



<b>Aluminio</b>	26 %
<b>Litio</b>	47 %
<b>Manganeso</b>	17 %
<b>Oro</b>	10 %
<b>Tierras raras</b>	6 %

## Australia

<b>Aluminio</b>	16 %
<b>Litio</b>	24 %
<b>Manganeso</b>	16 %
<b>Oro</b>	16 %
<b>Cobre</b>	11 %
<b>Cobalto</b>	18 %
<b>Níquel</b>	21 %
<b>Plata</b>	17 %





# Metodología y modelo de cálculo

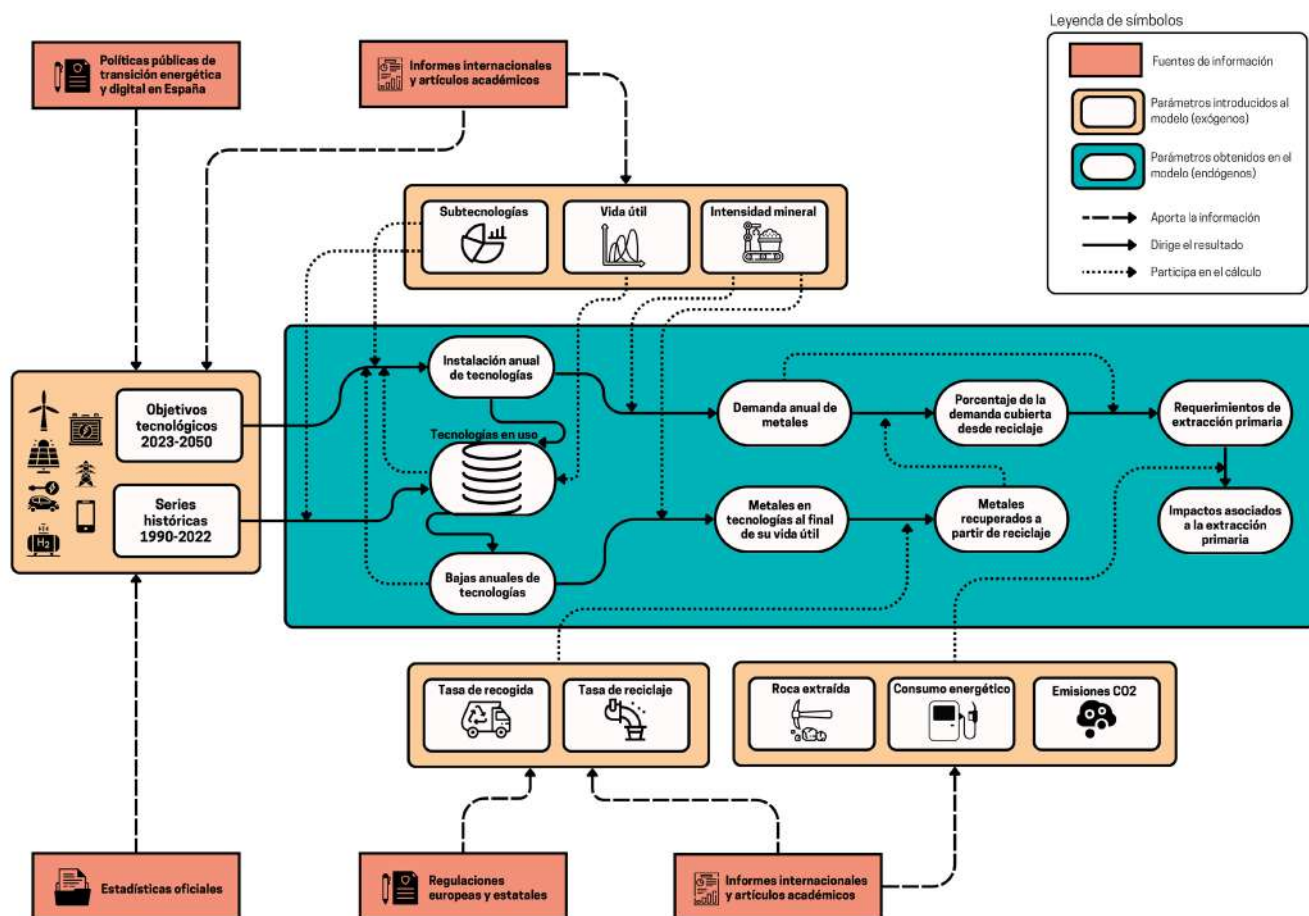
**R**ealizamos esta investigación basándonos en los principios del *análisis del flujo de materiales* (MFA, por sus siglas en inglés: *material flow analysis*)<sup>19</sup>. Se trata de una metodología consolidada y aplicada en diversos ámbitos, tales como la ingeniería ambiental, la ecología industrial, la gestión de residuos o el estudio del metabolismo socioeconómico de un país o una región entera<sup>20</sup>. Los resultados de un MFA se controlan aplicando un simple balance de materiales que compara todas las entradas, stocks y salidas de un proceso.

Desarrollamos un MFA dinámico, dirigido por el stock (*stock-driven*), retrospectivo y prospectivo para la mayoría de tecnologías. Esto quiere decir que el cálculo se actualiza año a año, que tenemos en cuenta las tecnologías puestas en funcionamiento en el pasado (1990-2022) y las que se pondrán en funcionamiento en el futuro (2023-2050), y que el parámetro que domina la evolución es el stock de cada año (por ejemplo, la potencia instalada de renovables, o la flota de vehículos). En la Figura 1 mostramos un esquema simplificado del modelo de cálculo desarrollado para esta investigación, diferenciando las fuentes de información, los parámetros exógenos y los endógenos.

Las estadísticas oficiales definen las series históricas entre 1990 y 2022, con la cantidad y características de las tecnologías actualmente en uso. Las políticas públicas junto a informes internacionales complementarios definen los objetivos tecnológicos futuros entre 2023 y 2050. Parámetros como la distribución de subtecnologías, la probabilidad de vida útil, el tamaño de las baterías, la intensidad mineral y las tasas de recogida y reciclaje de los diferentes metales entran a nuestro modelo como variables exógenas. La demanda de metales, las pérdidas en los procesos de recogida y reciclaje, los requerimientos de extracción primaria y la porción de la demanda que se podría cubrir a partir del reciclaje se calculan dentro del modelo como variables endógenas. Consideramos que la parte de la demanda que no puede ser cubierta a partir del reciclaje de estas tecnologías proviene de la



## Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de ahorro



+ **Figura 1**  
Esquema simplificado del modelo de cálculo

extracción primaria. Además de los seis ámbitos de tecnologías asociadas a la transición energética y digital analizados, incluimos los turismos con motor de combustión interna al final de su vida útil como fuente de reciclaje de metales.

Este modelo de cálculo nos permite evaluar diferentes escenarios y obtener resultados con un elevado nivel de detalle. En el Informe completo y su Anexo metodológico se profundiza en la metodología y el modelo de cálculo.

Sin embargo, debemos reconocer la existencia de algunas limitaciones sobre nuestra metodología de estudio. Encontramos limitaciones en tres áreas principales:

» La falta de políticas públicas detalladas sobre el desarrollo de determinadas tecnologías en la transición energética y digital más allá de 2030. Esto ha afectado especialmente sobre los ámbitos de hidrógeno verde y movilidad eléctrica, donde hemos tenido que proyectar nuestras estimaciones hasta 2050.

» La aplicación en el escenario de transición de unos objetivos de reciclaje muy ambiciosos que buscan aplicar las mejores técnicas disponibles para la recuperación de metales. Hacer esto posible en la práctica exige el impulso de medidas para superar importantes obstáculos relacionados con los procesos metalúrgicos, la gestión de residuos y el diseño de los dispositivos.

» La falta de consideración de la demanda de metales por parte de otros sectores de la economía española. Estamos analizando sólo una parte de la demanda de metales, lo cual nos da una imagen parcial que debería complementarse.

## + Resumen de la sección +

### Metodología y modelo de cálculo

+ **Desarrollamos un modelo de cálculo** para aplicar un **análisis del flujo de materiales** (MFA) **dirigido por el stock, retrospectivo** (1990 - 2022) **y prospectivo** (2023 - 2050) para la mayoría de tecnologías.

+ Los parámetros del modelo se definen a partir de estadísticas oficiales, documentos de políticas públicas, regulaciones europeas y estatales, así como informes internacionales y artículos académicos.

+ **Existen limitaciones sobre la metodología de estudio** vinculadas con la falta de políticas públicas más allá de 2030, unos objetivos de reciclaje ambiciosos en el escenario de transición y la falta de consideración del resto de sectores de la economía.





# Transición energética: políticas públicas y escenarios

## 3

**E**n esta sección definimos los escenarios sobre los que posteriormente calcularemos la demanda de metales asociada. Lo hacemos basándonos en las políticas públicas y en informes internacionales. Además de los objetivos tecnológicos hasta 2050 que definen cada uno de los escenarios, definimos los parámetros relativos a la recuperación de metales: las tasas de recogida y reciclaje de residuos tecnológicos.

### 3.1 Políticas públicas de transición energética para determinar la demanda

Tal y como hemos descrito, las políticas públicas de transición energética de España definen los parámetros principales de nuestro estudio. Por ese motivo, a continuación le echamos un vistazo a algunos de estos documentos gubernamentales.

- » **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC):** Elaborado por el MITERD en 2020<sup>21</sup> y actualizado en 2023<sup>22</sup>, define los objetivos de la política climática y energética hasta 2030. Aporta cifras sobre el desarrollo de diferentes tecnologías.
- » **Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP)<sup>23</sup>:** Se centra en el periodo inmediatamente posterior al definido por el PNIEC, entre 2031 y 2050. No incluye una descripción detallada del sistema eléctrico ni la flota de vehículos.
- » **Hoja de Ruta del Hidrógeno<sup>24</sup>:** Establece objetivos de instalación de electrolizadores para la producción de hidrógeno verde hasta

2030, pero de cara a 2050 no se concreta más allá de mencionar un despliegue a gran escala.

- » **Estrategia de Almacenamiento Energético<sup>25</sup>**: Establece unos requerimientos mínimos de almacenamiento para España hasta 2050, derivados de los objetivos del PNIEC y la ELP. No define ningún reparto de tecnologías de almacenamiento.
- » **Plan de desarrollo de la Red de transporte de Energía Eléctrica<sup>26</sup>**: Elaborado por el MITERD y Red Eléctrica de España, comprende el periodo entre 2021 y 2026. Aporta una descripción muy detallada de los proyectos considerados.
- » **Otras políticas públicas relevantes**: Aquí recogemos los objetivos de la «*Ley de cambio climático y transición energética*»<sup>27</sup> en relación a las emisiones de la flota de vehículos ligeros, la regulación «Euro 7»<sup>28</sup> de la Unión Europea y la «*Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar*»<sup>29</sup> del MITERD.

Esta información no tiene el suficiente nivel de detalle necesario para calcular la demanda de metales asociada a la transición energética en España hasta 2050. Por ese motivo, buscamos información complementaria con la que definir los parámetros tecnológicos de la generación eléctrica renovable<sup>30 31 32</sup>, la movilidad eléctrica<sup>33 34 35 36 37</sup>, el hidrógeno verde<sup>38 39 40</sup>, el almacenamiento energético<sup>41 42</sup>, la infraestructura eléctrica<sup>43 44</sup> y las tecnologías digitales<sup>45</sup>.

### **3.2 Diferentes escenarios de transición energética**

A partir de los objetivos tecnológicos marcados por las políticas públicas y la combinación de diferentes parámetros definimos un total de tres escenarios de transición energética y digital para España, que representan diferentes maneras de alcanzar los objetivos de descarbonización proyectados hasta 2050. Cada uno de estos escenarios contiene importantes diferencias

en cómo se produce esa transición (tales como el potencial de reciclaje, el modelo de movilidad, o la vida útil de las tecnologías, entre otros). Por tanto, cada escenario arrojará diferentes resultados en términos de demanda de materiales, aportación desde fuentes secundarias y requerimientos de extracción primaria, así como en los impactos asociados sobre el medio ambiente y la justicia global.

### **Veamos estos escenarios con más detalle:**

#### **+ Escenario de transición con mejora de reciclaje (ET)**

Es el escenario de referencia, que describe la transición energética en España según las políticas públicas actuales junto a algunas tendencias a nivel europeo y global. Para este escenario se han aumentado las tasas de recogida y reciclaje desde sus valores actuales hasta los valores potenciales en 2050, lo que debería implicar una mejora significativa de los sistemas de recogida y reciclaje de metales a partir de residuos tecnológicos. También prevé el cumplimiento de la descarbonización total del transporte por carretera para 2050, incluyendo una leve reducción en la flota de turismos (aunque aquí no se contempla el posible impacto de la entrada de vehículos basados en combustibles sintéticos o hidrógeno).

Este escenario no representa una continuación de las dinámicas actuales, sino un proceso de transformación sobre el sistema energético (en la dirección que apuntan las políticas públicas actuales), la movilidad (principalmente debido a su electrificación) y la recuperación de materiales. Por expresarlo de forma abreviada, podemos definir el escenario de transición como la combinación de transición energética según las políticas públicas junto a una mejora de la recogida y reciclaje. Lo que buscamos es evaluar cómo crecerá la demanda entre 2020 y 2050, qué parte podría ser cubierta a partir del reciclaje y qué parte sería necesario extraer de la tierra.



### + Escenario de transición sin mejora del reciclaje

Asimismo, incluimos un **Escenario de transición sin mejora del reciclaje** (ET-tasas actuales). Este escenario es idéntico al escenario de transición pero manteniendo en el futuro las tasas de recogida y reciclaje de residuos eléctricos y electrónicos actuales. Representa de esta forma las consecuencias de llevar a cabo la transición energética sin mejorar los procesos de recuperación de materiales, por ejemplo en su impacto sobre la extracción primaria.

### + Escenario con medidas de economía circular y suficiencia (6 alternativas)

En tercer lugar, nos interesa analizar diferentes medidas que no solo mejoren el reciclaje, sino que también reduzcan la demanda de metales. Para ello incluimos **seis alternativas de economía circular y suficiencia**. Estos escenarios ilustran cómo se vería afectada la demanda de metales y los requerimientos de extracción primaria si se adoptaran medidas para fomentar la circularidad y el ahorro de materiales. Nos basamos en diferentes fuentes bibliográficas<sup>46 47 48 49</sup> para definir estas alternativas. La combinación de estas seis alternativas junto al aumento de la recogida y el reciclaje nos sitúa en el escenario más deseable y sostenible.

- » **Alargar la vida útil (Alternativa 1):** Prolongación de la vida útil de las tecnologías eólica y fotovoltaica (30 años) y de turismos eléctricos (16 años).
- » **Acelerar el reciclaje potencial (Alternativa 2):** Aplicar las tasas de recogida y reciclaje potenciales en 2030 en lugar de en 2050.
- » **Limitar tamaño de baterías (Alternativa 3):** Mantener el tamaño de las baterías de turismos eléctricos en los 55 kWh, frenando las tendencias de aumento.

- » **Segunda vida de baterías (Alternativa 4):** Aplicar una segunda vida en almacenamiento energético al 25% de las baterías de turismos eléctricos que llegan al final de su vida útil.
- » **Escenario alternativo de movilidad (Alternativa 5):** Reducción sustancial de la flota de turismos en circulación y aumento drástico del número de autobuses. 9 millones de turismos y 250 mil autobuses en 2050, todos ellos eléctricos.
- » **Todas las alternativas combinadas (Alternativa 6):** Las cinco alternativas anteriores no son mutuamente excluyentes, por lo que el escenario ideal sería una combinación de todas estas medidas de economía circular y suficiencia, descrita en este escenario.

Estos escenarios siguen cumpliendo todos los objetivos marcados por las políticas públicas de transición energética, pero además añaden una aceleración en la mejora de los sistemas de reciclaje y una reducción de la demanda, lo cual reducirá la cantidad de metales que deban ser obtenidos a partir de la extracción primaria.

***La combinación de las seis alternativas de suficiencia y economía circular más el aumento de la recogida y el reciclaje nos sitúa en el escenario más deseable y sostenible.***



### 3.3. Evolución de las tecnologías

Tal y como describimos en el capítulo 2. Metodología y modelo de cálculo, el cálculo de la demanda de metales asociada a la transición energética y digital se obtiene a partir de la combinación de diferentes parámetros como los objetivos tecnológicos, la distribución de sub-tecnologías, la vida útil o la intensidad mineral. En el Cuadro 1 se recoge un resumen de los parámetros más importantes que definen la evolución de las tecnologías analizadas bajo el escenario de transición. Indicamos si los objetivos tecnológicos se extraen directamente de series históricas (h), de políticas públicas (p) o son estimados a partir de otras referencias (e).

En el Informe completo y su Anexo metodológico pueden consultarse las referencias y el proceso seguido para realizar cada una de las estimaciones, así como el conjunto de los parámetros que definen cada uno de los escenarios.

En la Figura 2 se muestra la evolución de la potencia eólica y fotovoltaica hasta 2050 siguiendo los objetivos marcados por las políticas públicas de transición energética. La cifra de potencia instalada no varía según diferentes escenarios porque se trata de un dato de entrada al modelo. Lo que variará es la cantidad de instalaciones anuales según la vida útil de las tecnologías: cuanto más prolongada sea la vida útil, menor será el número de tecnologías que deba instalarse cada año, reduciendo a su vez la demanda de metales asociada.



+

## Parámetros que definen la evolución de las tecnologías en el escenario de transición

Tecnologías	Objetivos tecnológicos			Vida útil	Sub-tecnologías
	2020	2030	2050		
<b>Eólica [GW]</b>	28 (h)	62 (p)	90 (p, e)	20 años	Terrestre y marina 4 tipos de aerogeneradores
<b>Fotovoltaica [GW]</b>	12 (h)	76 (p)	111 (p, e)	20 años	Silicio cristalino y capa fina 3 tipos de módulos de capa fina
<b>Turismos eléctricos [millones]</b>	0,05 (h)	3,3 (p)	17 (e)	10 años	7 químicas de baterías
<b>Autobuses eléctricos [miles]</b>	0,2 (h)	13 (e)	80 (e)	12 años	7 químicas de baterías
<b>Puntos de recarga de vehículos eléctricos [unidades]</b>	7.607 (h)	3.216.224 (e)	0,9 por turismo eléctrico (e)	12 años	3 tipos de puntos de carga
<b>Electrolizadores [GW]</b>	0,0 (h)	11 (p)	103 (e)	7-31 años	3 tipos de electrolizadores
<b>Baterías almacenamiento energético [GWh]</b>	18 (h)	50 (p)	77 (p)	15 años	7 químicas de baterías
<b>Líneas eléctricas [km/año]</b>	1.472 (h)	1.791 (e)	2.075 (e)	40 años	Líneas aéreas, cables, repotenciaciones y cables submarinos de 66, 132, 220 y 400 kV
<b>Subestaciones eléctricas [unidades/año]</b>	121 (h)	150 (e)	187 (e)	40 años	Subestaciones de 66, 132, 220 y 400 kV
<b>Aparatos eléctricos y electrónicos</b>	Puestos en el mercado (h)	Tendencias entre 2016-2021 aplicando una variación anual máxima de $\pm 2\%$ (e)		Según cada categoría	43 categorías

+ Cuadro 1

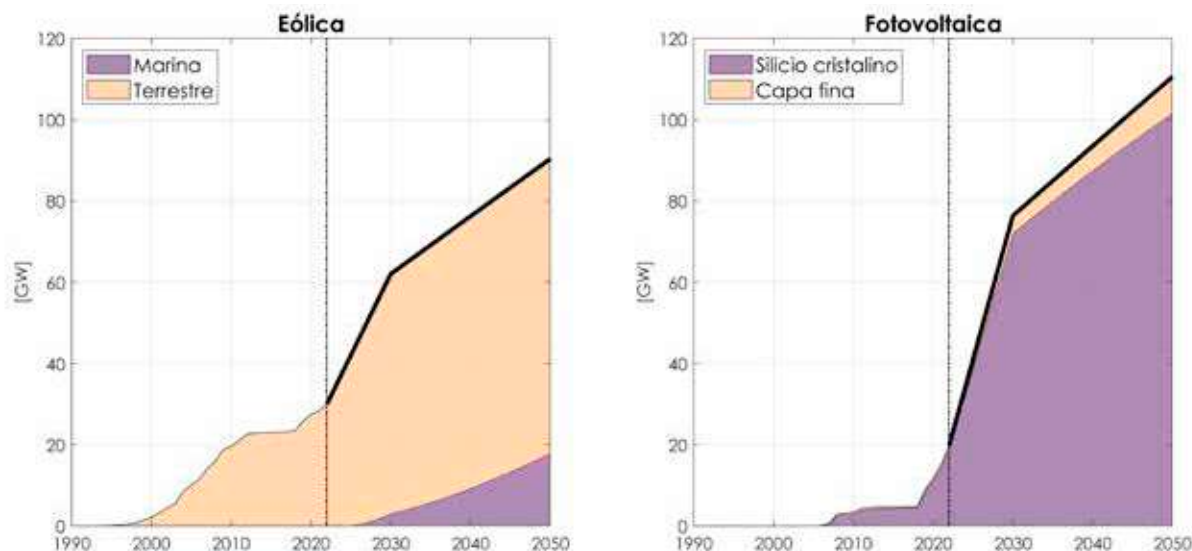
**Resumen de los parámetros más importantes que definen la evolución de las tecnologías analizadas bajo el escenario de transición (ET)**

### 3.4. La importancia de la movilidad eléctrica

Como se verá en el apartado de resultados, la electrificación del vehículo privado tiene un importante peso en la demanda de tecnologías y, en consecuencia, en la demanda mineral asociada a la transición energética. Por tanto, esta tecnología merece ser explicada con detenimiento. Para definir la hipótesis relativa a la flota de turismos eléctricos hasta 2050 se ha tenido

+

### Potencia de generación eléctrica renovable instalada



+ Figura 2

**Evolución de la potencia de generación eléctrica renovable instalada entre 1990 y 2050 para las tecnologías eólicas y fotovoltaicas**

que acudir a fuentes complementarias, ya que las políticas públicas actuales no dan cifras más allá de 2030. Así, nuestra estimación hasta 2050 está basada en el informe «*Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050*»<sup>50</sup> de la consultora Deloitte. Al considerar una flota de turismos eléctricos en 2050 inferior a la flota de turismos actual representamos dos posibilidades: o bien un cambio modal hacia un mayor uso del transporte colectivo; o bien que la distancia entre ambas cifras puede ser cubierta por otras tecnologías de vehículos (combustibles sintéticos o hidrógeno) que no incluimos en nuestro estudio.

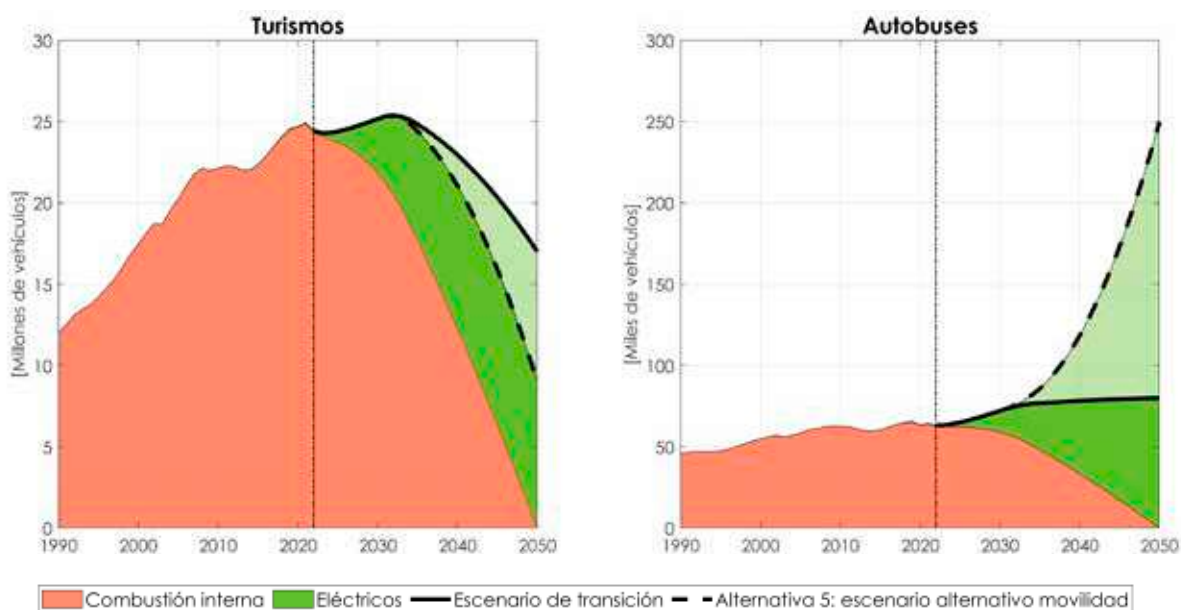
En la Figura 3 a continuación puede verse la evolución del parque de turismos y autobuses de combustión interna y eléctricos en el escenario de transición y en el escenario alternativo de movilidad (Alternativa 5). En ambos escenarios los vehículos de combustión interna desaparecen por completo en 2050 mientras que los vehículos eléctricos aumentan considerablemente su flota en el mismo periodo. En el escenario de transición se pasa de 25 millones de turismos y 65 mil autobuses en 2022 a 17 millones de turismos y 80 mil autobuses en 2050, todos ellos eléctricos. Por su parte, el escenario alternativo de movilidad representa una transformación radical en los modos de desplazamiento, llegando a una flota de turismos

+

en circulación tres veces menor a la actual y apostando más por el transporte público. Así, en 2050 el parque de vehículos estaría compuesto por 9 millones de turismos y 250 mil autobuses.

+

### Evolución del parque de turismos y automóviles



+ **Figura 3**

**Evolución del parque de turismos y autobuses de combustión y eléctricos entre 1990 y 2050 según escenarios**

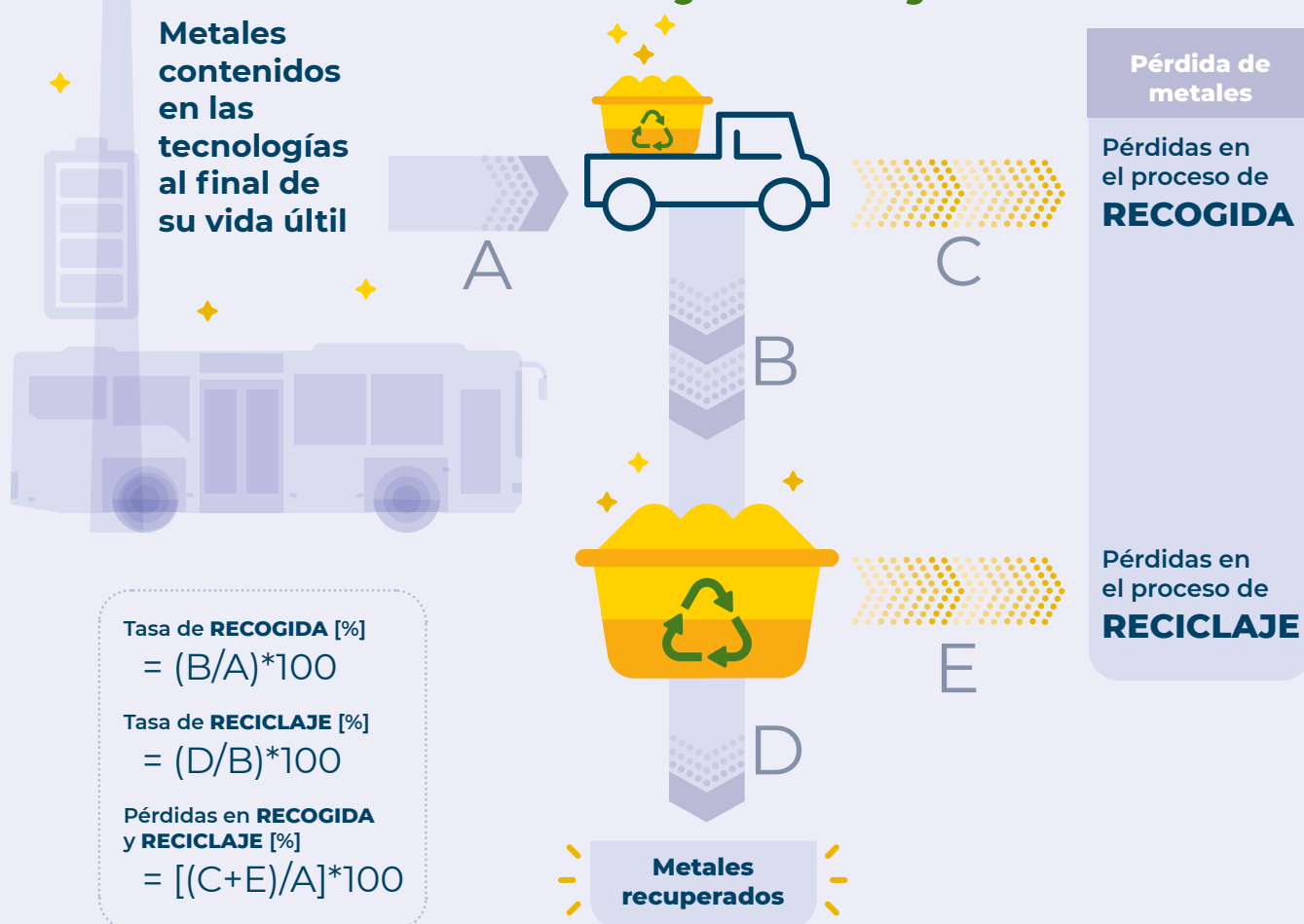
**La electrificación del vehículo privado tiene un importante peso en la demanda de tecnologías y, en consecuencia, en la demanda mineral. Se plantea un escenario alternativo de movilidad que reduciría la flota de turismos de 25 millones a 9 millones entre 2022 y 2050 y aumentaría los autobuses de 65.000 a 250.000 en este periodo.**



### 3.5. El potencial de la recuperación de los metales

Por último, para terminar de establecer los escenarios debemos de definir el proceso que sigue al fin de vida de las tecnologías. Una vez las tecnologías analizadas llegan al final de su vida útil, los metales contenidos en ellas pueden perderse o recuperarse. Para que ocurra lo segundo hacen falta dos procesos: la recogida de los residuos tecnológicos y el reciclaje de los metales a partir de los residuos recogidos. Estos dos procesos se representan a partir de sus respectivas tasas de recogida y reciclaje. Para definir estas tasas, nos basamos en regulaciones europeas y estatales relativas a vehículos al fi-

#### + Representación gráfica de las tasas de recogida y reciclaje



+ Cuadro 2

**Tasas de recogida y reciclaje actuales y potenciales consideradas para cada metal desde diferentes tecnologías**

Tecnología	Recogida [%]	Tasas de recogida y reciclaje												
		Ag	Al	Au	Co	Cu	Dy	Li	Mn	Nd	Ni	Pd	Pt	
<b>Fotovoltaica</b>	Actual	65	5	75	-	-	35	-	-	-	-	-	-	-
	Potencial	85	80	80	-	-	80	-	-	-	-	-	-	-
<b>Eólica</b>	Actual	80	-	80	-	-	80	0	-	50	0	50	-	-
	Potencial	95	-	90	-	-	90	90	-	80	90	80	-	-
<b>Baterías (vehículos)</b>	Actual	95	-	70	-	70	70	-	0	0	-	70	-	-
	Potencial	100	-	90	-	95	95	-	80	90	-	95	-	-
<b>Baterías (almacenamiento)</b>	Actual	70	-	70	-	70	70	-	0	0	-	70	-	-
	Potencial	95	-	90	-	95	95	-	80	90	-	95	-	-
<b>Turismos (sin batería)</b>	Actual	70	5	70	5	40	60	0	0	40	0	50	55	55
	Potencial	90	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
<b>Autobuses (sin batería)</b>	Actual	80	5	70	5	40	60	0	0	40	0	50	55	55
	Potencial	95	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
<b>Electrolizadores</b>	Actual	80	-	70	-	-	60	-	-	-	-	50	50	50
	Potencial	95	-	90	-	-	90	-	-	-	-	80	90	90
<b>Subestaciones y líneas eléctricas</b>	Actual	70	-	70	-	-	70	-	-	-	-	-	-	-
	Potencial	95	-	90	-	-	90	-	-	-	-	-	-	-
<b>Puntos de recarga</b>	Actual	80	-	80	-	-	80	-	-	-	-	-	-	-
	Potencial	95	-	90	-	-	90	-	-	-	-	-	-	-
<b>RAEE</b>	Actual	57	50	60	50	15	60	0	0	40	0	50	15	15
	Potencial	85	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70

nal de su vida útil<sup>51</sup>, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)<sup>52</sup> y baterías<sup>53</sup>. Complementamos la información con las investigaciones del Banco Mundial<sup>54</sup>, la Universidad KU Leuven<sup>55</sup> o la Universidad de Sydney<sup>56</sup> para establecer hasta qué cifras podrían mejorarse potencialmente dichas tasas.

La recuperación de un mismo metal desde dos tecnologías diferentes puede implicar un proceso muy diferente. Por ello, tomamos unas tasas de reciclaje específicas según cada tecnología. En el Cuadro 2 se muestran las tasas de recogida y reciclaje actuales y potenciales consideradas. En el escenario de transición (ET) las tasas potenciales se alcanzan en 2050, con

una mejora progresiva desde las actuales en 2020. La única excepción se encuentra en el reciclaje de baterías, para el cual las tasas potenciales se aplican en 2030, siguiendo así la legislación europea<sup>57</sup>. En el escenario de transición sin mejora de reciclaje (ET-tasas actuales) se mantienen las tasas actuales entre 2020 y 2050, En la Alternativa 2 (acelerar el reciclaje potencial) aplicamos las tasas potenciales en 2030, representando así el desarrollo acelerado de los sistemas de recuperación de metales a gran escala.

+ **Resumen de la sección** +

## **Políticas públicas y escenarios**

+ Las políticas públicas de transición energética en España definen **objetivos tecnológicos hasta 2030 y 2050**, pero la información contenida en ellas es insuficiente y nos obliga a realizar estimaciones a partir de otras referencias.

+ **Analizamos un total de tres escenarios.** El escenario principal (Escenario de transición) representa la transición energética según las políticas públicas junto a una mejora de la recogida y reciclaje de metales. Asimismo, evaluamos un escenario de transición sin mejora en el reciclaje. Por último, incluimos un escenario alternativo que incorpora seis medidas distintas de economía circular y suficiencia, que cumplen con la transición energética al mismo tiempo que reducen la demanda y mejoran el reciclaje. La combinación de estas seis alternativas más el aumento de la recogida y el reciclaje nos sitúa en el escenario más deseable y sostenible.

+ **Definimos las tasas de recogida y reciclaje** actuales y potenciales, para cada metal y tecnología. En el escenario de transición las tasas potenciales se alcanzan en 2050 tras una mejora progresiva desde las actuales en 2020.

+ **La electrificación del vehículo privado** tiene un importante peso en la demanda de tecnologías asociadas a la transición energética.



# Contenido de metales de tecnologías

+ Demanda de metales para abastecer de **energía a 20.000 familias, fotovoltaica y eólica**

Tomando el dato medio de consumo eléctrico anual por persona de 5721 kWh y el del ratio estándar de 2500 kWh/kW en la producción de electricidad eólica y renovable, podemos obtener que:

**114.420 paneles fotovoltaicos de 400W o 15 aerogeneradores de 3 MW necesitan...**

**Aluminio (Al)**

343,3 t.

**Plata (Ag)**

0,9 t.

**Aluminio (Al)**

32,0 t.

**Níquel (Ni)**

15,3 t.

**Manganeso (Mn)**

36,6 t.

**Cobre (Cu)**

228,8 t.

**Disprosió (Dy)**

0,3 kg.

**Cobre (Cu)**

210,5 t.

**Neodimio (Nd)**

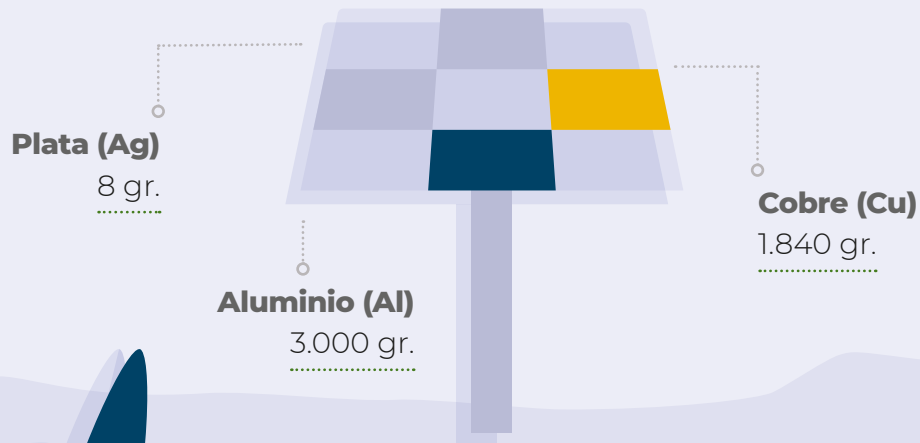
1,3 kg.

+ Infografías de elaboración propia a partir de diversas fuentes<sup>67</sup>

## + Contenido de metales

### para un panel fotovoltaico...

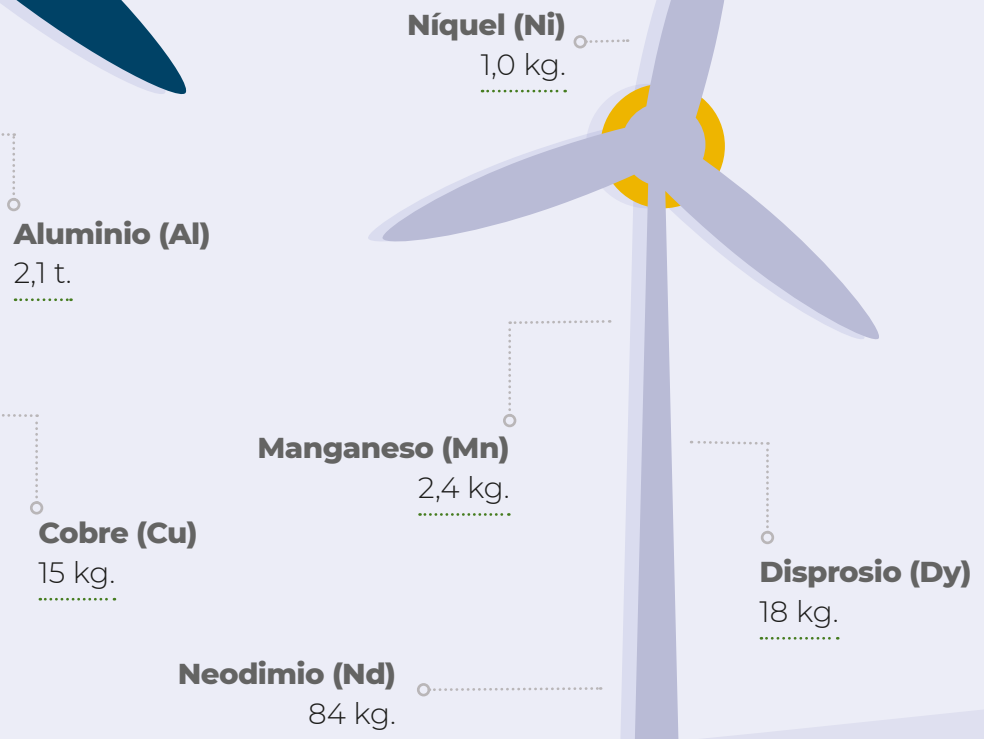
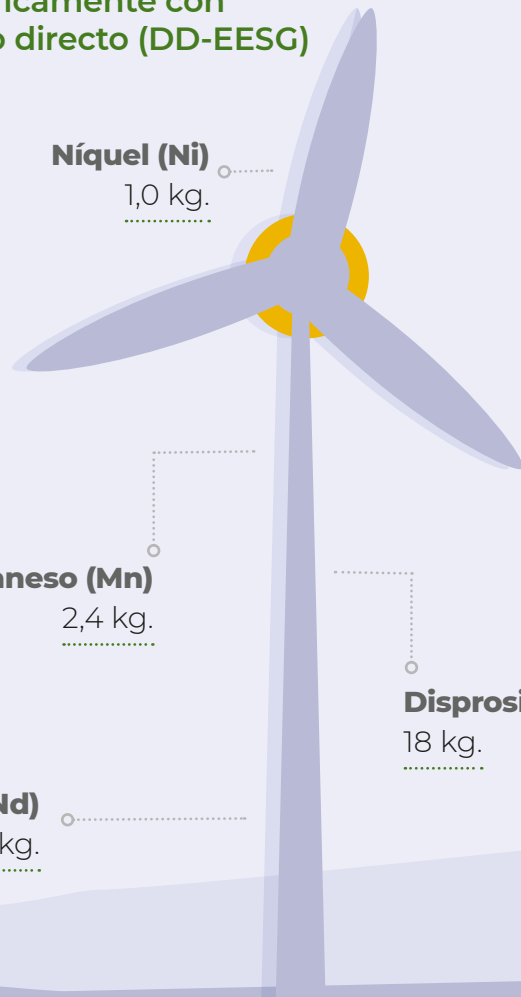
... de 400 W > silicio cristalino



## + Contenido de metales

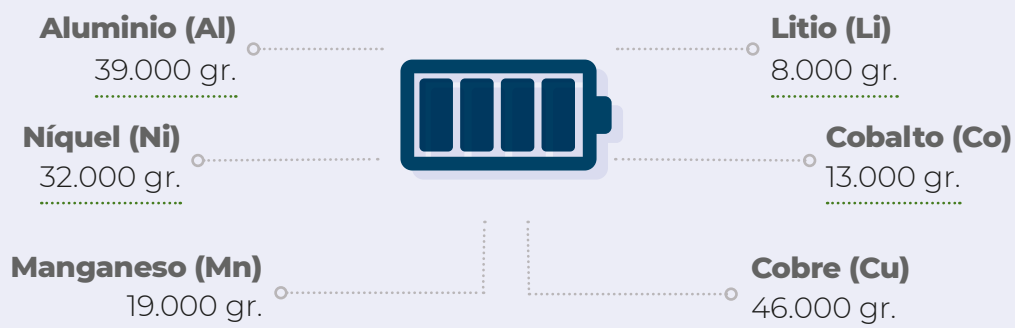
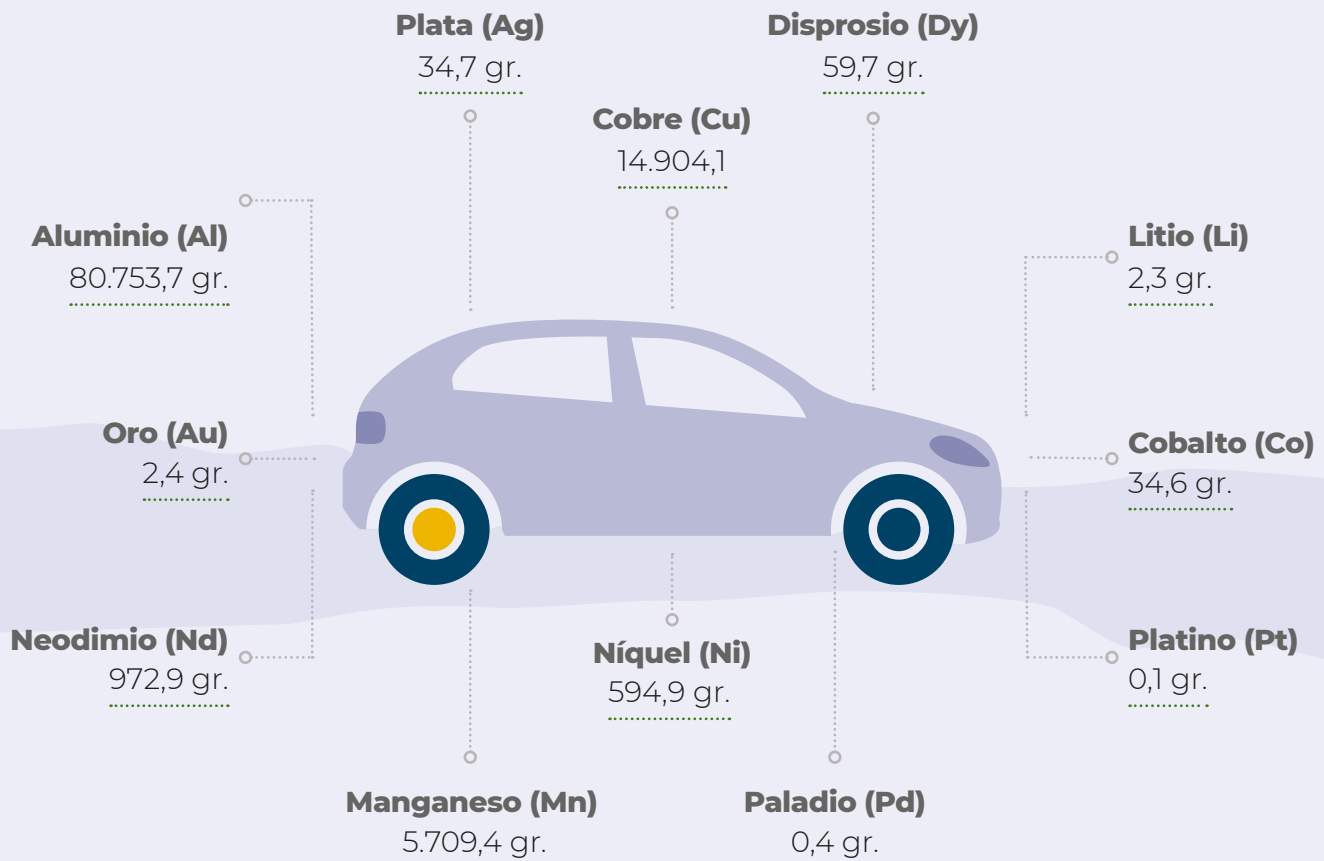
### para un aerogenerador...

... de 3 MW de generador síncrono  
excitado eléctricamente con  
accionamiento directo (DD-EESG)



# + Contenido de metales para un turismo eléctrico con batería...

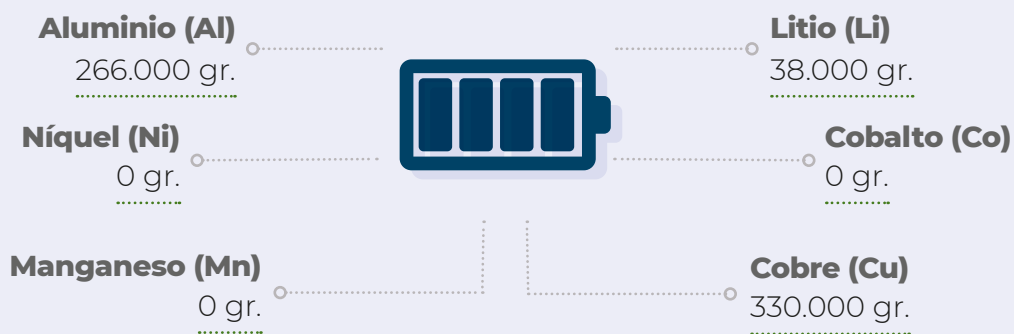
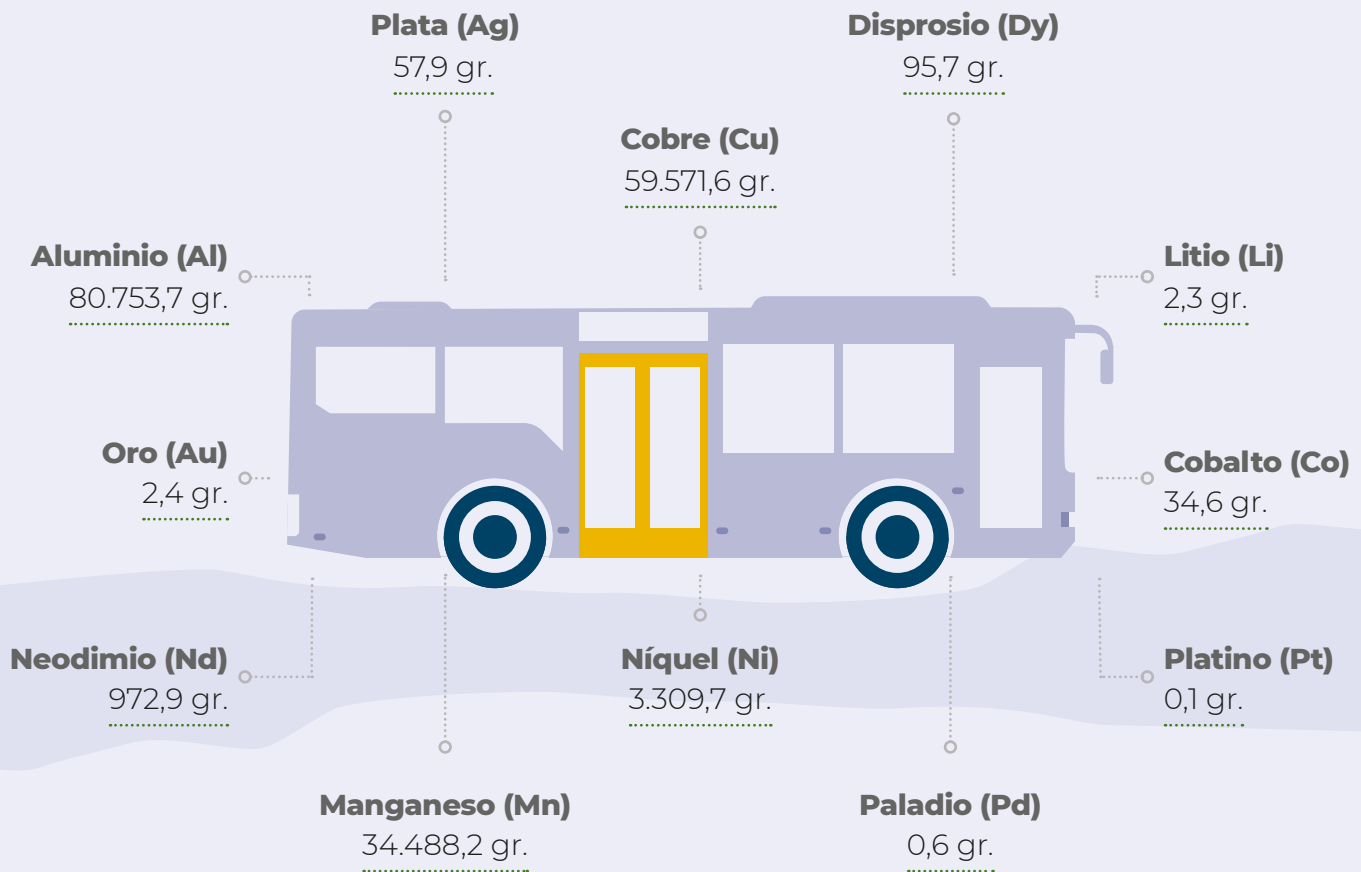
... NMC de 55 kWh





# + Contenido de metales para un autobús eléctrico con batería...

... LFP de 375 kWh



# 4

## Resultados

Una vez definidos los escenarios de transición energética y digital basados en las políticas públicas, aplicamos el modelo de cálculo descrito anteriormente. De esta forma obtenemos los resultados de demanda, reciclaje y extracción primaria de metales.

Exponemos estos resultados en tres pasos. Primero nos centramos en las tecnologías que deben fabricarse como consecuencia de las políticas públicas de transición energética y las diferentes alternativas planteadas. Después examinamos la demanda de metales que se deriva de esos escenarios y la recuperación de metales según las tasas de recogida y reciclaje consideradas. Por último, nos ocupamos de los requerimientos de extracción primaria vinculados con los resultados anteriores, examinando las posibilidades de reducirlos a partir de medidas de economía circular y suficiencia.

### 4.1. Resultados tecnológicos

En la sección previa 3.3. Evolución de las tecnologías veíamos la cantidad de potencia eólica y fotovoltaica que debería estar instalada en 2030 y 2050, así como la flota de turismos y autobuses eléctricos en circulación, junto a otras tecnologías. En el escenario de transición se incluyen 90 GW y 111 GW de eólica y fotovoltaica en 2050, junto a 17 millones de turismos eléctricos y 80 mil autobuses eléctricos en el mismo año. Estas cifras se refieren a aquellas tecnologías que están en funcionamiento. Sin embargo, mantener una cantidad determinada de tecnologías en uso requiere una continua renovación de las bajas cuando dichas tecnologías llegan al final de su vida útil. De hecho, se calcula que aproximadamente la mitad de los recursos materiales extraídos anualmente se dedican a construir o renovar el stock de materiales en uso<sup>58</sup>.

+

### Instalaciones y bajas acumuladas de diferentes tecnologías

Tecnología	Instalaciones	Bajas
Eólica [GW]	133,4	71,7
Fotovoltaica [GW]	187,8	86,7
Turismos eléctricos [millones]	34,2	17,2
Turismos combustión interna [millones] *	7,4	31,9
Autobuses eléctricos [miles]	134,9	55,1
Autobuses combustión interna [miles] *	19,5	87,6
Puntos recarga vehículos eléctricos [millones]	21,9	10,6
Electrolizadores hidrógeno verde [GW]	114,5	11,6
Baterías almacenamiento energético [GWh]	153,1	94,2
Líneas eléctricas y subestaciones [km / unidades]	59.277 / 5.207	39.388 / 3.692
Aparatos eléctricos y electrónicos [Mt]	36,9	21,9

\* Tanto autobuses como turismos de combustión interna son considerados para la estimación de la demanda. Las bajas de turismos de combustión interna son consideradas para la estimación de la recuperación de metales. Incluimos aquí estas cifras de manera ilustrativa.

+ Cuadro 3

#### Resumen de los resultados de instalaciones y bajas acumuladas entre 2020 y 2050 para las diferentes tecnologías estudiadas en el escenario de transición (ET)

En un contexto de despliegue de nuevas tecnologías, se combina el incremento y la renovación del stock. Eso da como resultado unas cifras de instalaciones y bajas anuales asociadas a cada escenario. En el Cuadro 3 mostramos los resultados obtenidos sobre las bajas e instalaciones entre 2020 y 2050 para cada una de las tecnologías consideradas en el escenario de transición (ET).

Dado que el periodo temporal analizado es superior a la vida útil de muchas de estas tecnologías, deben renovarse aquellos equipos que llegan al fin de su vida útil. Para mantener determinada potencia de generación de electricidad renovable, flota de vehículos en circulación o capacidad de electrolizadores para la producción de hidrógeno hace falta un mayor volumen de instalaciones. Lograr el objetivo de potencia instalada de 90,4 GW de eólica y 110,6 GW de fotovoltaica en 2050 se requiere instalar 133,4 y 187,8 GW respectivamente. Mientras que para lograr una flota de



17 millones de turismos eléctricos en circulación en 2050 se deben fabricar 34,2 millones entre 2020 y 2050, debido a una corta vida útil de sus baterías. Con respecto a los turismos de combustión interna: hasta 2035 se mantienen las matriculaciones, pero en 2050 el conjunto de la flota ha desaparecido, acumulando un total de 31,9 millones de bajas. Esto nos da una idea del potencial que tienen los vehículos al final de su vida útil como fuente de recuperación de metales.

Estos resultados tecnológicos se ven modificados según los escenarios que analizamos. Alargando la vida útil de las tecnologías (Alternativa 1) se reducen en un -14 % las instalaciones de eólica y fotovoltaica, y en un -25 % las de turismos eléctricos. Lo mismo ocurre sobre otros parámetros relevantes, como la cantidad de nuevas baterías eléctricas requeridas anualmente.

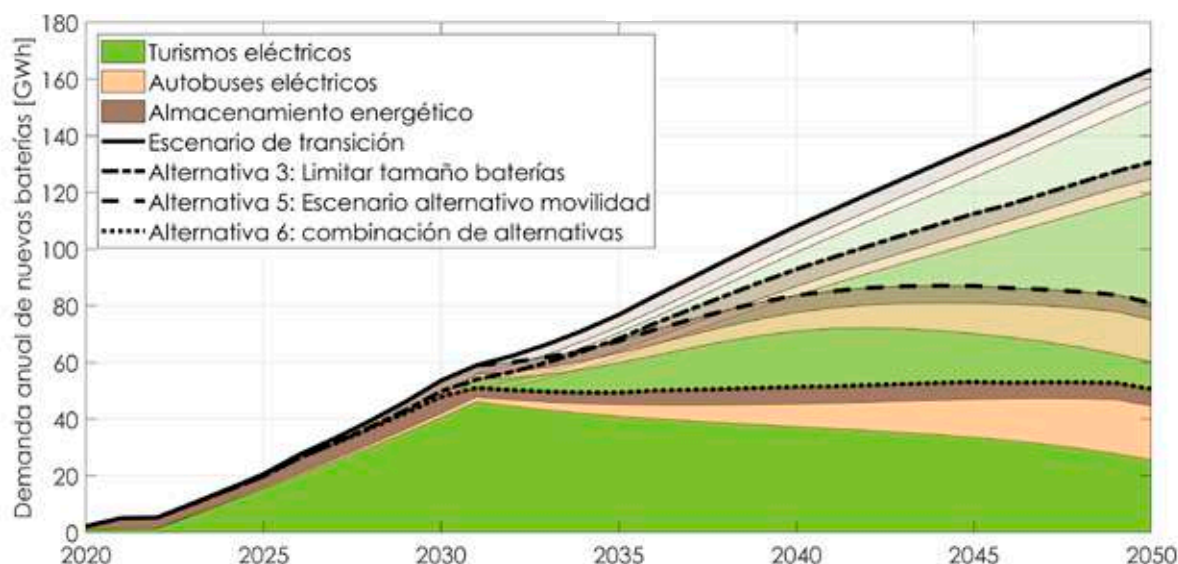
La Figura 4 muestra el impacto de aplicar diferentes alternativas de economía circular y suficiencia sobre los requerimientos anuales de nuevas baterías. En el escenario de transición los turismos eléctricos dominan prácticamente la totalidad de la demanda de nuevas baterías, alcanzando unos requerimientos anuales de 53 GWh en 2030, 108 GWh en 2040 y 163 GWh en 2050. Cuando se aplican las diferentes alternativas de economía circular y suficiencia observamos claramente una reducción del volumen de baterías eléctricas que deberían fabricarse. Combinando todas las

**Combinando todas las alternativas, los requerimientos de nuevas baterías se estabilizarían en los 50 GWh anuales a partir de 2030, reduciendo así en un 48% los requerimientos de fabricación de nuevas baterías entre 2020 y 2050.**

medidas (Alternativa 6), los requerimientos de nuevas baterías se estabilizarían en los 50 GWh anuales a partir de 2030, reduciendo así en un 48% los requerimientos de fabricación de nuevas baterías entre 2020 y 2050. Por su parte, aquellas alternativas que limitan el tamaño de las baterías de turismos eléctricos (Alternativa 3) y que aplican un escenario alternativo de movilidad (Alternativa 5) logran una reducción del 14% y 26% respectivamente. Esto tendrá un impacto sobre la demanda de metales en su fabricación.

+

### **Demandas de baterías y reducción alternativa**



+ Figura 4

Requerimientos anuales de nuevas baterías según usos y escenarios entre 2020 y 2050

## **4.2. Demanda y recuperación de metales**

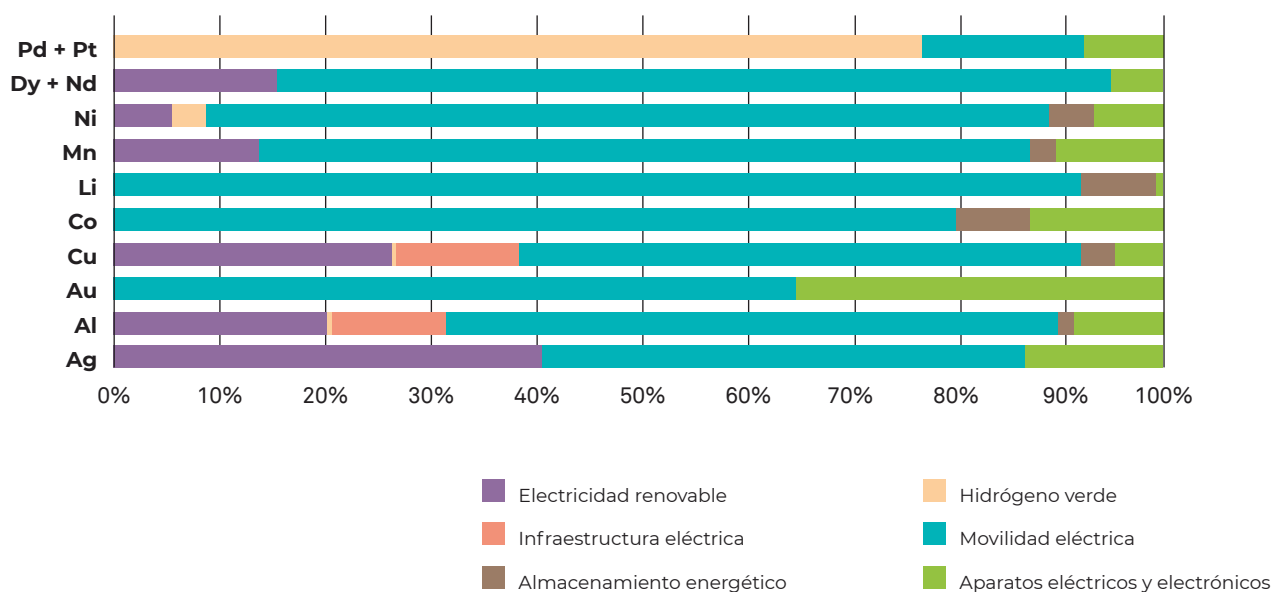
Una vez conocemos qué tecnologías se deben fabricar entre 2020 y 2050 podemos examinar la demanda de metales asociada. Del mismo modo, una vez conocido el volumen de residuos tecnológicos y las tasas de recogida y reciclaje, podemos estimar la cantidad de metales recuperados. Combinando ambos resultados tendremos una aproximación a la extracción primaria, es decir, aquella parte de la demanda que no logramos cubrir a partir del reciclaje. Exponemos los resultados obtenidos en ese orden.

## » Demanda de metales

Comencemos con la demanda asociada a la fabricación de las tecnologías para la transición energética y digital. En el Cuadro 4 mostramos los resultados de demanda para los diez grupos de metales analizados, entre 2020 y 2050 bajo el escenario de transición (ET). Y en la Figura 5 representamos la distribución según tecnologías de la demanda acumulada de metales entre 2020 y 2050 en el mismo escenario de transición.

Demanda total acumulada 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
2,6	7.176,3	0,1	4.251,3	166,1	226,2	710,4	822,7	44,8	0,1

+ Cuadro 4  
Resultados acumulados entre 2020 y 2050 de demanda de metales en el escenario de transición (ET).



+ Figura 5  
Distribución según tecnologías de la demanda acumulada de metales 2020-2050 en el escenario de transición



## Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de ahorro

Observamos cómo la demanda de todos los metales está dominada principalmente por las tecnologías de movilidad eléctrica, y dentro de esta, principalmente por el turismo eléctrico. La movilidad eléctrica es responsable del 54-58% de la demanda acumulada entre 2020 y 2050 de aluminio y cobre, del 73-92% de manganeso, cobalto, níquel y litio, y del 79% de disprosio y neodimio. Mientras tanto, las tecnologías eólicas son responsables del 16% de la demanda de disprosio y neodimio, y las subestaciones y líneas eléctricas representan el 10-11% de la demanda de cobre y aluminio. Los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) comercializados demandan aproximadamente entre el 5% y el 12% de la mayoría de los metales y hasta el 35% de la demanda total de oro. También vemos cómo la fabricación de electrolizadores para la producción de hidrógeno verde es el principal motor (77%) de la demanda de paladio y platino.

Aplicando diferentes escenarios alternativos vemos que la demanda puede reducirse respecto al escenario de transición (ET) en un 10-20% alargando la vida útil de las tecnologías (Alternativa 1), en un 3-14% limitando el tamaño de las baterías (Alternativa 3), en un 1-4% dándole una segunda vida a las baterías de movilidad eléctrica (Alternativa 4) y en un 10-25% con un escenario alternativo de movilidad que reduzca los automóviles individuales y aumente el transporte público (Alternativa 5). Cuando se combinan todas las medidas (Alternativa 6) se logra una reducción de la demanda de materiales de entre el 10% y el 50% según los

**Observamos cómo la demanda de todos los metales está dominada principalmente por las tecnologías de movilidad eléctrica, principalmente por el turismo eléctrico. La movilidad eléctrica es responsable del 54-58% de la demanda acumulada entre 2020 y 2050 de aluminio y cobre, del 73-92% de manganeso, cobalto, níquel y litio, y del 79% de disprosio y neodimio.**

**Cuando se combinan todas las alternativas de economía circular, suficiencia y reciclaje se logra una reducción de la demanda de materiales de entre el 10% y el 50% según los diferentes metales analizados. El litio es el metal cuya demanda se puede reducir más (hasta un 50%).**

diferentes metales analizados. El litio es el metal cuya demanda se puede reducir más (hasta un 50%).

### » Recuperación desde el reciclaje

En lo relativo al reciclaje, mostramos en el Cuadro 5 los resultados de recuperación de metales entre 2020 y 2050 en el escenario de transición. Diferenciamos tres fases en el proceso de recuperación: el fin de vida útil de las tecnologías, la cantidad de los residuos tecnológicos que se recogen y la cantidad de metales que se recuperan de forma efectiva a partir del reciclaje de esos residuos tecnológicos recogidos.

En estas cifras vemos al menos tres aspectos relevantes. En primer lugar, una diferencia significativa entre la demanda (Cuadro 4) y los metales contenidos en tecnologías al final de su vida útil entre 2020 y 2050 para metales como el cobre, el cobalto, el litio, el manganeso, el níquel y las tierras raras. Esto se explica por la novedad de las tecnologías que los contienen y la prolongada vida útil de las mismas. Cuando termina el periodo analizado, muchas de estas tecnologías siguen funcionando y los metales demandados se mantienen “atrapados” en ellas. Esto hace que las fuentes de reciclaje disponibles para cubrir la demanda sean limitadas. En segundo lugar, las pérdidas en los procesos de recogida y reciclaje. Desde la base disponible de metales contenidos en las tecnologías al final de su vida útil hasta los metales que efectivamente se recuperan hay una reducción significativa, a pesar de las ambiciosas tasas de recogida y reciclaje potenciales consideradas. En tercer lugar, los requerimientos de extracción primaria se

## Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de ahorro

+ Cuadro 5

Resultados acumulados entre 2020 y 2050 de fin de vida útil, recogida y reciclaje de metales en el escenario de transición (ET).

Metales contenidos en tecnologías que llegan al final de su vida útil 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
2,5	7.582,3	0,1	2.772,2	96,5	115,2	521,0	539,1	23,5	0,0

Metales contenidos en los residuos tecnológicos recogidos 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
2,0	6.212,2	0,1	2.309,6	79,3	97,3	432,9	448,1	20,0	0,0

Metales reciclados a partir de los residuos tecnológicos recogidos 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
1,1	4.849,2	0,0	1.879,3	71,4	76,8	312,2	384,9	12,4	0,0

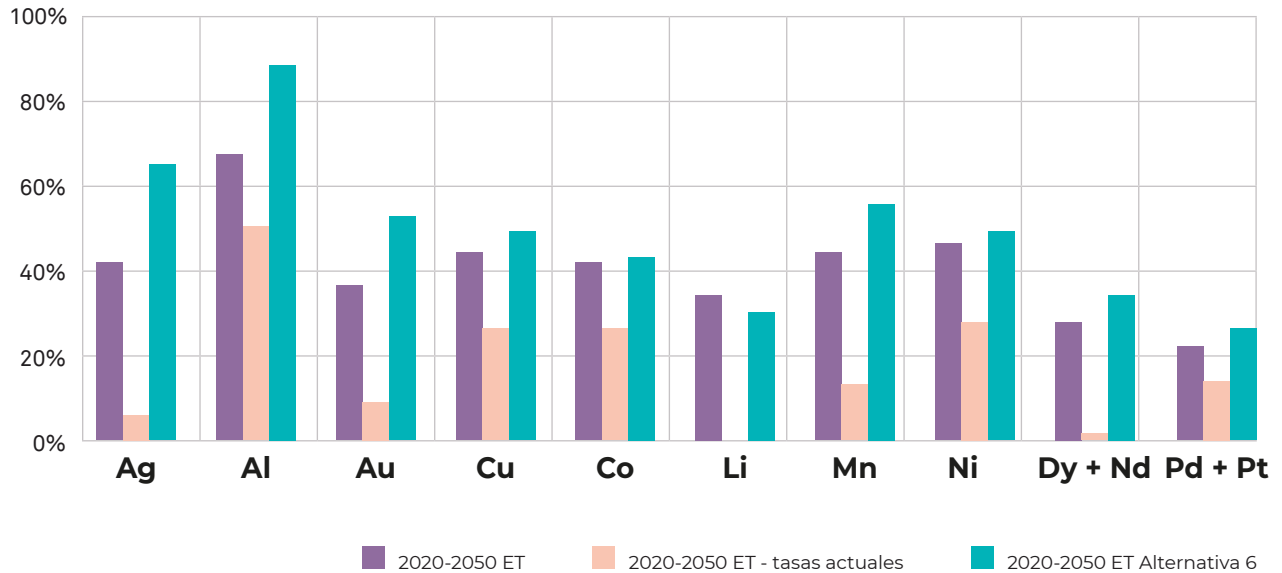
derivarán de la diferencia existente entre la demanda de metales y la cantidad de metales efectivamente recuperados desde el reciclaje de los residuos tecnológicos que se recogen.

Podemos examinar en más detalle las consecuencias de estos aspectos en la Figura 6, en la que se representa el porcentaje de la demanda cubierta desde reciclaje entre 2020 y 2050 bajo el escenario de transición (ET), el escenario de transición sin mejora del reciclaje (ET-tasas actuales) y la combinación de las medidas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6).

Aquí observamos cómo con las ambiciosas tasas de recogida y reciclado del escenario de transición (ET) el reciclaje podría satisfacer entre el 23% y el 68% de la demanda acumulada 2020-2050 para los diferentes metales analizados, reduciendo así las necesidades de extracción primaria. En términos totales, el reciclaje cubre el 57% de la demanda de metales bajo el escenario de transición. Cuando se combinan las medidas de economía circular y de suficiencia (Alternativa 6), esta cifra aumenta hasta el 67%. Por el contrario, si se mantienen las tasas actuales de recogida y reciclado (ET-tasas actuales) esta cifra se reduce al 39%.

+

## Demanda cubierta desde el reciclaje



+ Figura 6

Porcentaje de la demanda cubierta desde el reciclaje de las tecnologías consideradas. Resultados acumulados entre 2020 y 2050 bajo el escenario de transición (ET) el escenario de transición sin mejora del reciclaje (ET-tasas actuales) y la combinación de todas las alternativas (Alternativa 6).

**En términos totales, el reciclaje cubre el 57% de la demanda de metales bajo el escenario de transición. Cuando se combinan las medidas de economía circular y de suficiencia, esta cifra aumenta hasta el 67%. Por el contrario, si se mantienen las tasas actuales de recogida y reciclado esta cifra se reduce al 39%.**



+ La demanda de todos los metales está dominada principalmente por la movilidad eléctrica, sobre todo por **los coches eléctricos**



### » Representación de la demanda y recuperación de metales

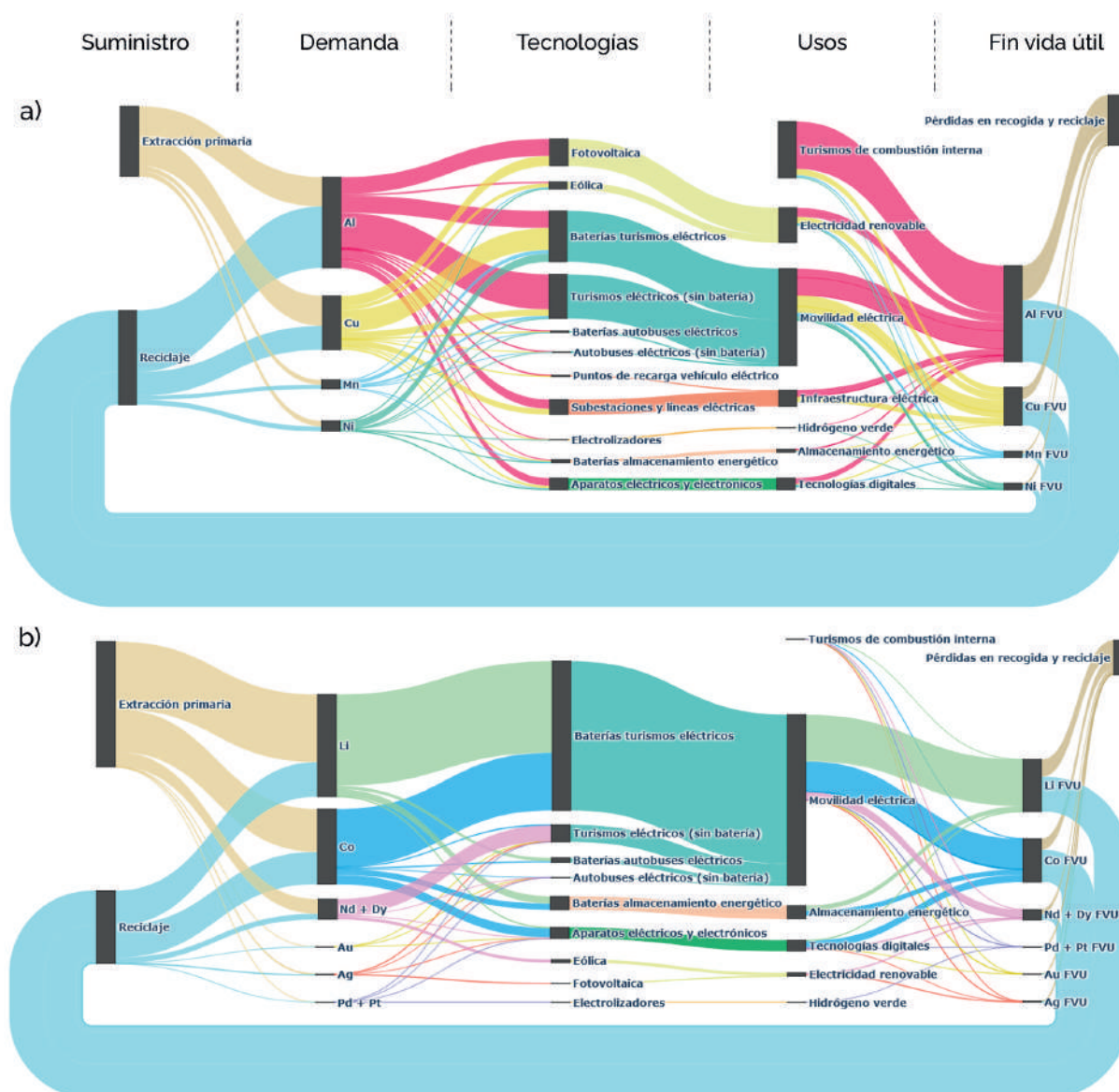
Para visualizar el conjunto de los flujos de metales analizados sólo para el escenario de transición (ET), la Figura 7 representa gráficamente los resultados acumulados entre 2020 y 2050, diferenciando entre el origen y destino de cada uno de los metales, las tecnologías consideradas, y cinco etapas del ciclo de vida. Los resultados anuales completos se pueden explorar visualmente en la representación online de los diagramas Sankey dinámicos. En este diagrama observamos la magnitud de las pérdidas en los procesos de recogida y reciclaje para cada uno de los metales, y apreciamos cómo la parte de la demanda que no puede ser cubierta desde el reciclaje de las tecnologías consideradas se suministra desde la extracción primaria.

La diferencia entre la magnitud de entradas y salidas en los nodos “Usos” refleja la cantidad de la demanda acumulada 2020-2050 que permanece como stock de metales al final del periodo considerado. Esto representa justamente el fenómeno de metales que se mantienen “atrapados” en las tecnologías en uso que mencionábamos antes.

### 4.3. Extracción primaria

Finalizamos la exposición de resultados poniendo el foco en la extracción primaria. La calculamos a partir de la diferencia entre la demanda de metales y la recuperación a partir del reciclaje. Asumimos que aquella parte de

la demanda que no se pueda cubrir desde el reciclaje se suministrará desde la extracción primaria. En el Cuadro 6 mostramos los resultados de extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 para cada uno de los metales bajo el escenario de transición (ET).



+ **Figura 7**  
**Diagrama de Sankey para aluminio, cobre, manganeso y níquel (a) y para litio, cobalto, tierras raras (Nd + Dy), oro, plata y PGM (Pd + Pt) (b) bajo el escenario de transición (ET). Se diferencian cinco etapas del ciclo de vida: suministro, demanda, tecnologías, usos y fin de útil. FVU son las siglas de “fin de vida útil”.**

## Minerales para la transición energética y digital en España: demanda, reciclaje y medidas de ahorro

+ Cuadro 6  
Resultados acumulados entre 2020 y 2050  
de extracción primaria de metales en el escenario de transición (ET).

Requerimientos de extracción primaria acumulada 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
1,5	2.327,1	0,1	2.372,0	94,8	149,4	398,2	437,8	32,4	0,1

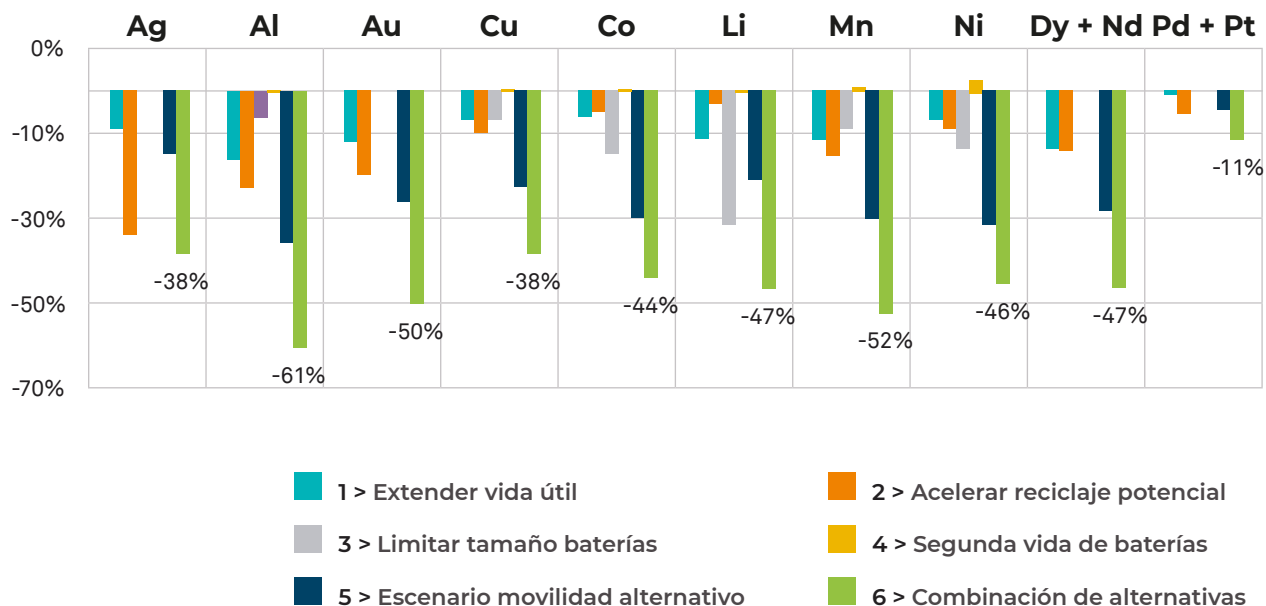
Para poner estas cifras en contexto aportamos algunos datos sobre el consumo y la extracción doméstica de algunos metales en España. Según datos de Eurostat<sup>59</sup>, el *consumo material* en España medio entre 2016 y 2021 fue de 3.624 kt de bauxita y otros aluminios, 12.139 kt de cobre y 20 kt de níquel. Así vemos cómo los resultados de extracción primaria acumulada de cobre y aluminio para la transición energética y digital entre 2020 y 2050 son inferiores a la demanda anual de estos metales en el resto de la economía. En el caso del níquel vemos cómo la demanda mineral asociada a la transición energética y digital supondría un aumento significativo respecto a la demanda anual actual. Del resto de metales no hay datos disponibles. Esto nos da una idea de la importancia de la demanda desde el resto de sectores de la economía en el caso del cobre y el aluminio, y la magnitud de los requerimientos de extracción primaria en el futuro respecto a la extracción doméstica actual. La extracción primaria tiene unos impactos ambientales y en términos de justicia global que analizaremos en la siguiente sección.

### »» Impacto de las medidas de economía circular y suficiencia sobre el ahorro de materiales

Las necesidades de extracción primaria descritas arriba pueden reducirse gracias a las diferentes medidas de economía circular y suficiencia planteadas. En la Figura 8 se muestra la variación sobre la extracción primaria entre 2020 y 2050 para cada alternativa.

+

## Reducción en la extracción de materiales

+ **Figura 8**

**Variación de la extracción primaria acumulada 2020-2050 para las diferentes alternativas de economía circular y suficiencia en comparación con el escenario de transición.**

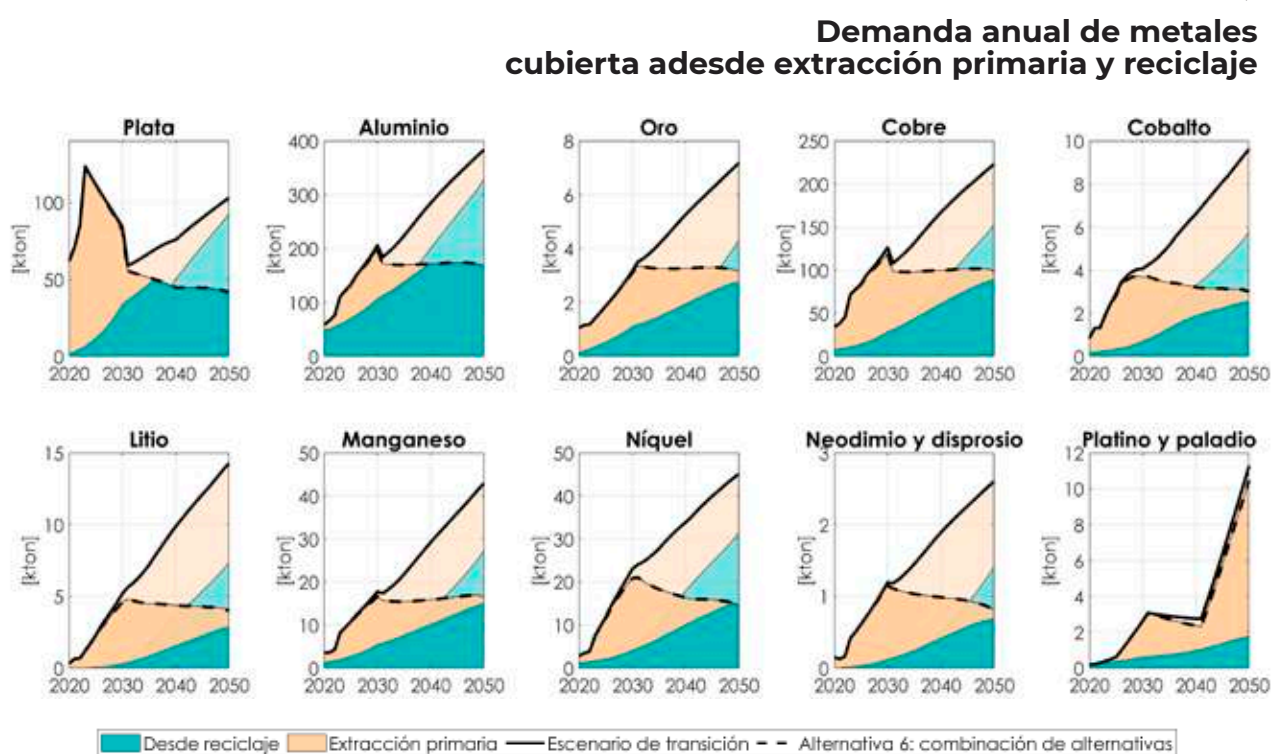
Las alternativas que mayor reducción de la extracción primaria logran son aquellas relacionadas con la movilidad eléctrica. En primer lugar, plantear un escenario alternativo de movilidad, reduciendo significativamente la flota de turismos y generando un cambio modal hacia el transporte público (Alternativa 5), logra una reducción del 5-35% de los requerimientos de extracción primaria. Asimismo, limitar el tamaño de las baterías de los turismos eléctricos (Alternativa 3) obtiene una reducción del 6-16% de los requerimientos de extracción primaria.


Cuando se combinan todas las medidas de economía circular y suficiencia propuestas (Alternativa 6) logramos una reducción de los requerimientos de extracción primaria del 11-61% para los diferentes metales analizados. Esto refuerza la importancia de tener en cuenta estas medidas como una forma de reducir la demanda y minimizar la extracción primaria de metales. Esta reducción aliviaría también los impactos sociales, medioambientales y de desigualdad internacional que se encuentran aparejados a los procesos extractivos.



**Al combinar todas las medidas de economía circular y suficiencia propuestas logramos una reducción de los requerimientos de extracción primaria del 11-61% para los diferentes metales analizados.**

Por último, representamos en la Figura 9 la comparación entre la demanda anual de metales entre 2020 y 2050 para el escenario de transición (ET) y para el escenario que combina todas las medidas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6), diferenciando entre la parte de la demanda suministrada desde reciclaje y desde extracción primaria.





Aquí destacamos dos aspectos relevantes. En primer lugar, vemos cómo las medidas de economía circular y suficiencia logran alcanzar un estado estacionario para la mayoría de metales, que mantiene la demanda más o menos constante en el nivel alcanzado tras el periodo de crecimiento experimentado hasta 2030. Una excepción es el caso del platino y paladio, que apenas ven afectada la demanda porque las medidas aplicadas no modifican la capacidad de electrolizadores instalados para la producción de hidrógeno verde.

Frente a este escenario alternativo, en el escenario de transición se mantiene un perfil de crecimiento sostenido sobre la demanda entre 2030 y 2050. Este fuerte aumento de la demanda dificulta que las ambiciosas tasas de reciclaje logren desplazar en mayor medida la centralidad de la extracción primaria.

En segundo lugar, observamos cómo el porcentaje de la demanda cubierto desde el reciclaje aumenta considerablemente cuando se aplica la combinación de medidas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6), llegando a alcanzarse el 100% de la demanda en varios casos.

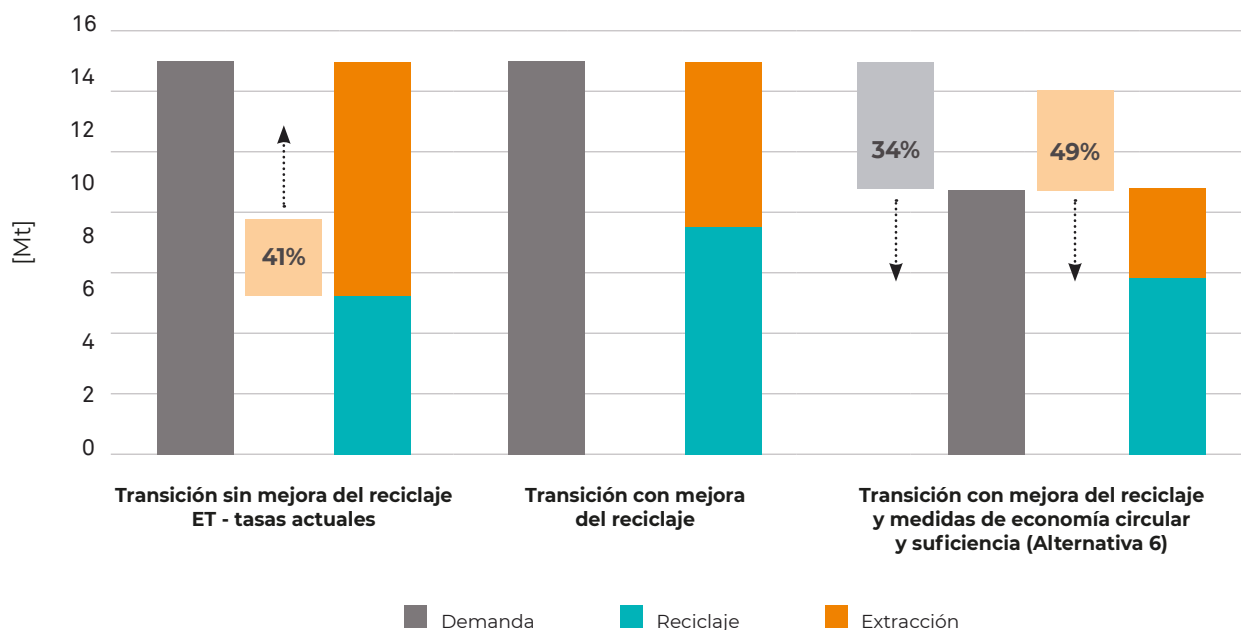
#### **4.4. Ahorro en la demanda y extracción de metales**

Como resumen del conjunto de resultados obtenidos mostramos de forma simplificada en la Figura 10 el ahorro en la demanda y extracción de metales según escenarios.

El escenario de transición (ET) y el escenario de transición sin mejora de reciclaje (ET-tasas actuales) tienen la misma demanda de metales entre 2020 y 2050. La diferencia entre ellos es que en el primero se logra cubrir el 57% de la demanda a partir de reciclaje, mientras que en el segundo se cubre únicamente el 39%. Esto hace que los requerimientos de extracción primaria para la transición energética y digital sean un 41% superior si no se lleva a cabo una mejora en los sistemas de recogida y reciclaje. Debemos tener en cuenta que aquí estamos juntando la demanda de todos los metales, en la que el cobre y el aluminio representan la mayor parte. Las diferencias en el porcentaje de la demanda cubierta desde reciclaje según diferentes escenarios para metales como el litio, el cobalto o las tierras raras son mucho más acentuadas.

+

### Ahorro en la demanda y extracción de metales



+ Figura 10

**Ahorro en la demanda y extracción de metales entre 2020 y 2050, poniendo en comparación el escenario de transición sin mejora de reciclaje (ET-tasas actuales) y la combinación de todas las alternativas (Alternativa 6) respecto al escenario de transición (ET)**

La combinación de las medidas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6) sí logra una reducción de la demanda total de metales para la transición energética y digital. Concretamente logra una reducción total del 34% en comparación con el escenario de transición. Esta reducción junto a una aceleración en la mejora del reciclaje logra que el reciclaje llegue a cubrir el 67% de la demanda. La combinación de estas dos mejoras hace que los requerimientos de extracción primaria se reduzcan en un 49%. Al mismo tiempo vemos cómo esto se produce mientras la cantidad de metales reciclados también se reduce, lo cual supondría un ahorro en el consumo de los recursos y la energía necesaria para llevar a cabo los complejos procesos de reciclado.

Esta representación ejemplifica bien las opciones de transición que tenemos por delante. Una mejora del reciclaje manteniendo la demanda

+





logra un ahorro de metales obtenidos por extracción primaria, pero las medidas de suficiencia aumentan dicho ahorro aún más y reducen la demanda de metales en términos absolutos. En comparación, la Alternativa 6 requiere un 64% menos de extracción primaria que el ET-tasas actuales. La elección no está entre reciclaje y suficiencia: necesitamos aplicar las dos.

**Las medidas de economía circular y suficiencia logran una reducción de la demanda de metales del 34% en comparación con el escenario de transición. Esta reducción junto a una aceleración en la mejora del reciclaje logra que el reciclaje llegue a cubrir el 67% de la demanda. La combinación de estas dos mejoras hacen que los requerimientos de extracción primaria se reduzcan en un 49%.**



+ **Resumen de la sección** +

## Resultados

+ **La movilidad eléctrica domina la demanda de metales**, siendo responsable del 54-58% de la demanda acumulada 2020-2050 de aluminio y cobre, del 73-92% de manganeso, cobalto, níquel y litio, y del 79% de disprosio y neodimio.

+ **La fabricación de electrolizadores** para el hidrógeno verde es por su parte el principal motor de la demanda de paladio y platino (77%), mientras que los aparatos eléctricos y electrónicos tienen un peso importante en la demanda de oro (35%).

+ Tanto la demanda de metales como los requerimientos de extracción primaria se pueden reducir aplicando una **combinación de medidas de economía circular y suficiencia**, logrando respecto al escenario de transición:

- Una reducción media del 34% de la demanda de metales;
- Una reducción del 50% en metales clave para la transición como el litio;
- Aumentar la contribución de los metales reciclados hasta un 67% de la demanda;
- + • Reducir los requerimientos de extracción primaria de media un 49% para el conjunto de los metales, aunque hasta un 61% en el caso del aluminio o un 52% en el caso del manganeso.

+ **Las medidas relacionadas con la movilidad son las que mayor impacto** tienen en la reducción de la extracción primaria. Apostar por el transporte público y reducir el vehículo privado permite por sí solo reducir entre un 5 y un 35% la necesidad de extracción primaria.

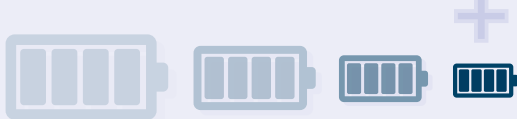
+ Para una transición energética realmente sostenible y justa necesitamos...

**Reciclaje de tecnologías y baterías**



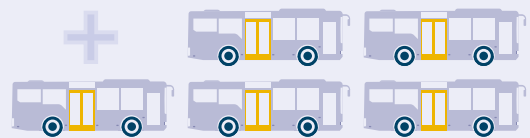
+ **Alargar la vida de tecnologías y baterías**

**Baterías más pequeñas**



+ **Segunda vida de baterías**

+ **Reducción flota vehículos privados de 25 millones a 9 millones**



Incrementar **autobuses** de **65.000** a **250.000**

+ **Resultados**



**Los minerales reciclados** podrían cubrir el **67%** de la **demanda material** para la **transición energética**



**Reduciríamos la necesidad de extracción de minerales** en un **50%**







# Evaluación de la extracción primaria

Concluimos nuestro estudio examinando las consecuencias que se derivan de la extracción primaria de metales asociada a las políticas públicas de transición energética y digital en España entre 2020 y 2050. En primer lugar, nos centramos en los impactos ambientales, en segundo lugar comparamos los resultados obtenidos con una distribución equitativa de las reservas minerales globales.

## 5.1. Impactos de la extracción primaria

La minería tiene una gran cantidad de impactos socioambientales que no pueden ignorarse. Sin ánimo de realizar un análisis exhaustivo, estudiamos tres factores de impacto sobre los resultados obtenidos.

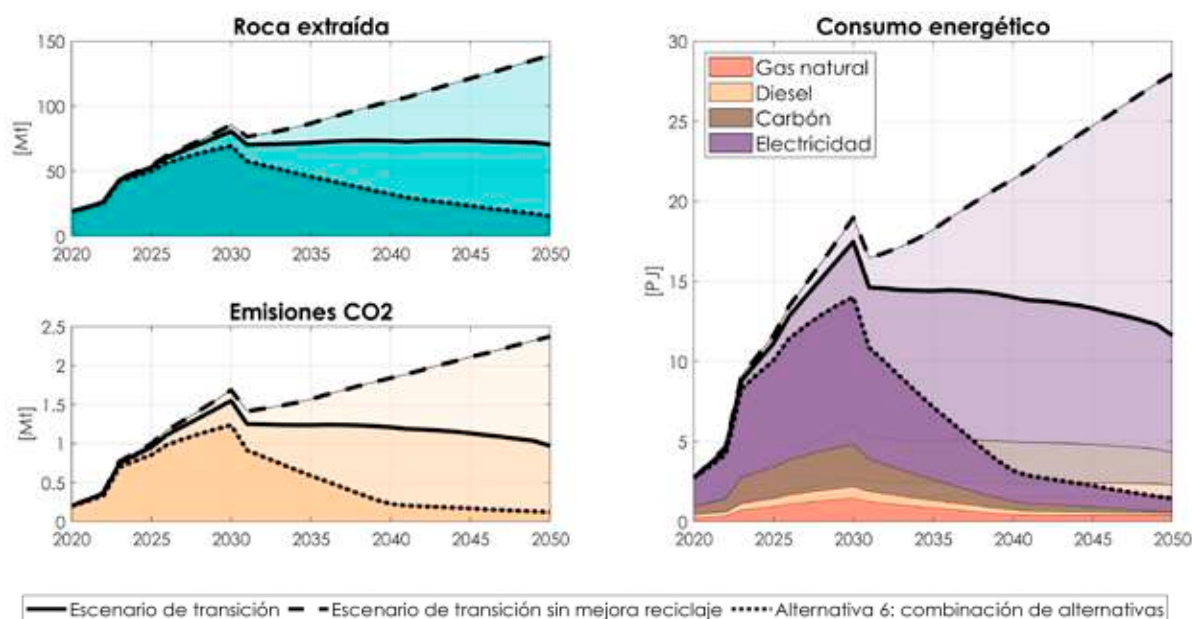
- » **Roca extraída:** A partir del parámetro roca-a-metal<sup>60</sup> se calcula la cantidad de roca que debe ser removida para extraer una determinada cantidad de metal. Una mayor cantidad de roca extraída implica un mayor impacto sobre los ecosistemas, la biodiversidad y las comunidades afectadas sobre el territorio<sup>61</sup>.
- » **Consumo energético:** El proceso de extracción, concentración y refinado necesita del consumo de energía, tanto de forma directa como de forma indirecta a través de los productos químicos. Aquí diferenciamos entre los principales vectores energéticos involucrados en el proceso: gas natural, diésel, carbón y electricidad.
- » **Emisiones de CO<sub>2</sub>:** Estimamos las emisiones asociadas a la extracción primaria<sup>62</sup>.

En la Figura 11 se representan los resultados anuales obtenidos para cada uno de estos parámetros bajo tres escenarios: el escenario de transi-



+

### Impactos de la extracción primaria según escenarios



+ Figura 11

**Impactos anuales de la extracción primaria según escenarios (ET, ET-tasas actuales y Alternativa 6) entre 2020 y 2050**

ción (ET), el escenario de transición sin mejora del reciclaje (ET-tasas actuales) y la combinación de las medidas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6). Vemos cómo en el escenario de transición los parámetros de impacto se estabilizan levemente tras una fase de rápido crecimiento hasta 2030, lo cual se debe a una mayor participación del reciclaje en el suministro de la demanda. La roca extraída se estabiliza en torno a las 73 Mt anuales, el consumo energético en torno a los 14 PJ anuales y las emisiones de CO<sub>2</sub> en torno a las 1,2 Mt anuales.

Para poner estas cifras en contexto aportamos algunos órdenes de magnitud con los que comparar. El consumo de energía primaria en España en 2019 fue de 5.279 PJ, y las emisiones de CO<sub>2</sub> en el año 2022 fueron de 305 Mt. De modo que el consumo energético y emisiones anuales acumuladas entre 2020 y 2050 asociadas a la extracción primaria de los metales analizados representarían el 7% del consumo energético anual y el 11 % emisiones anuales de España en la actualidad. Debemos advertir que en este cálculo no incluimos el consumo energético y las emisiones asociadas a la fabricación de las tecnologías, lo cual aumentaría las cifras.

Por otro lado, al tener en cuenta otros escenarios encontramos que combinando todas las alternativas de economía circular y suficiencia (Al-

+

ternativa 6), los parámetros de impacto se reducen en un 31-52%. Por el contrario, en el escenario más desfavorable, si no hubiera ninguna mejora sobre los procesos de recogida y reciclaje (ET-tasas actuales), la cantidad de roca extraída, consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaría en un 34-44% respecto al escenario de transición.

Respecto a la roca extraída, vamos a hacer una comparación gráfica. Los buques cargueros de mayor capacidad (Cape) pueden transportar 110 kt de materias primas. En el escenario de transición (ET) harían falta 2 cargueros para transportar las 166 kt de metales obtenidos desde extracción primaria en 2050 destinadas a la transición energética y digital en España. Pero si contáramos la cantidad de roca, se necesitarían otros 636 cargueros para cargar las 70 Mt de roca extraída para obtener dichos metales. En el escenario en el que no se mejora el reciclaje (ET-tasas actuales) estas cifras ascienden en 2050 a 4 Cape cargando metales y 1.264 Cape cargando la roca extraída. Mientras que combinando todas las alternativas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6), la flota en 2050 se reduciría a 1 Cape cargando metales y 136 Cape cargando la roca extraída.

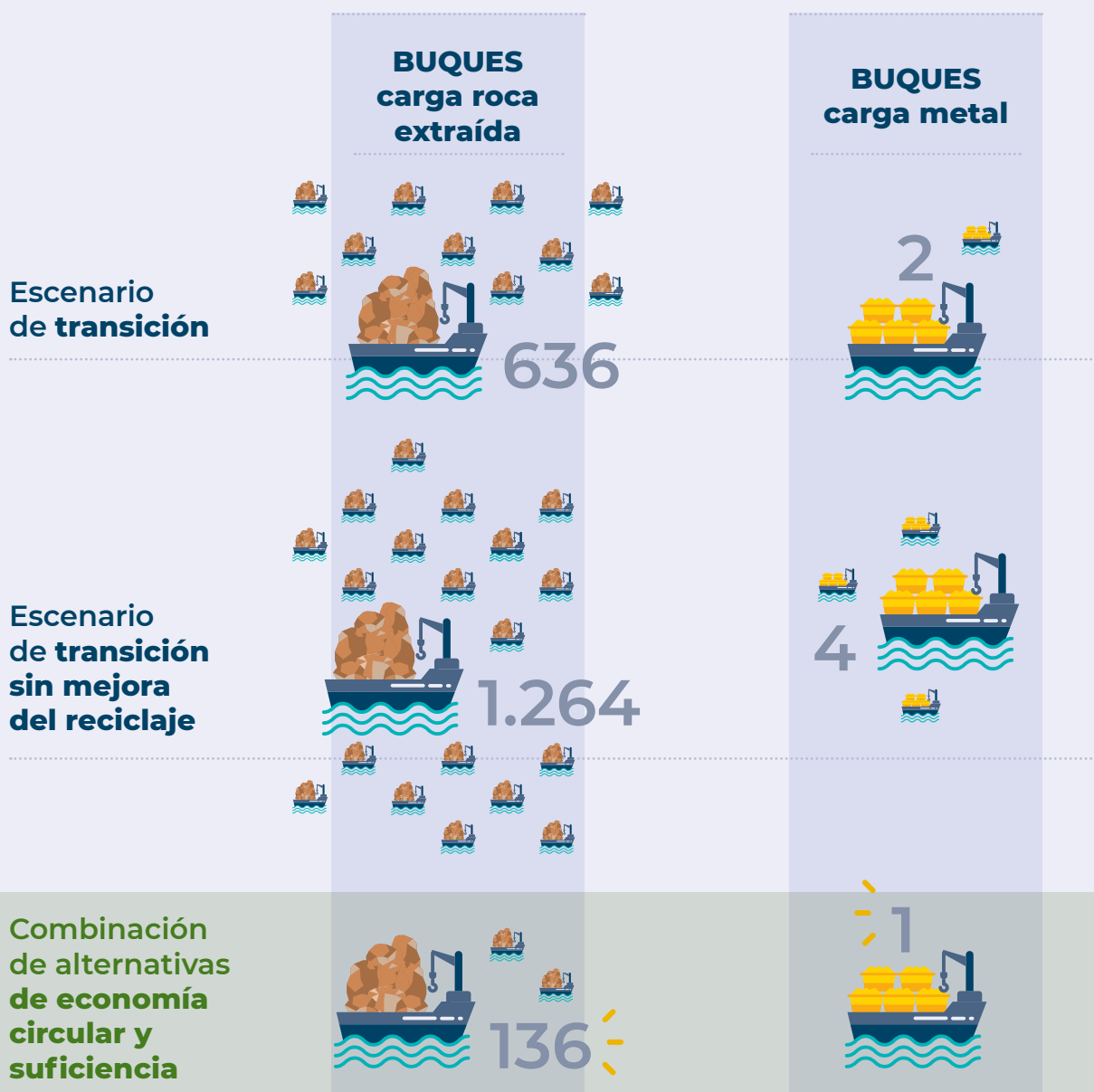
Debemos realizar la advertencia de que no hemos abordado los impactos ambientales asociados a los procesos de reciclaje, los cuales no son inocuos. Las emisiones asociadas a los metales recuperados desde reciclaje

***Al hablar de minerales no se suele tener en cuenta la cantidad de roca que ha sido necesario extraer para conseguirlos. Para que nos hagamos una idea de la diferencia: para transportar los minerales necesarios en 2050 harían falta dos cargueros, pero para llevar toda la roca extraída necesitaríamos 636 cargueros.***

son un 85-96% inferiores a los obtenidos desde extracción primaria en el caso del cobre y aluminio, pero únicamente un 38% inferiores en el caso de litio, cobalto y níquel. A eso se le suman otros impactos vinculados a la contaminación del entorno o impactos en la población local.

## + Volumen de Roca extraída...

... según escenarios con el mismo consumo de energía y variación en la flota de vehículos



## 5.2. Comparaciones con perspectiva de justicia global

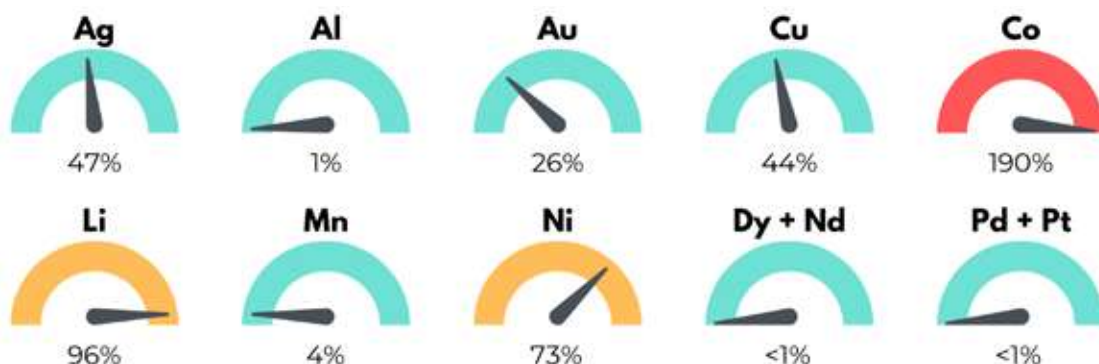
Por último, realizamos una aproximación con perspectiva de justicia global. A lo largo de esta investigación hemos estimado los requerimientos de extracción primaria asociados a la fabricación de las principales tecnologías para la transición energética y digital en España entre 2020 y 2050. Las reservas a nivel global de estos metales son ampliamente superiores a los resultados obtenidos. Sin embargo, España es un estado de tan sólo 47 millones de habitantes. Por eso consideramos adecuado poner los resultados obtenidos en comparación con el parámetro que hemos denominado como *“fracción equitativa de las reservas globales”*.

Dado que la población de España representa el 0,6% de la población mundial, la fracción de las reservas minerales que le correspondería de forma equitativa sería el 0,6% de las mundiales. Esto introduce una perspectiva de justicia global y persigue unas hojas de ruta de transición universalizables al conjunto de la población mundial. Calculamos la “fracción equitativa” a partir de los datos de reservas minerales globales en 2022 recogidas por las estadísticas oficiales del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)<sup>64</sup>.

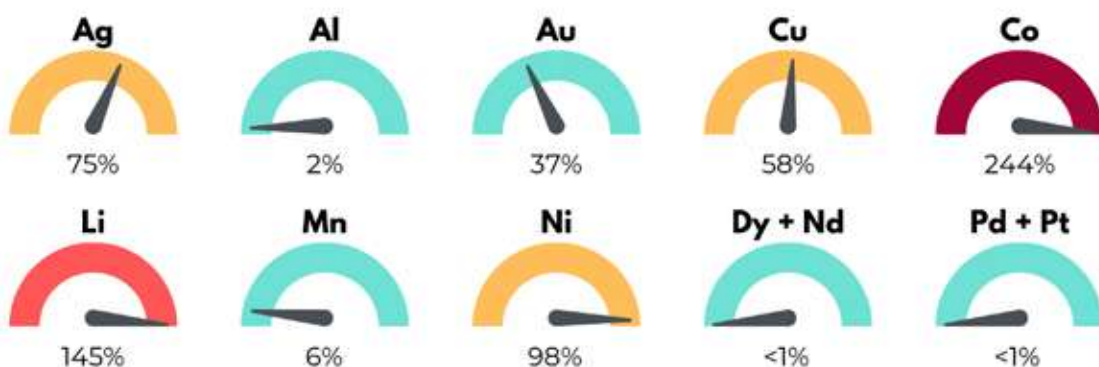
**Una transición ecológica justa debe poder ser “universalizable”, es decir, todos los países deben poder tener acceso a los recursos para llevarla a cabo. Con las políticas de transición energética actuales, España casi cubriría o superaría su “fracción equitativa” de recursos en metales como el cobalto, el litio o el níquel, y esto sin contar con la demanda de otros sectores de la economía.**



## + Escenario de transición



## Escenario de transición sin mejoras en la recogida y reciclaje



## Combinación de alternativas de economía circular y suficiencia



+ Figura 12

Comparación de los requerimientos de extracción primaria acumulada 2020-2050 respecto a la "fracción equitativa" de las reservas globales de los metales analizados para el escenario de transición (ET), el escenario de transición sin mejoras de reciclaje (ET-tasas actuales) y la combinación de las alternativas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6).



En la Figura 12 se muestra la comparación entre los resultados de extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 en nuestro estudio y la “fracción equitativa de las reservas globales” para cada uno de los metales analizados. Estos resultados indican que la extracción primaria de metales para las tecnologías de transición energética y digital de España entre 2020 y 2050 superaría la “fracción equitativa” de las reservas mundiales de cobalto (190%), casi alcanzaría la de litio (96%) y superaría el 73% en el caso del níquel en el escenario de transición (ET). Si se mantienen las tasas actuales de recogida y reciclaje (ET-tasas actuales), los requerimientos acumulados de extracción primaria de litio superarían la “fracción equitativa” (145%), los de níquel se quedarían cerca (98%) y los de cobalto alcanzarían el 244% de la “fracción equitativa”.

Al combinar todas las alternativas de economía circular y suficiencia (Alternativa 6), se consumiría el 51% y el 39% de la “fracción equitativa” del litio y del níquel, mientras que este parámetro seguiría estando por encima del 100% en el caso del cobalto.

Estos porcentajes no tienen en cuenta la demanda del resto de sectores de la economía, que en algunos casos representan la mayor fuente de consumo. En el caso del cobre el escenario de transición consumiría el 44% de la “fracción equitativa” de las reservas globales, pero si se incluyera la demanda del resto de la economía este porcentaje sería considerablemente superior. Esto indica que puede haber conflictos de justicia global sobre más metales de los que destacan a primera vista.

+ **Resumen de la sección** +

## **Evaluación de la extracción primaria**

+ **El consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>** asociadas a la extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 bajo el escenario de transición son equivalentes al 7% y 11% del consumo energético y las emisiones anuales de España. Combinando todas las alternativas de economía circular y suficiencia estos parámetros de impacto se reducen en un 31-52%, mientras que si no se mejora el reciclaje aumentarían en un 33-44% respecto al escenario de transición.

+ **En 2050, haría falta extraer 70 Mt de roca para obtener las 166 kt de metales** que demandará la transición energética ese año. Esto equivale a 636 buques de carga que serían necesarios para transportar dicha roca. Si las tasas de reciclaje se mantienen como en la actualidad, la cantidad de roca extraída aumentaría hasta necesitar 1264 buques. Si combinamos las alternativas de economía circular y suficiencia se reducirían a 136 buques cargueros.

+ **Desde un punto de vista de justicia global**, la demanda de algunos metales desde extracción primaria superaría con creces la fracción equitativa de España. En el escenario de transición la extracción primaria alcanza el 190% de la fracción equitativa de las reservas mundiales de cobalto, el 96% de las de litio y el 73% de las de níquel. Combinando todas las alternativas de economía circular y suficiencia estas cifras se lograrían reducir al 107% para el cobalto, el 51% para el litio y el 39% para el níquel. Si no se mejora el reciclaje, estas cifras incrementarían considerablemente.



# Conclusiones y recomendaciones

## 6

### ¿Qué hemos hecho?

**H**emos desarrollado un análisis del flujo de materiales (MFA) para estimar de forma detallada la demanda, el reciclaje y la extracción primaria de metales asociada a las políticas públicas de transición energética y digital en España entre 2020 y 2050. Nos hemos centrado en diez grupos de metales (aluminio, cobre, cobalto, litio, manganeso, níquel, oro, plata, platino y paladio, y disprosio y neodimio) asociados a seis ámbitos tecnológicos (generación renovable de electricidad, movilidad eléctrica, infraestructuras eléctricas, hidrógeno verde, almacenamiento energético y tecnologías digitales).

Definimos un total de tres escenarios. El principal es el escenario de transición (ET), en el que se combinan las actuales políticas públicas de transición energética con una mejora significativa de los sistemas de recogida y reciclaje de metales a partir de residuos tecnológicos. A este le acompaña el escenario de transición sin mejora de reciclaje (ET-tasas actuales). Por otro lado, planteamos un escenario con seis alternativas de economía circular y suficiencia: (1) alargar la vida útil, (2) acelerar el reciclaje potencial, (3) limitar tamaño de baterías, (4) segunda vida de baterías, (5) escenario alternativo de movilidad y (6) todas las alternativas combinadas.

### ¿Qué hemos encontrado?

» Los resultados obtenidos muestran cómo **la demanda futura de metales asociada a la transición energética y digital está impulsada fundamentalmente por la movilidad eléctrica**. Estas tecnologías serían responsables del 54-58% de la demanda acumulada entre 2020 y 2050 de aluminio y cobre, del 73-92% de manganeso, cobalto, níquel y litio, y del 79% de disprosio y neodimio. La fabricación de electrolizadores para el



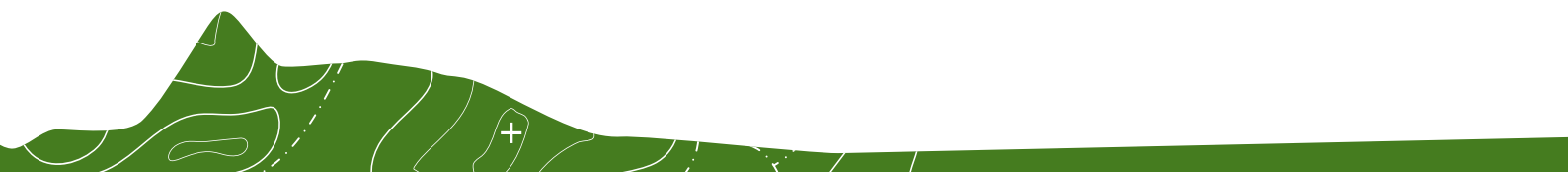
hidrógeno verde es a su vez el principal motor de la demanda de paladio y platino (77%). Por su parte, la eólica es responsable del 16% de la demanda de disprosio y neodimio, las subestaciones y líneas eléctricas del 10-11% de la de cobre y aluminio, y los aparatos eléctricos y electrónicos del 35% de la de oro.

»» Aplicando unas **ambiciosas tasas de recogida y reciclaje de metales se lograría cubrir el 57% de la demanda de metales** entre 2020 y 2050 en el escenario de transición. Esta cifra asciende hasta 67% combinando las alternativas de economía circular y suficiencia, pero se reduce al 39% si no hay mejoras en el reciclaje.

»» **Las medidas de economía circular y suficiencia podrían reducir a la mitad los requerimientos de extracción primaria.** El impacto de estas medidas sería mayor en metales como el aluminio, reduciendo sus requerimientos de extracción primaria en un 61%.

»» **Las alternativas que mayor reducción de la extracción primaria logran** son aquellas que limitan el tamaño de las baterías de los turismos eléctricos (↓ 6-16%) y aquellas que plantean un escenario alternativo de movilidad que reduce significativamente la flota de turismos y genera un cambio modal hacia el transporte público (↓ 5-35%). Cuando se combinan la extensión de la vida útil, la aceleración del reciclaje, la limitación del tamaño de las baterías, la segunda vida de baterías y el escenario alternativo de movilidad se logra una reducción de la extracción primaria del 11-61% para los diferentes metales analizados.

»» **El consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas** entre 2020 y 2050 asociadas a la extracción y refinado de los metales estudiados incorporados en las tecnologías para la transición representaría el 7-11% del consumo anual de energía primaria y de las emisiones de CO<sub>2</sub> anuales en España en la actualidad. Los metales suministrados desde extracción primaria bajo el escenario de transición en 2050 ocuparían 2 buques de carga, mientras que la roca extraída para obtener dichos metales sería equivalente a 636 buques cargueros. Si no se mejora el reciclaje esta cifra asciende hasta 1.264 buques, mientras que si se combinan las alternativas de economía circular y suficiencia se reduciría hasta los 136 buques cargueros.



» Analizado desde una perspectiva de justicia global, la transición energética y digital en España supera la “fracción equitativa” de las reservas cobalto y prácticamente alcanza la del litio. Este parámetro representa el 0,6% de las reservas globales, equivalente al porcentaje de la población mundial que ocupa España. En el escenario de transición la extracción primaria alcanza el 190% de la fracción equitativa de las reservas mundiales de cobalto, el 96% de las de litio y el 73% de las de níquel. Combinando todas las alternativas de economía circular y suficiencia estas cifras se lograrían reducir al 107% para el cobalto, el 51% para el litio y el 39% para el níquel. Si no se mejora el reciclaje incrementarían considerablemente, superando también la fracción equitativa del litio.

### ¿Cuáles son las recomendaciones de Amigos de la Tierra ante estos resultados?

Como ha reconocido la propia Unión Europea, la transición energética no debería suponer reemplazar la actual dependencia de nuestras economías de los combustibles fósiles por una dependencia de minerales críticos. La respuesta a este reto requiere un enfoque que hasta la fecha las instituciones no han tenido en cuenta: **la mejor respuesta a los problemas que plantea el incremento de la demanda de minerales pasa por mitigar o reducir esta demanda**, en otras palabras, plantear una transición ecológica que implique el ahorro de recursos minerales. Al mismo tiempo, estamos muy lejos de alcanzar todo el potencial del reciclaje de metales para cubrir esta demanda. Ambas cuestiones (fomento real de la circularidad en las cadenas de suministro de minerales y medidas de reducción de la demanda) deben abordarse a la par, con carácter urgente, y siempre con prioridad al impulso de nuevos proyectos extractivos, cuyos impactos sobre el medio ambiente y las personas son severos y a menudo irreversibles.

Como se explica en este informe, aplicar todas las medidas de economía circular y suficiencia analizadas lograría en su conjunto reducir la demanda de minerales entre un 10% y un 50%.

Asimismo, estas medidas lograrían reducir a la mitad los requerimientos de extracción primaria, es decir, disminuirían la necesidad de obtener estos minerales mediante la minería, ya sea dentro o fuera de la Unión Europea. El Gobierno de España tiene por delante diferentes procesos legislativos, tales como implementar la *Hoja de Ruta para la Gestión Sostenible de las Materias Primas Minerales*, o la tan necesaria reforma de la Ley de Minas (Ley 22/1973, de 21 de julio). Recomendamos que a la hora de abordar estos procesos y otros que sean pertinentes, se tengan en cuenta las siguientes acciones prioritarias:

- » **Abordar el necesario cambio en el modelo de movilidad en España, de forma que se reduzca de forma drástica la flota de vehículos privados en circulación** y se apueste por el transporte público. En relación con el coche eléctrico, establecer al mismo tiempo un límite al tamaño de las baterías. Como arroja una de las principales conclusiones de este informe, la demanda futura de metales asociada a la transición energética y digital está impulsada fundamentalmente por la movilidad eléctrica. En consonancia, se concluye que las medidas que por sí solas logran una mayor reducción de los requerimientos de extracción primaria son aquellas relacionadas con el vehículo eléctrico, tales como la reducción drástica del número de turismos y limitar el tamaño de sus baterías.
- » **Alargar la vida útil de las tecnologías eólicas, fotovoltaicas y los turismos eléctricos.** Dentro de las propuestas analizadas, alargar la vida útil de estas tecnologías es otra de las alternativas que tiene un mayor impacto. Así, si se logra extender su vida útil por diez años, se lograría una reducción de la demanda del 10-20% en la mayoría de los metales y se reducirían los requerimientos de extracción primaria entre un 5-15%.
- » **Impulsar el desarrollo de la industria de la minería urbana en España,** de forma que al menos se alcancen unas tasas de recogida y reciclaje que permitan que los metales secundarios contribuyan al 57% de la demanda entre 2020

y 2050. Este porcentaje se lograría en un escenario en el que, sin acometer ninguna de las medidas de economía circular y suficiencia mencionadas en los puntos anteriores, se aumentan las tasas de recogida y reciclaje respecto a las actuales siguiendo las mejores técnicas disponibles. Si además se aplican las alternativas citadas en los puntos anteriores y se aumenta la ambición en reciclaje (de forma que las tasas más ambiciosas se adelantan a 2030), los metales secundarios podrían contribuir al 67% de la demanda entre 2020 y 2050.

» **Abordar el debate y planificación sobre el suministro de materias primas minerales desde una perspectiva de justicia global**

que evite reproducir las desigualdades internacionales existentes. De aplicarse la transición energética y digital sin abordar estos cambios profundos, España superaría lo que sería su fracción equitativa de la reserva global de recursos en el caso del cobalto y casi alcanzaría la del litio, por lo que extraería más minerales de los que le corresponden por población. Considerando que hay otros sectores de la economía que también demandan los metales analizados, es muy probable que esta fracción se alcance o supere en más casos. Para que una transición ecológica sea no solo sostenible sino socialmente justa, debe ser “extrapolable”, es decir, todos los países y regiones del mundo deben tener la posibilidad de llevar dicha transición a cabo, incluyendo mediante un acceso seguro a los minerales necesarios.

» **Garantizar que la planificación y adopción de políticas relacionadas con las materias primas minerales y los proyectos de extracción primaria cuentan con la participación de las comunidades locales potencialmente afectadas (dentro y fuera de Europa). Teniendo en cuenta la degradación ambiental asociada a la actividad extractiva y sus impactos sobre los derechos y el bienestar de las comunidades locales, debe garantizarse que la elaboración de políticas relacionadas con el acceso a las materias primas, así como la toma de decisiones relativa a aquellos proyectos so-**



**bre exploración y explotación mineral, garantizan la participación efectiva** de las comunidades locales.

» A la hora de planificar la gestión y destino de las materias primas minerales relacionadas con la transición energética, **priorizar aquellos modelos colectivos que garantizan una soberanía energética, además del conocimiento** y alfabetización energética de la población y por tanto un consumo eficiente, tales como las comunidades energéticas. Como concluye un informe publicado por Amigos de la Tierra<sup>65</sup>, las comunidades energéticas podrían cubrir el 60% de la demanda eléctrica total en España. Se trata por tanto de un ámbito con gran potencial y necesario para avanzar hacia una transición ecológica basada en energías renovables descentralizadas y que promueven una participación ciudadana real.

» **Aprobar la condición de terrenos no registrables para todos los lugares de la red Natura 2000 y aquellos otros que hayan sido merecedores de protección incompatible con las actividades extractivas**, como es el caso de las reservas fluviales y sus cuencas, los perímetros de protección de las captaciones de aguas para el abastecimiento urbano, entre otras. Diferentes estudios revelan que las minas destinadas a materiales necesarios para la transición energética y digital tienen un mayor solapamiento con las áreas protegidas y los espacios naturales prístinos que las minas destinadas a otros materiales<sup>66</sup>. En España también se ha incrementado la actividad minera en espacios de la Red Natura 2000 y otros espacios protegidos así como en sus proximidades. Por tanto, y sin que esto signifique el que unos espacios se blinden y otros se establezcan como “zonas de sacrificio”, las crecientes tensiones que esta realidad provoca requiere establecer límites a la actividad extractiva en estos espacios de especial protección, al tiempo que se abre el debate sobre los límites a la actividad minera en general.

Asimismo, se deben también dar los pasos necesarios para abordar las **siguientes medidas encaminadas a avanzar hacia un modelo de producción y de consumo respetuoso con las personas y el planeta:**

- + Establecer objetivos y medidas para **reducir de forma absoluta el consumo de recursos minerales** y la huella material e impulsar en la UE la adopción de un objetivo vinculante de reducción de la huella material del 65% para 2050.
- + Diseñar **políticas post-crecimiento para reducir sectores económicos que son destructivos con el medio ambiente** y cuyos beneficios sociales son escasos o nulos, y mantener o incrementar aquellos sectores que satisfacen las necesidades básicas y el bienestar de las personas.
- + Promover una **economía circular que incluya el diseño de infraestructuras y productos duraderos** y que cumplan los principios de “suficiencia y eficiencia”.
- + Garantizar el **respeto de los derechos humanos y la rendición de cuentas de todas las empresas**, incluyendo las que desarrollan proyectos para la extracción y procesamiento de materias primas minerales, allá donde operan, así como el derecho de las comunidades a decir “no” a los proyectos mineros.
- + **Acabar con la explotación económica y de recursos del Sur Global**, poniendo fin a acuerdos comerciales y de protección de inversiones que socavan la acción de los gobiernos para proteger los derechos humanos y el medio ambiente, tales como el acuerdo UE-Mercosur.

### **¿Cómo podemos profundizar más?**

- » Ampliando el análisis con la demanda de metales del resto de la economía española, que tenga en cuenta las consecuencias del crecimiento económico y las transformaciones estructurales asociadas a la transición energética y digital.
- » Dedicando mayores esfuerzos al estudio de la digitalización en España, integrando tecnologías como los centros de datos y el consumo energético asociado.
- » Integrando al análisis los impactos energéticos, medioambientales y sociales del reciclaje.
- » Profundizando el análisis de escenarios alternativos de movilidad mediante un estudio más granular y detallado de las transformaciones que lograrían una reducción en el uso de automóviles privados en diferentes regiones y segmentos de población.

# Notas

1. **“La Mina, la Fábrica y La tienda. Dinámicas globales de la “transición verde” y sus consecuencias en el “triángulo del litio”**, Observatori del Deute en la Globalització, Julio 2023.
2. Un reciente informe analiza cómo la Ley de Materias Primas Fundamentales beneficia a la industria del armamento y como este lobby ha presionado para que moldearla a su favor. **“Blood on the Green Deal. How the EU is boosting the mining and defense industries the name of climate action”**, Noviembre 2023.  
<https://corporateeurope.org/en/2023/11/blood-green-deal>
3. **“A Turning Point: The Critical Raw Material Act’s needs for a Social and Just Green Transition”**, Raw Materials Coalition, disponible aquí:  
<https://eurmc.org/publication/a-turning-point-the-critical-raw-material-acts-needs-for-a-social-and-just-green-transition/>
4. Welsby, D., Price, J., Pye, S. et al. **Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world.** *Nature* 597, 230–234 (2021).  
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8>
5. World Bank (2020), **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition**, World Bank, Washington, DC. Disponible en:  
<https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climat-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>
6. IEA (2021), **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**, IEA, Paris. Disponible en:  
<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
7. Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, A., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D. and Christou, M.



(2023). **Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study**, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC132889.  
<https://dx.doi.org/10.2760/386650>

8. IEA (2023), **Critical Minerals Market Review 2023**, IEA, Paris  
<https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>

9. The White House (15/08/2022). **BY THE NUMBERS: The Inflation Reduction Act**. Disponible en:  
<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/15/by-the-numbers-the-inflation-reduction-act>

10. Comisión Europea (2023). **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**. COM(2023) 160 final. Disponible en:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160>  
Texto final aprobado el 13 de diciembre:  
<https://www.europarl.europa.eu/plenary/en/texts-adopted.html>

11. Comisión Europea (2023). **Un Plan Industrial del Pacto Verde para la era de cero emisiones netas**. COM(2023) 62 final. Disponible en:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0062>

12. Las materias primas estratégicas son un subgrupo dentro de la lista de materias primas fundamentales que la UE actualiza desde 2011. Los materiales estratégicos son aquellos cruciales para las tecnologías necesarias para la “Transición verde y digital” europea, para la defensa y para el sector aeroespacial, que pueden estar sujetos a riesgos en las cadenas de suministro.

13. IEA (2023), **Critical Minerals Market Review 2023**, IEA, Paris  
<https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>

14. Thea Riofrancos; **The Security–Sustainability Nexus: Lithium Onshoring in the Global North**. *Global Environmental Politics* 2023; 23 (1): 20–41. doi:  
[https://doi.org/10.1162/glep\\_a\\_00668](https://doi.org/10.1162/glep_a_00668)



15. Ecologistas en Acción, diciembre 2019. **Minería Especulativa en España.** Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/131926/>
16. Amigos de la Tierra y OMAL (2022). **El boom minero: patrones e impactos de la expansión de la industria extractiva en España.** Disponible en: <https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2022/10/Informe-Mineria.pdf>
17. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022). **Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales.** Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/materias-primas-minerales/default.aspx>
18. Martín Lallana, Jorge Torrubia y Alicia Valero (2023). **Minerales para la transición energética y digital en España: Estado del arte, revisión de políticas públicas y alternativas.** Encargado por Amigos de la Tierra. Disponible en: <https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2023/08/MMPP-Transicion-CIRCE-2023.pdf>
19. Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2003). **Practical handbook of material flow analysis.** Lewis Publishers, CRC Press LLC: Boca Raton (EEUU).
20. Dominik Wiedenhofer, Tomer Fishman, Christian Lauk, Willi Haas, Fridolin Krausmann (2019). **Integrating Material Stock Dynamics Into Economy-Wide Material Flow Accounting: Concepts, Modelling, and Global Application for 1900–2050.** *Ecological Economics*, 156, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.010>.
21. MITERD (2020). **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021 - 2030.** Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
22. MITERD (2023). **Consulta pública sobre el borrador de actualización del PNIEC 2023-2030.** Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://energia.gob.es/es-es/Participacion/Paginas/DetalleParticipacionPublica.aspx?k=607>

23. MITERD (2020). **Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.  
Disponible en:  
<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-estrategia-de-descarbonizaci%C3%B3n-a-largo-plazo-que-marca-la-senda-para-alcanzar-la-neutralidad-clim%C3%A1tica-a-2050/tcm:30-516141>
24. MITERD (2020). **Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.  
Disponible en:  
[https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja\\_de\\_ruta\\_del\\_hidrogeno.pdf](https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf)
25. MITERD (2021). **Estrategia de Almacenamiento Energético**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en:  
[https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento\\_tcm30-522655.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf)
26. MITERD y REE (2020). **Plan de desarrollo de la Red de transporte de Energía Eléctrica (2021-26)**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y Red Eléctrica de España. Disponible en:  
[https://www.planificacionelectrica.es/sites/webplani/files/2023-02/REE\\_Plan\\_Desarrollo.pdf](https://www.planificacionelectrica.es/sites/webplani/files/2023-02/REE_Plan_Desarrollo.pdf)
27. **Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética**. Boletín Oficial del Estado, n. 121, de 21 de mayo de 2021. Disponible en:  
[https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447)
28. Comisión Europea (2022). **Propuesta de reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la homologación de tipo de los vehículos de motor y los motores y de los sistemas, componentes y unidades técnicas independientes destinados a esos vehículos en lo que respecta a sus emisiones y a la durabilidad de las baterías (Euro 7), y por el que se derogan los Reglamentos (CE) n.º 715/2007 y (CE) n.º 595/2009, COM/2022/586 final**. Disponible en:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0586>
29. MITERD (2021). **Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias/>

30. European Commission, Joint Research Centre, Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., et al., **Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system**, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>
31. Zimmermann T, Rehberger M, Gößling-Reisemann S. (2013). **Material Flows Resulting from Large Scale Deployment of Wind Energy in Germany**. Resources, 2(3):303-334. <https://doi.org/10.3390/resources2030303>
32. Weckend V., A. Wade, G. Heath (2016). **End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels**. IRENA & IEA PVPS. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
33. Monitor Deloitte (2017). **Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050: Recomendaciones para la transición**. Disponible en: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/estrategia/Deloitte-es-strategy-descarbonizacion-transporte.pdf>
34. IEA (2022). **Global EV Outlook 2022**. International Energy Agency, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
35. BNEF (2022). **Electric Vehicle Outlook 2022**. Bloomberg New Energy Finance. Disponible en: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
36. Lisa Bongartz, Shivenes Shammugam, Estelle Gervais, Thomas Schlegl (2021). **Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050**. Journal of Cleaner Production, 292, 126056, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126056>.
37. Iglesias-Émbil, M.; Valero, A.; Ortego, A.; Villacampa, M.; Vilaró, J.; Villalba, G. (2020). **Raw material use in a battery electric car—A thermodynamic rarity assessment**. Resour. Conserv. Recycl. 158, 104820. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104820>



38. IEA (2021), **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**, IEA, Paris.  
Disponible en:  
<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
39. Tom Smolinka, Nikolai Wiebe, Philip Sterchele, Andreas Palzer, Franz Lehner, Malte Jansen, Steffen Kiemel, Robert Mieke, Sylvia Wahren, Fabian Zimmermann (2018). **Industrialisation of water electrolysis in Germany: Opportunities and challenges for sustainable hydrogen for transport, electricity and heat**. Study IndWEDe – Brief Overview. National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology, Berlin.  
Disponible en: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/181204\\_bro\\_a4\\_indwede-studie\\_kurzfassung\\_en\\_v03-1.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/181204_bro_a4_indwede-studie_kurzfassung_en_v03-1.pdf)
40. IEA (2023). **Energy Technology Perspectives 2023**. International Energy Agency, Paris.  
Disponible en:  
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
41. World Bank (2020), **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition**, World Bank, Washington, DC. Disponible en:  
<https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>
42. Lisa Bongartz, Shivenes Shammugam, Estelle Gervais, Thomas Schlegl (2021). **Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050**. Journal of Cleaner Production, 292, 126056,  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126056>
43. IEA (2021), **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**, IEA, Paris.  
Disponible en:  
<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
44. Elena Zamora Verdejo (2021). **Requerimientos materiales de transmisión y distribución de electricidad para la transición energética**. Trabajo Fin de Grado - Ingeniería en Organización Industrial. Disponible en:  
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47987>
45. Torrubia J, Valero A, Valero A, Lejuez A .(2023). **Challenges and Opportunities for the Recovery of Critical Raw Materials from Electronic Waste: The Spanish Perspective**. *Sustainability*, 15(2):1393. <https://doi.org/10.3390/su15021393>

46. Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R. et al. (2021). **Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials.** Nat Sustain 4, 71–79. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0>
47. Dominish, E., Florin, N., Wakefield-Rann, R., (2021). **Reducing new mining for electric vehicle battery metals: responsible sourcing through demand reduction strategies and recycling.** Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney. Disponible en: <https://earthworks.org/resources/recycle-dont-mine/>
48. Moana Simas, Fabian Aponte y Kirsten Wiebe (2022). **The Future is Circular: Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition.** SINTEF Industry. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/3032049>
49. Thea Riofrancos, Alissa Kendall, Kristi K. Dayemo, Matthew Haugen, Kira McDonald, Batul Hassan, Margaret Slattery, and Xan Lillehei (2023). **Achieving Zero Emissions with More Mobility and Less Mining,** Climate and Community Project <http://www.climateandcommunity.org/more-mobility-less-mining>
50. Monitor Deloitte, 2017. **Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050: Recomendaciones para la transición.** Disponible en: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/estrategia/Deloitte-es-strategy-descarbonizacion-transporte.pdf>
51. Gobierno de España (2021). **Real Decreto 265/2021, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifica el Reglamento General de Vehículos, aprobado por el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.** Boletín Oficial del Estado, n. 89, de 14 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-5868>
52. Gobierno de España (2021). **Real Decreto 27/2021 de 19 de enero, por el que se modifican el Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos, y el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.** Boletín Oficial del Estado, n. 17, de 20 de enero de 2021. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-796>

53. Parlamento Europeo y Consejo Europeo (2023). **Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo 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**. Disponible en:  
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-2-2023-INIT/es/pdf>
54. World Bank (2020), **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition**, World Bank, Washington, DC. Disponible en:  
<https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>
55. Liesbet Gregoir y Karel van Acker (2022), **Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge**, Universidad KU Leuven. Disponible en:  
<https://eurometaux.eu/media/rqocjybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>
56. E. Dominish, N. Florin, and S. Teske. **Responsible minerals sourcing for renewable energy**. Technical report, report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney, 2019. Disponible en:  
<https://earthworks.org/resources/responsible-minerals-sourcing-for-renewable-energy/>
57. Parlamento Europeo y Consejo Europeo (2023). **Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo 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**. Disponible en:  
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-2-2023-INIT/es/pdf>
58. Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., Miatto, A., Schandl, H., & Haberl, H. (2017). **Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use**. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(8), 1880–1885.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1613773114>
59. Eurostat (2023). **Material flow accounts [ENV\_AC\_MFA]**. Oficina Europea de Estadística. Disponible en:  
[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_ac\\_mfa/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_mfa/default/table?lang=en)

60. Nedal T. Nassar, Graham W. Lederer, Jamie L. Brainard, Abraham J. Padilla, Joseph D. Lessard (2022). **Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes**. *Environmental Science & Technology* 56 (10), 6710-6721.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07875>
61. [Publicación en proceso] Jorge Torrubia, Alicia Valero, Antonio Valero (2023). **Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition**.
62. Nuss, P.; Eckelman, M.J. (2014). **Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis**. *PLoS One*, 9, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>
63. Liesbet Gregoir y Karel van Acker (2022), **Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge, Universidad KU Leuven**.  
Disponible en:  
<https://eurometaux.eu/media/rqocjybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>
64. USGS (2023). **Mineral Commodity Summaries 2023**. U.S. Geological Survey.  
Disponible en: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>
65. “Energía Comunitaria. El potencial de las comunidades energéticas en el Estado español”. Amigos de la Tierra, 2021.  
<https://www.tierra.org/energia-comunitaria-el-potencial-de-las-comunidades-energeticas-en-el-estado-espanol/>
66. Sonter et al., 2020). , Block, Mollod, 2021 , citados en “Los límites de la minería, actividades extractivas y espacios protegidos en el Estado español”, Amigos de la Tierra, 2023.
67. **DATOS DE INFOGRAFÍAS DE PAGS. 37-40**  
**SOBRE CONTENIDOS DE METALES EN DIFERENTES TECNOLOGÍAS:**  
**Fotovoltaica y eólica:** European Commission, Joint Research Centre, Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., et al., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, Publications Office, 2020,  
<https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>;



**Baterías de turismos y autobuses:** BNEF (2022). Electric Vehicle Outlook 2022. Bloomberg New Energy Finance. Disponible en: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>;

**Resto del vehículo - turismos:** Iglesias-Émbil, M.; Valero, A.; Ortego, A.; Villacampa, M.; Vilaró, J.; Villalba, G. (2020). Raw material use in a battery electric car—A thermodynamic rarity assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* 158, 104820. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104820>;

**Resto del vehículo - autobuses:** Felipe-Andreu J, Valero A, Valero A. (2022). Territorial Inequalities, Ecological and Material Footprints of the Energy Transition: Case Study of the Cantabrian-Mediterranean Bioregion. *Land.* 11(11):1891. <https://doi.org/10.3390/land11111891>







**Amigos de  
la Tierra**

“Somos una asociación ecologista sin ánimo de lucro con la misión de fomentar un cambio local y global hacia una sociedad respetuosa con el medio ambiente, justa y solidaria. Somos un grupo de personas que defendemos la justicia social y ambiental; creemos firmemente que el centro de las políticas han de ser las personas y La Tierra. Así, denunciaremos y presionaremos a empresas y administraciones, a la vez que proponemos diversas soluciones para lograr un mundo más justo”

+ [tierra@tierra.org](mailto:tierra@tierra.org) + [tierra.org](http://tierra.org) + 91 306 99 00