

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

Martín Lallana, Jorge Torrubia, Alicia Valero

Instituto Universitario de Investigación Mixto CIRCE - Universidad de Zaragoza

Julio 2023



o. Contenido

1. Motivación del estudio.....	2
2. Planteamiento, marco de análisis y metodología.....	5
2.1. Metodología de análisis.....	5
2.2. Elección metales analizados.....	6
3. Políticas públicas de la transición verde y digital en España.....	11
3.1. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021 - 2030.....	11
3.2. Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo.....	12
3.3. Hoja de Ruta del Hidrógeno.....	13
3.4. Estrategia de Almacenamiento Energético.....	13
3.5. Plan de desarrollo de la Red de transporte de Energía Eléctrica (2021 – 2026).....	14
3.6. Otras políticas públicas relevantes.....	14
3.7. Resumen de políticas públicas analizadas.....	15
4. Modelo de cálculo, escenarios e hipótesis.....	16
4.1. Hipótesis y escenarios para definir la demanda de metales.....	17
4.2. Hipótesis para definir la recuperación de metales.....	18
4.3. Limitaciones del análisis.....	20
5. Resultados de demanda y recuperación de materias primas.....	22
5.1. Resultados tecnológicos.....	22
5.2. Demanda de metales y recuperación desde reciclaje.....	25
5.4. Requerimientos de extracción primaria.....	31
5.5. Comparaciones con perspectiva de justicia global.....	34
6. Alternativas para reducir la demanda y minimizar la extracción primaria.....	37
6.1. Alargar la vida útil.....	38
6.2. Reciclaje potencial en 2030.....	39
6.3. Limitar tamaño de baterías.....	40
6.4. Segunda vida baterías en almacenamiento.....	42
6.5. Escenario alternativo de movilidad.....	44
6.6. Combinación de todas las alternativas.....	47
7. Impactos generados y evitados.....	52
8. Discusión y comparaciones.....	58
8.1. Comentario sobre los resultados generales.....	58
8.2. Algunas comparaciones de los resultados.....	60
8.3. Discusión sobre movilidad.....	63
9. Conclusiones y recomendaciones.....	67

1. Motivación del estudio

Las crecientes tensiones geopolíticas, el aumento del precio de la energía, la inflación y el estancamiento económico, potenciados por las consecuencias de una pandemia mundial y por la urgencia de medidas para reducir las emisiones de carbono, está haciendo virar ciertos consensos de gobernanza globales. La transición energética y el acceso a las materias primas asociadas a la misma aparecen en el centro de este giro. En un reciente artículo del *Financial Times*¹ se afirmaba que la transición energética no se logrará lo bastante rápido si no se realiza *un gasto deficitario masivo*. Jake Sullivan, Consejero para la Seguridad Nacional de Estados Unidos, señaló que los retos que actualmente afrontan se deben a demasiadas décadas de políticas económicas equivocadas, y que debe revertirse a través de herramientas como una política industrial moderna². Ursula von der Leyen, presidenta de la Comisión Europea, en el discurso del estado de la Unión de 2022³ afirmó que harán todo lo necesario para que la industria del futuro sea «*made in Europe*», aumentando la participación financiera en proyectos de interés común europeo e impulsando la creación de un nuevo *Fondo para la Soberanía Europea*.

Estas declaraciones enmarcan el retorno a la política industrial, la cual puede definirse en base a dos elementos fundamentales: (1) la producción en algunos sectores es más deseable que en otros, y por ello, (2) el gobierno debe hacer un esfuerzo activo para empujar la estructura productiva en esa dirección⁴. En Estados Unidos encontramos paquetes de políticas públicas orientadas a recorrer ese camino, como la «*CHIPS and Science Act*» o la «*Inflation Reduction Act*» (IRA). Esta última ley está dotada de 369.000 millones de dólares, repartidos entre incentivos fiscales para consumidores y empresas, subvenciones y préstamos⁵. A través de ella se descontará 3.750 \$ el precio de compra de un vehículo eléctrico si los minerales críticos de la batería han sido extraídos o procesados en EE.UU, en un país con tratado de libre comercio efectivo con EE.UU. o han sido reciclados en EE.UU. En la Unión Europea, el «*Plan Industrial del Pacto Verde*»⁶ se sustenta sobre tres pilares: la «*Ley Europea de Materias Primas Fundamentales*»⁷, la reforma del diseño del mercado eléctrico y la «*Ley de Industria Cero Neto*»⁸. El objetivo de esta última es el de alcanzar una capacidad de fabricación europea que cubra el 40% de

¹ Derek Brower, Amanda Chu, Myles McCormick (29/06/2023). **The energy transition will be volatile**. Financial Times. Disponible en: <https://www.ft.com/content/86d71297-3f34-48f3-8f3f-28b7e8be03c6>

² Jake Sullivan (27/04/2023). **Remarks by National Security Advisor Jake Sullivan on Renewing American Economic Leadership at the Brookings Institution**. The White House. Disponible en: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/speeches-remarks/2023/04/27/remarks-by-national-security-advisor-jake-sullivan-on-renewing-american-economic-leadership-at-the-brookings-institution/>

³ Ursula von der Leyen (14/09/2022). **Discurso sobre el estado de la Unión de 2022 pronunciado por la presidenta Von der Leyen**. SPEECH/22/5493. Comisión Europea. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/SPEECH_22_5493

⁴ Alessio Terzi, Anil Singh, Monika Sherwood (2022). **Industrial Policy for the 21st Century: Lessons from the Past**. Discussion Paper 157. Comisión Europea. Disponible en: https://economy-finance.ec.europa.eu/publications/industrial-policy-21st-century-lessons-past_en

⁵ 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>

⁶ 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>

⁷ 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>

⁸ Comisión Europea (2023). **Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece un marco de medidas para reforzar el ecosistema europeo de fabricación de productos de tecnologías de cero emisiones netas (Ley sobre la industria de cero emisiones netas)**. COM(2023) 161 final. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0161>

las necesidades anuales de despliegue de tecnologías de descarbonización de aquí a 2030.

En el fondo de la cuestión, este giro de la política industrial de la Unión Europea se encuentra motivado por su posición de dependencia dentro del mercado mundial⁹. Mientras que China dispone de la capacidad para fabricar el 75% de la producción global de baterías, el 58% de los aerogeneradores, el 75% de los paneles fotovoltaicos, el 39% de las bombas de calor y el 41% de los electrolizadores, la UE es importadora neta de tecnologías de descarbonización, con la única excepción de los componentes de turbinas eólicas¹⁰. Alrededor de una cuarta parte de los automóviles y baterías eléctricas, y casi todos los módulos fotovoltaicos solares y pilas de combustible son importados, en su mayoría de China. Esta notable ventaja se debe a que todos los planes quinquenales de China desde 2001 han promovido el avance en la cadena global de suministro y de valor de las tecnologías de descarbonización.

Para reducir esta dependencia, la Unión Europea busca impulsar un tejido industrial propio para la descarbonización y asegurar el suministro de las materias primas requeridas para la fabricación de estas tecnologías. La «*Ley Europea de Materias Primas Fundamentales*» establece una lista de materias primas estratégicas y fija objetivos concretos para 2030: 10% del consumo europeo se cubrirá con la extracción doméstica, un 40% con la transformación y un 15% con el reciclado en la Unión Europea. Al mismo tiempo, establece que nunca más del 65% del consumo anual de la UE de cada materia prima estratégica debería proceder de un tercer país determinado. A esto se le suma una reducción de la carga administrativa y los procedimientos de concesión de permisos para proyectos. Aquellos proyectos considerados como estratégicos podrán acceder a financiación y se beneficiarán de unos plazos de concesión de permisos más cortos: veinticuatro meses para los permisos de extracción y doce meses para los de transformación y reciclado. De esta forma se entrelaza el aumento de la demanda de determinados minerales con la política económica y comercial de la Unión Europea. La *Agencia Internacional de la Energía* afirma que la demanda de minerales para tecnologías de descarbonización se multiplicaría por 4 o por 6 en 2040, según la ambición climática del escenario de transición¹¹. Según sus proyecciones, la inversión futura debería ir destinada a la apertura de 70 nuevas minas de níquel, 30 de cobalto y 80 para cobre¹².

Esto se concreta en España a través de la «*Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales*» elaborada por el *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* (MITERD) en 2022, en la que se reafirma la necesidad de aumentar la actividad de extracción minera doméstica. Tal y como analizamos en la primera parte de este informe¹³, este documento no se basa en ningún estudio específico sobre la

⁹ Alfons Pérez, Bruna Cañada, Marta Pérez y Josep Nualart (2023). **La mina, la fábrica y la tienda. Dinámicas globales de la "transición verde" y sus consecuencias en el "triángulo del litio"**. Observatorio de la Deuda en la Globalización (ODG)

¹⁰ IEA (2023). **Energy Technology Perspectives 2023**. International Energy Agency, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

¹¹ 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>

¹² IEA (2023). **Energy Technology Perspectives 2023**. International Energy Agency, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

¹³ Martín Lallana, Jorge Torrubia, Alicia Valero (2023). **Minerales para la transición energética y digital en España: Estado del arte, revisión de políticas públicas y alternativas**. Informe elaborado por el Instituto Universitario de Investigación Mixto CIRCE - Universidad de Zaragoza, encargado por Amigos de la Tierra España.

demanda de minerales futura de España bajo los actuales planes de transición energética, sino que hace referencia a informes realizados a escala europea y mundial. A pesar de que la *Medida 18* de la hoja de ruta está centrada en analizar la demanda y oferta, presente y futura, de materias primas minerales en España este objetivo todavía no ha sido cubierto. La Real Academia de Ingeniería de España publicó en mayo de 2023 el informe «Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización. El papel de la minería y la metalurgia»¹⁴, en el que se realiza un repaso exhaustivo de técnicas y procesos para una actividad minera y metalúrgica "sostenible y digitalizada". Sin embargo, en este informe tampoco se realiza ninguna estimación de la demanda mineral futura asociada a las actuales políticas públicas.

Esta falta de información detallada sobre la demanda genera incertidumbre acerca del objetivo final de la extracción de determinados minerales, que ya se está impulsando. Esta incertidumbre y preocupación se refuerzan con lo que organizaciones ecologistas como Amigos de la Tierra, OMAL o Ecologistas en Acción han denominado como un *boom minero* en España¹⁵.

Con ánimo de poner orden explicativo sobre estas cuestiones, realizamos este informe sobre las proyecciones de demanda futura de minerales vinculadas a las políticas públicas de la transición energética y digital en España. Incluimos en nuestro estudio la potencial recuperación de metales desde el reciclaje y diferentes alternativas de economía circular y suficiencia. Consideramos que este es un paso necesario para iniciar una discusión amplia sobre los escenarios de transición hacia los que queremos avanzar como sociedad y el uso de recursos materiales asociado a los mismos,

¹⁴ Eloy Álvarez, Francisco Blanco (coord.) (2023). **Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización. El papel de la minería y la metalurgia**. Informe elaborado la Real Academia de Ingeniería de España y la Conferencia de Directores/as de Escuelas de Ingeniería de Minas y Energía (CODEIME). Disponible en: <https://www.raing.es/libro/las-materias-primas-minerales-en-la-transicion-energetica-y-en-la-digitalizacion-el-papel-de-la-mineria-y-la-metalurgia/>

¹⁵ 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>

2. Planteamiento, marco de análisis y metodología

Abordamos esta investigación con cuatro objetivos principales:

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

No nos centramos en la demanda de metales asociada a la actividad económica de la fabricación de tecnologías de descarbonización en España, sino en los requerimientos asociados a las tecnologías que se instalarán en el futuro, independientemente de donde hayan sido fabricadas. A continuación explicamos la metodología de análisis con la que trabajaremos y justificamos la elección de metales incluidos en nuestro estudio.

2.1. Metodología de análisis

Realizamos esta investigación basándonos en los principios del *análisis del flujo de materiales* (MFA, por sus siglas en inglés: *material flow analysis*). Se trata de un método de evaluación sistemática de los flujos y stocks de materiales dentro de un sistema definido en el espacio y el tiempo¹⁶. Los resultados de un MFA se controlan aplicando un simple balance de materiales que compara todas las entradas, stocks y salidas de un proceso. 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 entera¹⁷. Este marco ha sido adoptado por las oficinas estadísticas de la Unión Europea, la OCDE y la UNEP. En el **Anexo metodológico** realizamos una explicación más detallada de las características de un MFA.

En este trabajo aplicaremos un MFA para las siguientes tecnologías vinculadas a la transición energética y digital:

- Tecnologías eólicas de generación de electricidad
- Tecnologías fotovoltaicas de generación de electricidad
- Turismos y autobuses eléctricos
- Electrolizadores para la producción de hidrógeno verde

¹⁶ Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2003). **Practical handbook of material flow analysis**. Lewis Publishers, CRC Press LLC: Boca Raton (EEUU).

¹⁷ 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>

- Baterías para el almacenamiento energético
- Líneas eléctricas, subestaciones y puntos de recarga de vehículos eléctricos
- Aparatos eléctricos y electrónicos

En la mayoría de casos, aplicaremos un MFA dinámico, dirigido por el stock (*stock-driven*), retrospectivo y prospectivo. 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 previsiblemente se pondrán en funcionamiento en el futuro (2023-2050), y que el parámetro que marca el objetivo de instalaciones anuales es el stock de cada año (por ejemplo, la potencia instalada de renovables, o la flota de vehículos). 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. Además, añadimos como fuente de reciclaje los turismos con motor de combustión interna que llegan al final de su vida útil.

Esto nos permite obtener resultados anuales hasta 2050 de los requerimientos minerales para la transición energética y digital en España. Esta metodología también nos permite estimar el impacto que tendría una variación sobre la vida útil de diferentes tecnologías, un cambio en la distribución de subtecnologías, una reducción de la intensidad mineral, un aumento de las tasas de reciclaje o escenarios alternativos de movilidad. También nos permite poner el foco en los requerimientos materiales que se derivan únicamente del mantenimiento de un stock determinado de infraestructuras. En la transición energética no es importante únicamente la fabricación de la primera generación de tecnologías que reemplazarán el entramado fósil, sino también el mantenimiento en el tiempo de las mismas. En todos los ámbitos, el mantenimiento de los stocks resulta especialmente relevante sobre el consumo de materiales. Krausmann y colaboradores determinaron que aproximadamente la mitad de los recursos materiales extraídos anualmente se dedican a construir o renovar el stock de materiales en uso¹⁸.

2.2. Elección metales analizados

Para garantizar la atención y profundidad requerida consideramos necesario acotar el número de metales analizados. Con ese propósito, aplicamos los siguientes tres criterios para seleccionar los metales a incluir en nuestro análisis:

- Importancia en el aumento de concesiones de licencias mineras en España¹⁹
- Centralidad de su demanda en las tecnologías de transición energética y digital
- Consideración como materia prima fundamental o estratégicas por la Unión Europea

¹⁸ 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>

¹⁹ 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>

Realizamos un par de aclaraciones respecto al tercer criterio. La lista de materias primas fundamentales de la Unión Europea empezó a publicarse en 2011 y se actualiza cada tres años²⁰. Esta lista se define en base a dos parámetros: importancia económica y riesgo de suministro. La actualización lista de 2023 incluye 34 materias primas fundamentales. Por otro lado, en la recién aprobada «*Ley Europea de Materias Primas Fundamentales*»²¹ se ha introducido la lista de materias primas estratégicas. La importancia estratégica se determina sobre la centralidad de una materia prima para las transiciones ecológica y digital, así como para las aplicaciones en los ámbitos de la defensa y aeroespacial. Se tienen en cuenta los siguientes tres parámetros: (1) el número de tecnologías estratégicas que utilizan la materia prima como insumo, (2) la cantidad de la materia prima necesaria para la fabricación de las tecnologías estratégicas pertinentes, y (3) la demanda mundial prevista de las tecnologías estratégicas pertinentes. Esta lista incluye 16 materias primas estratégicas.

Guiándonos por estos tres criterios elegimos centrar nuestra investigación en diez grupos de metales: aluminio, cobre, cobalto, litio, manganeso, níquel, oro, plata, PGM (platino y paladio) y tierras raras (disprosidio y neodimio). En el Cuadro 1 mostramos el cumplimiento del criterio de materias primas fundamentales o estratégicas según la clasificación de la Unión Europea y el de licencias mineras en España.

Cuadro 1: Selección de metales analizados según criterios de materias primas fundamentales o estratégicas y licencias mineras en España

Metal	Materias primas fundamentales EU	Materias primas estratégicas EU	Licencias mineras España
Aluminio (Al)	x		
Cobre (Cu)	x	x	x
Cobalto (Co)	x	x	x
Litio (Li)	x	x	x
Manganeso (Mn)	x		x
Níquel (Ni)		x	x
Oro (Au)			x
Plata (Ag)			x
PGM: Platino (Pt) y Paladio (Pd)	x	x	
Tierras raras (REE): Disprosidio (Dy) y Neodimio (Nd)	x	x	x

²⁰ Comisión Europea (2020). **Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad**. COM (2020) 474 final. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0474>

²¹ 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/FN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160>

Basándonos en el estudio prospectivo²² elaborado por el *Centro Común de Investigación* (JRC), que acompaña la publicación de la «*Ley Europea de Materias Primas Fundamentales*», mostramos en el Cuadro 2 las tecnologías estratégicas que utilizan estas materias primas como insumo.

Cuadro 2: Tecnologías estratégicas para la Unión Europea que utilizan los metales seleccionados en este estudio como insumo

Metal	Tecnologías estratégicas que utilizan la materia prima como insumo ²³										
											
Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Co	x	x	x					x		x	x
Li	x							x		x	x
Mn	x	x	x	x			x	x	x	x	x
Ni	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Au			x				x	x	x	x	x
Ag			x			x	x	x	x	x	x
PGM		x	x					x	x	x	x
REE		x	x	x	x		x	x	x	x	x

La importancia, centralidad y criticidad de estos metales en la transición energética no es la misma para todos ellos. Según la clasificación aplicada por la Agencia Internacional de la Energía (AIE)²⁴, el aluminio se considera un material de gran volumen (*bulk material*), obtenido a partir de unas materias primas muy extendidas y abundantes, y para el cual la transición energética no va a suponer un aumento significativo de la demanda total. Por otro lado, según las previsiones de la AIE²⁵, las tecnologías de descarbonización podrían llegar a representar en 2040 el 40% de la demanda de cobre y tierras raras, el 60-70% de la demanda de níquel y cobalto, y hasta el 90% de la demanda de litio.

A lo largo de este informe cuantificamos la demanda total y los requerimientos de extracción primaria para cada uno de estos metales según las políticas públicas de transición energética en España hasta 2050. Para tener una referencia comparativa, en el Cuadro 3 mostramos las cifras de producción anual y reservas de cada uno de estos metales en 2022, así como la distribución geográfica de las mismas.

²² 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, Á., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., 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, <https://dx.doi.org/10.2760/386650>, JRC132889.

²³ Leyenda por orden de aparición: Baterías de ión-litio; pilas de combustible; electrolizadores; turbinas eólicas; motores de tracción; solar fotovoltaica; bombas de calor; redes de transmisión de datos; servidores y almacenamiento de datos, teléfonos inteligentes, tablets y portátiles; robótica.

²⁴ IEA (2023). **Energy Technology Perspectives 2023**. International Energy Agency, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

²⁵ IEA (2021). **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. International Energy Agency, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

Cuadro 3: Producción anual y reservas en 2022 de los metales seleccionados en este estudio junto a su distribución geográfica.

Metal	Producción anual global (2022)	Reservas globales (2022)
Aluminio (Al) ²⁶ (bauxita)	380 Mt Australia (26%) China (24%) Guinea (23%)	31 Gt Guinea (24%) Vietnam (19%) Australia (16%)
Cobre (Cu) ²⁷	22 Mt Chile (24%) Perú (10%) R.D.Congo (10%)	890 Mt Chile (21%) Australia (11%) Perú (9%)
Cobalto (Co) ²⁸	190 kt R.D.Congo (68%) Indonesia (5%) Rusia (5%)	8.300 kt R.D.Congo (48%) Australia (18%) Indonesia (7%)
Litio (Li) ²⁹	130 kt Australia (47%) Chile (30%) China (15%)	26 Mt Chile (36%) Australia (24%) Argentina (10%)
Manganeso (Mn) ³⁰	20 Mt Sudáfrica (36%) Gabón (23%) Australia (17%)	1.700 Mt Sudáfrica (38%) China (16%) Australia (16%)
Níquel (Ni) ³¹	3,3 Mt Indonesia (48%) Filipinas (10%) Rusia (7%)	100 Mt Indonesia (21%) Australia (21%) Brasil (16%)
Oro (Au) ³²	3,1 kt China (11%) Australia (10%) Rusia (10%)	52 kt Australia (16%) Rusia (13%) Sudáfrica (10%)
Plata (Ag) ³³	26 kt México (24%) China (14%) Perú (12%)	550 kt Perú (18%) Australia (17%) China (13%)
PGM ³⁴ : Platino (Pt) y Paladio (Pd)	Pt: 300 t Sudáfrica (74%) Rusia (11%) Zimbabwe (8%) Pd: 210 t Rusia (42%) Sudáfrica (38%) Canadá (7%)	70 Mt Sudáfrica (90%) Rusia (8%) Zimbabwe (2%)
Tierras raras (REE) ³⁵	300 kt China (70%) EEUU (14%) Australia (6%)	130 Gt China (34%) Vietnam (17%) Brasil (16%)

Los datos oficiales sobre la extracción en España se recogen en la «*Estadística Minera Anual*»³⁶ del MITERD. En su edición de 2021 se recogía una extracción anual de 142,4 kt de cobre, 1,4 t de oro y 4,8 t de plata. Según el «*Panorama Minero 2018-20*»³⁷ del *Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*, entre 2012 y 2015 hubo extracción de níquel en España, alcanzando su máximo con 8,7 kt anuales en 2014. En el caso del litio, se produjo extracción del mineral de lepidolita entre 2006 y 2010 en Salamanca, y se conoce la existencia de yacimientos en Salamanca, Cáceres, Badajoz y Pontevedra. A los proyectos actualmente en funcionamiento se le suman otros que actualmente no se encuentran

²⁶ USGS (2023). **Bauxite and Alumina Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/bauxite-and-alumina-statistics-and-information>

²⁷ USGS (2023). **Copper Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/copper-statistics-and-information>

²⁸ USGS (2023). **Cobalt Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cobalt-statistics-and-information>

²⁹ USGS (2023). **Lithium Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>

³⁰ USGS (2023). **Manganese Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/manganese-statistics-and-information>

³¹ USGS (2023). **Nickel Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information>

³² USGS (2023). **Gold Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/gold-statistics-and-information>

³³ USGS (2023). **Silver Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/silver-statistics-and-information>

³⁴ USGS (2023). **Platinum-Group Metals Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/platinum-group-metals-statistics-and-information>

³⁵ USGS (2023). **Rare Earths Statistics and Information**. United States Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information>

³⁶ MITERD (2023). **Estadística Minera Anual 2021**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://energia.gob.es/mineria/Estadística/Paginas/Consulta.aspx>

³⁷ IGME (2022). **Panorama Minero 2018-20**. Instituto Geológico y Minero de España. Disponible en: <https://www.igme.es/PanoramaMinero/PMI.in.htm>

operativos pero que podrían ver acelerados los trámites administrativos en el futuro próximo debido a los cambios legislativos. Enumeramos de forma no exhaustiva algunos de ellos:

- Tierras raras: Proyecto *Matamulas*, operado por la empresa *Quantum* entre Torrenueva y Torre de Juan Abad (Ciudad Real). También existe un proyecto en *Monte Galiñeiro*, entre Vigo y Gondomar (Pontevedra), operado por *Stellantis*.

Litio: Proyecto *San José de Valdeflores*, operado por *Infinity Lithium* en Cáceres. Proyecto *Las Navas* operado por *Lithium Iberia* en Cañaveral (Cáceres). Proyectos *Alberta I* y *Alberta II*, operados por *Strategic Minerals* y *Supreme Metals*, ubicados entre Beariz, Forcarei, Aviión y Cerdedo-Cotobade (Pontevedra).

Níquel: Proyecto *Aguablanca*, operado por *Phi4tech* y ubicado en Monesterio (Badajoz).

Cobalto: La empresa *Nueva Tharsis* está realizando exploraciones en las antiguas minas de San Telmo, La Zarza y Tharsis (Huelva), que pueden presentar contenidos de cobalto.

A esto se le suma también la ampliación de la extracción de cobre, especialmente en Andalucía en la zona de la Faja Piritica Ibérica, con proyectos como el de *Cobre Las Cruces* en Gerena (Sevilla), la ampliación de las instalaciones *Riotinto* (Huelva) o la reapertura de la polémica mina de *Aznalcóllar* (Sevilla), donde se produjo en 1998 la fractura de la balsa de residuos de metales pesados del complejo provocando una catástrofe medioambiental.

3. Políticas públicas de la transición verde y digital en España

Nuestro objetivo es realizar una estimación de la demanda de materias primas asociada a las políticas públicas de transición energética que se están implementando actualmente en España. Para ello, nos basaremos en diferentes documentos, planes estratégicos y hojas de ruta ministeriales que trazan los contornos de dicha transición. A continuación exponemos un breve repaso de los más relevantes.

3.1. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021 - 2030

El «*Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021 - 2030 (PNIEC)*»³⁸ se inscribe en el marco de las políticas energéticas y climáticas de la Unión Europea. Concretamente, en el marco definido por las comunicaciones de la Comisión Europea «*Energía limpia para todos los europeos*»³⁹ y «*Un planeta limpio para todos*»⁴⁰, de 2016 y 2018 respectivamente. Desde su publicación en 2020 se han implementado diferentes políticas a nivel europeo que persiguen acelerar el ritmo de la transición energética. Específicamente, el paquete de medidas «*Objetivo 55*»⁴¹ y el Plan «*REPowerEU*»⁴². Por ese motivo, en junio de 2023 el MITERD publicó el borrador de la actualización del PNIEC 2023-2030⁴³ que modifica los objetivos inicialmente planteados. Esta actualización del PNIEC establece los siguientes objetivos para España en 2030:

- 32% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990, frente al 23% inicialmente planteado
- 48% de renovables sobre el consumo total de energía final, frente al 42% inicialmente planteado
- 44% de mejora de la eficiencia energética, frente al 39,5% inicialmente planteado

En esta actualización del plan nacional se establecen objetivos específicos sobre la ampliación de la potencia de energías renovables y la expansión de los vehículos eléctricos para 2030:

- 62,0 GW de potencia eólica y 76,4 GW de potencia fotovoltaica, frente a los 50,3 GW y 39,2 GW inicialmente planteados
- 5,45 millones de vehículos eléctricos, frente a los 5 millones inicialmente planteados, de los cuáles 3 millones deberían ser turismos eléctricos

³⁸ 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>

³⁹ Comisión Europea (2016). **Energía limpia para todos los europeos, COM (2016) 860 final**. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0860%2801%29&qid=1685432588700>

⁴⁰ Comisión Europea (2018). **Un planeta limpio para todos: La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra, COM (2018) 773 final**. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773&qid=1685433365491>

⁴¹ Consejo Europeo (2023). **Objetivo 55**. Disponible en:

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

⁴² Comisión Europea (2022). **REPowerEU: Una energía asequible, segura y sostenible para Europa**. Disponible en: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es

⁴³ 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>

De esta forma se lograría una reducción del consumo de energía final del 17% entre 2019 y 2030, mientras que la generación eléctrica aumentaría un 31% en el mismo periodo.

3.2. Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo

Continuando en la misma línea, la «*Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP 2050)*»⁴⁴ aprobada por el Consejo de Ministros en noviembre de 2020 describe la ruta con la que se pretende reducir un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en 2050 con respecto a 1990. Se centra en el periodo inmediatamente posterior al analizado por el *PNIEC*, entre 2031 y 2050. Entre sus objetivos para 2050 se recoge un 97% de renovables sobre la energía final, un sector eléctrico 100% renovable y una electrificación de la economía que supera el 50%. El consumo de energía final se reduciría un 32% entre 2020 y 2050, considerando un desacoplamiento entre consumo energético y crecimiento económico (+28% PIB entre 2031 y 2050).

La potencia de renovables instalada aumenta desde los 113 GW en 2030 hasta 225 GW en 2050. La generación eléctrica asciende desde 350 TWh en 2030 hasta 510 TWh en 2050. Una parte importante de dicha electricidad se destina a la generación de combustibles sintéticos e hidrógeno. En términos generales, prácticamente la mitad del consumo energético en 2050 proviene de combustibles renovables⁴⁵ y energías renovables de uso final. Resulta destacable cómo en la *ELP 2050* se considera que el 56% de la energía consumida en el sector transporte provendrá de combustibles renovables en 2050. Las opciones que se consideran para ello pasan por líquidos renovables (origen biológico generados a partir de residuos o de origen no biológico fabricados mediante procesos *Power to Liquid*) y gases renovables (hidrógeno en pila de combustible o biometano, producido a partir de biogás o por metanización de gas de síntesis obtenido de la gasificación de biomasa). Mientras que los combustibles líquidos renovables se consideran relevantes para el transporte pesado de mercancías, la aviación y la navegación, la electrificación se considera una tecnología clave en el sector para vehículos ligeros por carretera y transporte público urbano.

Debido a la incertidumbre que supone, la *ELP 2050* no recoge ninguna caracterización exacta del sistema eléctrico dentro de tres décadas ni una descripción detallada de la flota de vehículos en circulación. Esto supone una limitación a la hora de modelar este escenario de políticas públicas.

⁴⁴ 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>

⁴⁵ Esta categoría incluye biocombustibles tanto líquidos como gaseosos e hidrógeno y otros combustibles sintéticos, "Power to X", donde la X contiene carbono también renovable.

3.3. Hoja de Ruta del Hidrógeno

La «*Hoja de Ruta del Hidrógeno*»⁴⁶ fue presentada por el MITERD en octubre de 2020 y sigue la estela marcada por la «Estrategia Europea del Hidrógeno»⁴⁷, en la que se marcan los siguientes objetivos por fases:

- Primera fase 2020-2024: Instalación de al menos 6 GW de electrolizadores en la UE y la producción de hasta 1 millón de toneladas de hidrógeno renovable.
- Segunda fase 2025-2030: Instalación de al menos 40 GW de electrolizadores para 2030 y la producción de hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable en la UE.
- Tercera fase 2030-2050: Las tecnologías de hidrógeno renovable deberían alcanzar la madurez y desplegarse a gran escala.

En la tercera fase no se dan cifras concretas, aunque se considera que una cuarta parte de la electricidad renovable podría usarse para la producción de hidrógeno renovable en 2050. En base a esto, la hoja de ruta del MITERD realiza una adaptación de dichos objetivos para España. Para 2024 se establece un objetivo de instalación de entre 0,3 y 0,6 GW de electrolizadores, mientras que para 2030 la instalación de electrolizadores ascendería hasta los 4 GW. En el sector del transporte se establece el objetivo de 150 – 200 autobuses y 5.000 – 7.500 vehículos ligeros y pesados para el transporte de mercancías impulsados por pila de combustible de hidrógeno en 2030. De cara a 2050, no se dan cifras concretas, aunque se habla de un despliegue a gran escala.

En el borrador de la actualización del PNIEC 2023-2030 se aumenta el objetivo de potencia de electrolizadores en 2030 hasta los 11 GW.

3.4. Estrategia de Almacenamiento Energético

La «*Estrategia de Almacenamiento Energético*»⁴⁸ presentada en febrero de 2021 por el MITERD establece unos requerimientos mínimos de almacenamiento para España, derivados de los objetivos del PNIEC y la ELP 2050. Se considera necesario pasar de los actuales 8,3 GW de almacenamiento hasta 20 GW en el año 2030 y 30 GW en 2050, que deberán ser aportados por un amplio espectro de tecnologías. Según los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento, se establece la siguiente evolución:

- Almacenamiento estacional: pasa de representar el 76% del almacenamiento en 2020 hasta el 33% en 2050.
- Baterías detrás del contador: pasa de representar el 0% del almacenamiento en 2020 hasta el 4% en 2050.
- Almacenamiento a gran escala diario-semanal: pasa de representar el 24% del almacenamiento en 2020 hasta el 63% en 2050.

⁴⁶ 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

⁴⁷ Comisión Europea (2020). **Una estrategia del hidrógeno para una Europa climáticamente neutra, COM/2020/301 final**. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301>

⁴⁸ 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

Se nombran diferentes tecnologías disponibles para el almacenamiento energético (sistemas de bombeo hidráulico, baterías, almacenamiento de energía térmica) pero no se establece un reparto detallado de su uso en los sistemas de almacenamiento del futuro en España.

En el borrador de la actualización del PNIEC 2023-2030 se aumenta el objetivo de almacenamiento en 2030 hasta los 22 GW.

3.5. Plan de desarrollo de la Red de transporte de Energía Eléctrica (2021 – 2026)

Tal y como hemos visto, las políticas públicas de transición energética consideran un aumento significativo de la generación de electricidad durante las próximas décadas. Esto lleva asociado una ampliación de infraestructuras de distribución y transporte de electricidad. Por ese motivo fijamos nuestra atención en el «*Plan de desarrollo de la Red de transporte de Energía Eléctrica (2021 – 2026)*»⁴⁹ elaborado por el MITERD y Red Eléctrica de España. En este plan se considera el desarrollo de 7.057 km de repotenciones, el cambio de conductor en 300 km de líneas existentes y la planificación de nuevas líneas, con 2.681 km nuevos ejes y 733 km de trazas para cables submarinos.

El documento ofrece una descripción muy detallada de los proyectos planificados hasta 2026. Sin embargo, hasta el momento no existe ningún otro documento que aporte más información sobre desarrollos posteriores a esa fecha.

3.6. Otras políticas públicas relevantes

A estos documentos oficiales se les suman otras piezas de políticas públicas que determinan los escenarios de transición energética para España en las próximas décadas. Sin el propósito de hacer un repaso exhaustivo, a continuación comentamos algunas de ellas.

- «*Ley de cambio climático y transición energética*»:⁵⁰ Establece que en el año 2050 el parque de turismos y vehículos comerciales ligeros en España no deberá generar emisiones directas de CO₂.
- «*Euro 7*»:⁵¹ Establece que los nuevos vehículos ligeros matriculados en la Unión Europea después de 2035 funcionen exclusivamente con combustibles neutros en CO₂.
- «*Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar*»:⁵² Establece el desarrollo de 1 – 3 GW de eólica marina en España en 2030. En el

⁴⁹ 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/REF_Plan_Desarrollo.pdf

⁵⁰ **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

⁵¹ 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>

⁵² 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/>

borrador de la actualización del PNIEC 2023-2030 se establece el objetivo de eólica marina en 2030 en los 3 GW.

3.7. Resumen de políticas públicas analizadas

En el Cuadro 4 presentamos un resumen del contenido de las diferentes políticas públicas con más relevancia para nuestra investigación.

Cuadro 4: Resumen del contenido de diferentes documentos oficiales sobre la transición energética en España

Ámbito	Documento oficial	Contenido
Generación eléctrica renovable	PNIEC 2023 – 2030	62,0 GW eólica y 76,4 GW fotovoltaica en 2030
	ELP 2050	225 GW potencia renovable en 2050
	H.R. Eólica Marina	1 – 3 GW de eólica marina en 2030
Movilidad	PNIEC 2023 – 2030	5,5 millones de vehículos eléctricos en 2030
	Ley 7/2021	Parque de turismos y vehículos comerciales ligeros sin emisiones directas de CO ₂ en 2050
	Euro 7	Vehículos ligeros matriculados a partir de 2035 funcionan con combustibles neutros en CO ₂
Hidrógeno verde	H.R. Hidrógeno	0,3 y 0,6 GW de electrolizadores en 2024, 4 GW de electrolizadores en 2030
	PNIEC 2023 – 2030	11 GW de electrolizadores en 2030
Almacenamiento	E. Almacenamiento	20 GW en el año 2030 y 30 GW en 2050
	PNIEC 2023 – 2030	22 GW en el año 2030
Líneas eléctricas	P.D. Red Eléctrica	7.057 km de repotenciaciones, 2.681 km nuevos ejes hasta 2026

Estos documentos nos permitirán definir algunos de los parámetros clave para determinar los requerimientos minerales de la transición energética en España. Sin embargo, encontramos también numerosas limitaciones e informaciones incompletas que deberemos complementar a partir de hipótesis, estimaciones y otras fuentes, que se detalla en cada apartado.

4. Modelo de cálculo, escenarios e hipótesis

Basándonos en las políticas públicas mencionadas definiremos los escenarios de transición energética sobre los que calcularemos la demanda de metales. Sin embargo, la información ahí contenida no es suficiente para modelar los requerimientos de metales asociados a las tecnologías consideradas desde 2023 hasta 2050. Eso nos obliga a tomar una serie de hipótesis extra a partir de otras fuentes e informes internacionales. En la Figura 1 mostramos un esquema simplificado del modelo de cálculo desarrollado en *Matlab* para esta investigación, diferenciando las fuentes de información, los parámetros exógenos y los endógenos.

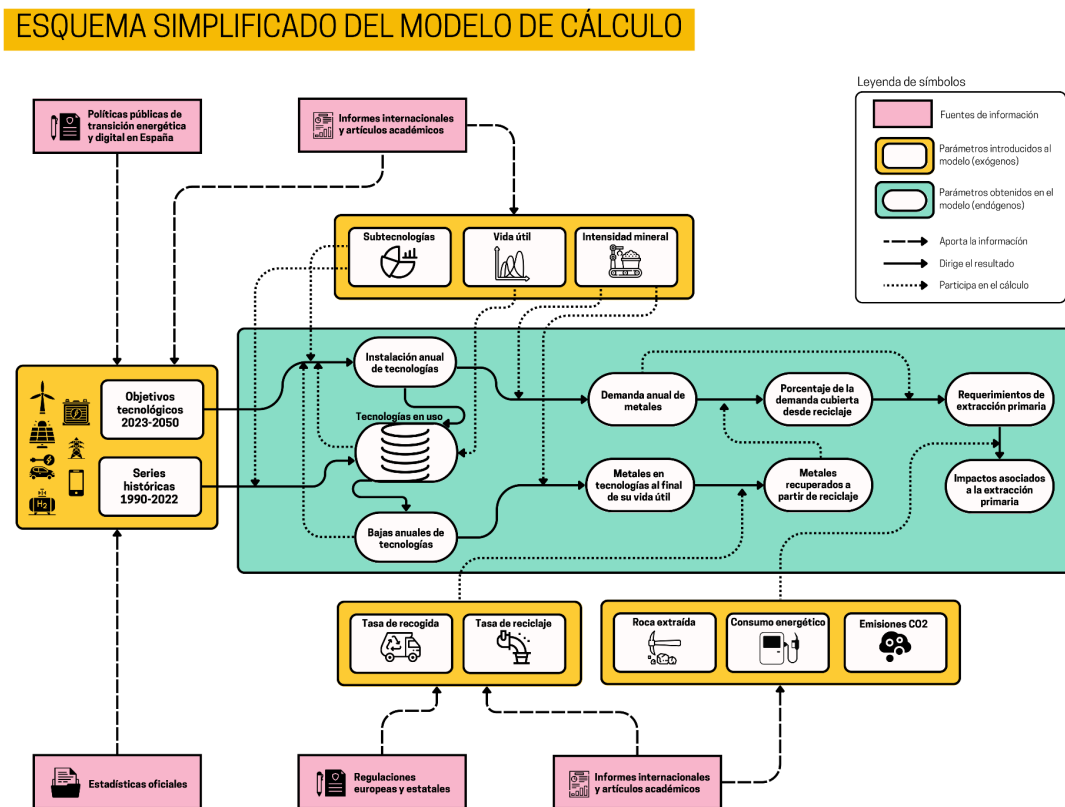


Figura 1. Esquema simplificado del modelo de cálculo

Las estadísticas oficiales definen las series históricas entre 1990 y 2022, lo cual establece la cantidad y características de las tecnologías actualmente en uso. Año a año se compara el objetivo tecnológico con las tecnologías en uso y las bajas, obteniéndose así el parámetro de instalaciones anuales. La distribución de subtecnologías, la vida útil y la intensidad mineral se obtienen de informes internacionales y artículos académicos. A partir de estos parámetros el modelo calcula la demanda anual de metales y la cantidad de metales contenidos en las tecnologías que llegan al final de su vida útil. Determinamos las tasas de recogida y reciclaje anual a partir de regulaciones europeas y estatales junto a informes internacionales y artículos académicos. Aplicando dichas tasas, el modelo obtiene la cantidad de metales recuperados a partir del reciclaje, así como el porcentaje de la demanda cubierta desde el reciclaje de las tecnologías consideradas. La parte restante de la demanda se considera que debería cubrirse a partir de extracción primaria.

Introducimos los parámetros de impacto de la extracción primaria, obtenidos de artículos académicos, de forma que se calcula finalmente el impacto asociado a los requerimientos de extracción primaria del escenario simulado. A continuación realizamos un resumen de las hipótesis asumidas para definir los parámetros de entrada.

4.1. Hipótesis y escenarios para definir la demanda de metales

A partir de la combinación de los documentos oficiales de políticas públicas de transición energética y digital en España con informes internacionales obtenemos los objetivos tecnológicos hasta 2050 que recogemos de forma resumida en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Resumen de los parámetros más relevantes que definen la evolución de las tecnologías estudiadas para los años 2020, 2030 y 2050

Tecnología	2020	2030	2050
Eólica [GW]	27,5	62,0	90,4
Fotovoltaica [GW]	11,7	76,4	110,6
Turismos eléctricos [millones]	0,05	3,3	17,0
Autobuses eléctricos [miles]	0,2	13,0	80,0
Puntos de recarga de vehículos	7.607	3.216.224	0,9 por turismo eléctrico
Electrolizadores [GW]	0,0	11,0	102,9
Baterías para almacenamiento [GWh]	17,6	50,0	76,7
Líneas eléctricas [km/año]	1.472	1.791	2.075
Subestaciones eléctricas [unidades/año]	121	150	187
Aparatos eléctricos y electrónicos	Puestos en el mercado	Tendencias 2016-2021 con variación anual máxima $\pm 2\%$	

Quizás las hipótesis en las que pueda haber mayor discusión son las relativas a la flota de turismos eléctricos y la potencia de electrolizadores en 2050. La primera se basa en algunos de los escenarios del informe «*Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050*»⁵³ elaborado por *Deloitte* en 2017. Mientras que la segunda hipótesis, aplica unas tasas de crecimiento obtenidas del informe «*The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*»⁵⁴, de la Agencia Internacional de la Energía, sobre el objetivo de potencia en 2030 marcado por el borrador de la actualización del PNIEC 2023-2030. Estas son algunas incertidumbres y limitaciones con las que tenemos que trabajar. Junto a estos datos, recopilamos también información sobre los parámetros de distribución de subtecnologías y de vida útil de cada una de las tecnologías analizadas, cuyo resumen mostramos en el Cuadro 6. La vida útil se calcula mediante una distribución probabilística tal y como se describe en el **Anexo metodológico**.

⁵³ 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>

⁵⁴ 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>

Cuadro 6: Resumen de las subtecnologías incluidas y la vida útil considerada para cada una de las tecnologías analizadas

Tecnología	Subtecnologías	Distribución de vida útil
Eólica	Terrestre / Marina 4 tipos de aerogeneradores	20 años
Fotovoltaica	Silicio cristalino / Capa fina 3 subtecnologías de capa fina	20 años
Turismos eléctricos	7 químicas de baterías	10 años
Autobuses eléctricos	7 químicas de baterías	12 años
Puntos de recarga de vehículos eléctricos	3 niveles de puntos de recarga	12 años
Electrolizadores	3 subtecnologías	7-31 años
Baterías para almacenamiento	7 químicas de baterías	15 años
Líneas eléctricas	Líneas aéreas, cable, repotenciones y cable submarino de 66, 132, 220 y 400 kV	40 años
Subestaciones eléctricas	66, 132, 220 y 400 kV	40 años
Aparatos eléctricos y electrónicos	43 categorías	Depende de la categoría

La distribución de subtecnologías varía año a año hasta 2050, representando así el cambio tecnológico esperado. La intensidad mineral define la cantidad de materias primas requeridas para la fabricación de cada una de estas tecnologías, y obtenemos los datos de ella a partir de diferentes fuentes de información. Aplicamos una variación anual sobre la intensidad mineral que da lugar a una reducción a lo largo de las próximas décadas. Esto representa la mejora en los procesos de fabricación debido a las economías de escala. En el **Anexo metodológico** se expone una descripción detallada del proceso que hemos seguido para establecer las hipótesis de cada una de las tecnologías y de las fuentes de información consultadas para ello.

4.2. Hipótesis para definir la recuperación de metales

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. En la legislación europea y estatal se fijan objetivos de recogida para algunas de estas tecnologías. El Real Decreto 265/2021⁵⁵ regula la gestión de los Vehículos al Final de su Vida Útil, el Real Decreto 27/2021⁵⁶ regula los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y el reglamento relativo a las pilas y baterías aprobado por el Parlamento Europeo⁵⁷ establece unos ambiciosos objetivos mínimos de

⁵⁵ 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>

⁵⁶ 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>

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>

recogida. El marco normativo junto a otras fuentes consultadas define las tasas de recogida actuales y potenciales.

Por otro lado, recopilamos diferentes fuentes de información para determinar las tasas de reciclaje actuales y potenciales de cada uno de los metales analizados en cada una de las tecnologías consideradas. Debemos ser conscientes de que la recuperación de un mismo metal desde dos tecnologías diferentes puede implicar un proceso muy diferente. Por ese motivo consideramos una fortaleza abordar esta cuestión diferenciando tanto entre diferentes metales como entre diferentes tecnologías. Nos basamos en informes como «*Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*»⁵⁸ del Banco Mundial, «*Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge*»⁵⁹ de la Universidad KU Leuven o «*Responsible minerals sourcing for renewable energy*»⁶⁰ del Institute for Sustainable Futures de la Universidad de Sídney, así como en múltiples artículos académicos.

En nuestro análisis realizamos un estudio de la recuperación de materias primas desde las mismas tecnologías que impulsan la demanda. Además, añadimos como fuente de reciclaje los turismos de motor de combustión interna que llegan al final de su vida útil.

En el Cuadro **7** exponemos las tasas de recogida y reciclaje actuales y potenciales que hemos establecido para cada una de las tecnologías.

Cuadro **7**: Propuesta propia de tasas de recogida y reciclaje actuales y potenciales para los metales considerados desde diferentes tecnologías

⁵⁸ 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/06171158887536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>

⁵⁹ 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>

⁶⁰ 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/>

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

En el escenario de transición de nuestro estudio aplicamos las tasas de recogida y reciclaje potencial en el año 2050, con una mejora progresiva desde las tasas actuales. La única excepción se encuentra en las baterías, para las cuales aplicamos su tasa de reciclaje potencial en 2030, pues se corresponde con el objetivo marcado por el reglamento de reciclaje de baterías del Parlamento Europeo.

4.3. Limitaciones del análisis

Al tener que trabajar con múltiples hipótesis que provienen de diferentes estudios nos encontramos con algunas limitaciones que condicionan la investigación realizada y los resultados obtenidos. A continuación enumeramos algunas de las más relevantes:

- Ausencia de políticas públicas que definan el escenario de movilidad eléctrica más allá de 2030: La movilidad eléctrica ocupa una posición central en los requerimientos minerales futuros, y el escenario que estamos analizando más allá de 2030 es una estimación propia. Aunque consideramos que nuestra propuesta es coherente, esto puede generar que los resultados obtenidos sean cuestionados.

- Falta de consideración de múltiples tecnologías y sectores que también forman parte de la transición verde y digital: Ámbitos como el transporte de mercancías, el transporte aéreo o marítimo, la infraestructura de compresión, transporte y distribución de hidrógeno, o los centros de datos vinculada a la digitalización han quedado fuera de nuestro análisis. Esto implica que los resultados obtenidos no representan la totalidad de la demanda de metales vinculados a dicha transición.
- Estimaciones entre 2030 y 2050 de la potencia de electrolizadores: Nos encontramos de nuevo con una indefinición de los objetivos sobre la infraestructura del hidrógeno verde más allá de 2030, lo cual nos obliga a considerar hipótesis que pueden no coincidir con el desarrollo que finalmente se siga en España.
- Incapacidad de predecir los aparatos eléctricos y electrónicos del futuro: Los AEE tienen un ciclo de innovación cada vez más corto, y es muy probable que aquellos dispositivos que actualmente están aumentando sus ventas sean desplazados por otros que todavía no existen en el futuro próximo. Al mismo tiempo, tomamos también una composición constante de metales en las categorías de AEE, lo cual de nuevo es una simplificación. Las hipótesis asumidas son la mejor aproximación que podíamos hacer pero somos conscientes de sus grandes limitaciones.
- Aplicación de unas hipótesis de reciclaje ambiciosas: Definir las tasas de reciclaje futuras es una tarea complicada y con gran incertidumbre. Aquí hemos optado por un enfoque ambicioso, aunque somos conscientes de las enormes dificultades existentes que deberían superarse antes de que esas tasas fueran realmente posibles. La recuperación depende en gran parte de los dispositivos tecnológicos concretos que contienen los metales, por lo que aplicar una tasa general es una simplificación considerable.
- Falta de consideración de la demanda del resto de la economía: La demanda de metales asociada a las tecnologías usadas en la transición energética y digital es solo una parte de la demanda total, que representa, en algunos casos, una pequeña proporción. Por ese motivo, no incluir en el análisis el estudio de otros sectores de la economía nos da una imagen parcial que debería complementarse.
- Falta de análisis de otros metales y materiales relevantes: Hemos seleccionado diez grupos de metales según los criterios establecidos, pero eso no quiere decir que sean los únicos relevantes. No estamos considerando metales que ocupan un lugar central en estas tecnologías, y que tienen una influencia importante en los impactos de la extracción primaria, como el hierro y el cemento.

5. Resultados de demanda y recuperación de materias primas

Una vez introducidos todos los parámetros que definen el escenario de transición en nuestro modelo obtenemos los resultados correspondientes. Analizamos los aspectos más relevantes en las siguientes secciones.

5.1. Resultados tecnológicos

En primer lugar, nos detenemos a revisar la evolución de las tecnologías consideradas en el escenario de transición. Tal y como hemos explicado, los datos de entrada del modelo marcan el objetivo de stock en la mayoría de los casos, mientras que el resto de parámetros se calculan internamente.

En la Figura 2 mostramos la evolución de la potencia eólica y fotovoltaica instalada en España hasta 2050. Acompañamos los datos históricos entre 1990 y 2022 con las proyecciones de nuestro análisis a partir de lo marcado por las políticas públicas.

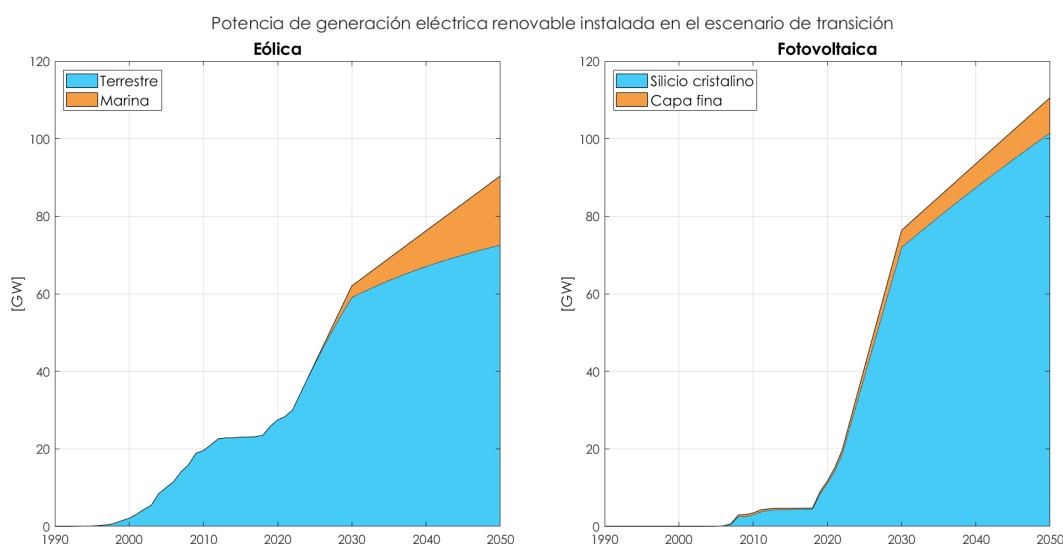


Figura 2: Evolución de la potencia eólica y fotovoltaica instalada en España entre 1990 y 2050, diferenciando entre subtecnologías

Podemos observar cómo la eólica marina llega a representar un 20% de la potencia eólica total en 2050, mientras que las tecnologías fotovoltaicas de capa fina suministran un 8% de la potencia fotovoltaica total en el mismo año. Los dos ritmos diferenciados de crecimiento entre 2022-2030 y 2030-2050 se deben a los objetivos marcados en las políticas públicas de transición energética. El perfil mantendría una mayor coherencia si los objetivos de 2050 se vieran incrementados o si los objetivos para 2030 fueran menos ambiciosos.

En la Figura 3 se muestra la evolución del parque de turismos y autobuses, con motor de combustión interna y eléctricos, entre 1990 y 2050 en España según nuestro escenario de transición.

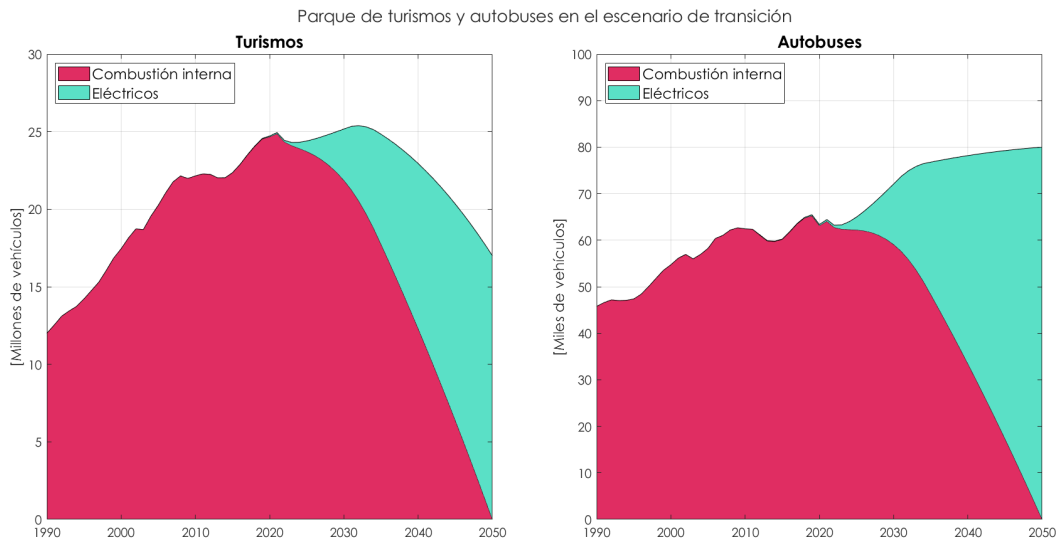


Figura 3: Evolución del parque de turismos y autobuses en España entre 1990 y 2050, diferenciando entre motor de combustión interna y eléctricos

Se visualiza de forma clara el proceso de desmantelamiento de la flota de vehículos de combustión interna y su sustitución por vehículos eléctricos, tal y como indican las actuales políticas públicas al respecto y de acuerdo a algunas de nuestras suposiciones. Como resultado de esta flota de vehículos, observamos en la Figura 4 los requerimientos anuales de nuevas baterías eléctricas, según sus usos en turismos eléctricos, autobuses eléctricos o almacenamiento energético bajo el escenario de transición.

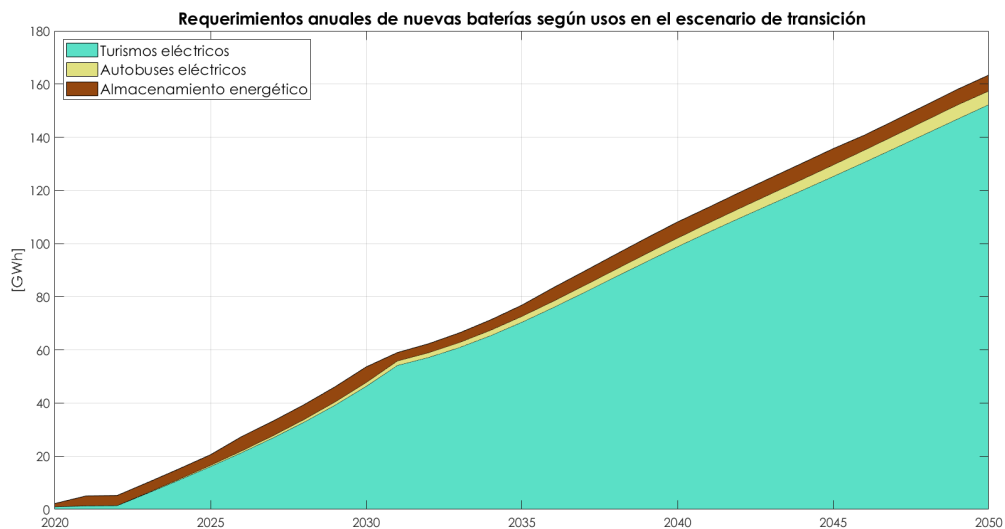


Figura 4: Requerimientos anuales de nuevas baterías eléctricas, según sus usos en turismos eléctricos, autobuses eléctricos y almacenamiento energético

Los turismos eléctricos dominan la práctica 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.

Por último, mostramos en la Figura 5 la evolución de los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado entre 2016 y 2050 en España.

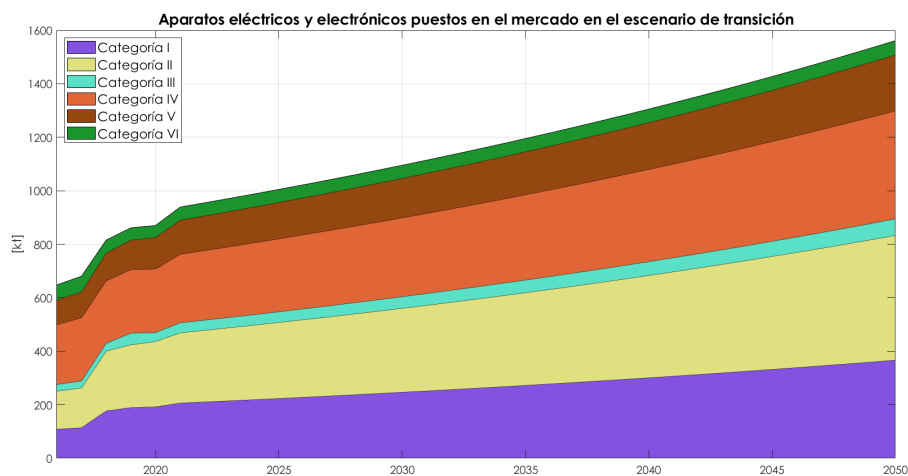


Figura 5. Evolución de los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado en España entre 2016 y 2050, diferenciando según categorías

Aquí se puede comprobar el efecto que tiene la hipótesis aplicada, según la cual hemos mantenido las tendencias de crecimiento observadas entre 2016 y 2021 al mismo tiempo que establecemos una variación anual máxima del $\pm 2,0\%$. Aquí es importante recordar la dificultad de predecir el mercado de los AEE debido a sus rápidos ciclos de innovación y corta vida útil. Así, estos resultados representan una simplificación para hacernos una idea de los metales que podrían aportar los AEE al final de su vida útil a través del reciclado.

Dado que el periodo temporal analizado es superior a la vida útil de muchas de estas tecnologías, en su transcurso deben renovarse aquellos equipos que llegan al fin de su vida útil. En el Cuadro 8 mostramos un resumen de los resultados de instalaciones y bajas acumuladas entre 2020 y 2050 para las tecnologías analizadas bajo el escenario de transición.

Cuadro 8. Resumen de los resultados de instalaciones y bajas acumuladas entre 2020 y 2050 para las diferentes tecnologías consideradas en el modelo bajo el escenario de transición

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

De esta forma comprobamos cómo para 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, debido a las bajas acumuladas a lo largo del periodo analizado. Estas cifras son todavía más acusadas en el caso de los turismos eléctricos, donde para lograr una flota de 17 millones en circulación en 2050 se deben fabricar 34,2 millones entre 2020 y 2050, ya que 17,2 millones llegan al fin de su vida útil en dicho periodo. Esto se debe a la corta vida útil de las baterías de los turismos eléctricos en comparación con la vida útil de un turismo convencional. Observamos también la magnitud de las bajas de los turismos y autobuses con motores de combustión interna, sobre los que forzamos su desaparición en 2050 para cumplir con la legislación. Hasta 2035 se mantienen las matriculaciones de ambos tipos de vehículos de combustión interna, lo cual añade 7,4 millones de turismos y 19,5 mil autobuses a la flota actual. Posteriormente, toda esa flota llega al fin de su vida útil, acumulando las bajas de 31,9 millones de turismos y 87,6 mil autobuses de combustión interna, a pesar de que podría seguir utilizándose si tuviésemos en cuenta su vida útil. En el caso de los aparatos eléctricos y electrónicos vemos cómo a pesar de ser una potencial fuente de recuperación de materias primas secundarias, con 21,9 Mt de bajas acumuladas, esto puede verse contrapesado por una importante demanda de nuevos dispositivos en el mismo periodo (36,9 Mt) debido al corto ciclo de vida de los mismos.

La combinación de los escenarios tecnológicos junto con la intensidad mineral de cada una de las tecnologías y otras consideraciones descritas en el **Anexo metodológico** nos aportan los resultados de la demanda de metales.

5.2. Demanda de metales y recuperación desde reciclaje

A partir de nuestro modelo conocemos la demanda anual de cada metal seleccionado así como la tecnología que la origina. Los resultados obtenidos consideran diversos parámetros dinámicos, como la evolución de la distribución anual de las subtecnologías empleadas o la mejora progresiva en la intensidad mineral. Por otro lado, en secciones previas y en el **Anexo metodológico** hemos descrito las hipótesis que hemos asumido sobre la evolución de las tasas de recogida y reciclaje para cada una de las tecnologías y metales analizados. A partir de la distribución de vida útil de cada una de las tecnologías y estas hipótesis obtenemos a través del modelo los resultados relativos al reciclaje de metales. Estos resultados podrían describirse como la recuperación de metales a partir del reciclaje en "ciclo cerrado" de las tecnologías consideradas, ya que no estamos considerando fuentes alternativas de reciclaje a partir de otros sectores de la economía, que podrían ser importantes contribuidores al reciclado de metales base como el aluminio o el cobre. En el Cuadro 9 se muestran los resultados obtenidos sobre la demanda y recuperación acumulada entre 2020 y 2050 en España para los metales estudiados bajo el escenario de transición.

Cuadro 9: Resultados de demanda y recuperación en España entre 2020 y 2050 para los metales considerados y las tecnologías analizadas bajo el escenario de transición

Demanda total acumulada 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
2,6	7176,3	0,1	4.251,3	166,1	226,2	710,4	822,7	44,8	0,1
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	7582,3	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

En la Figura 6 se representan 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 para el escenario de transición. Los resultados anuales completos se pueden explorar visualmente en la [representación online de los diagramas Sankey dinámicos](#).

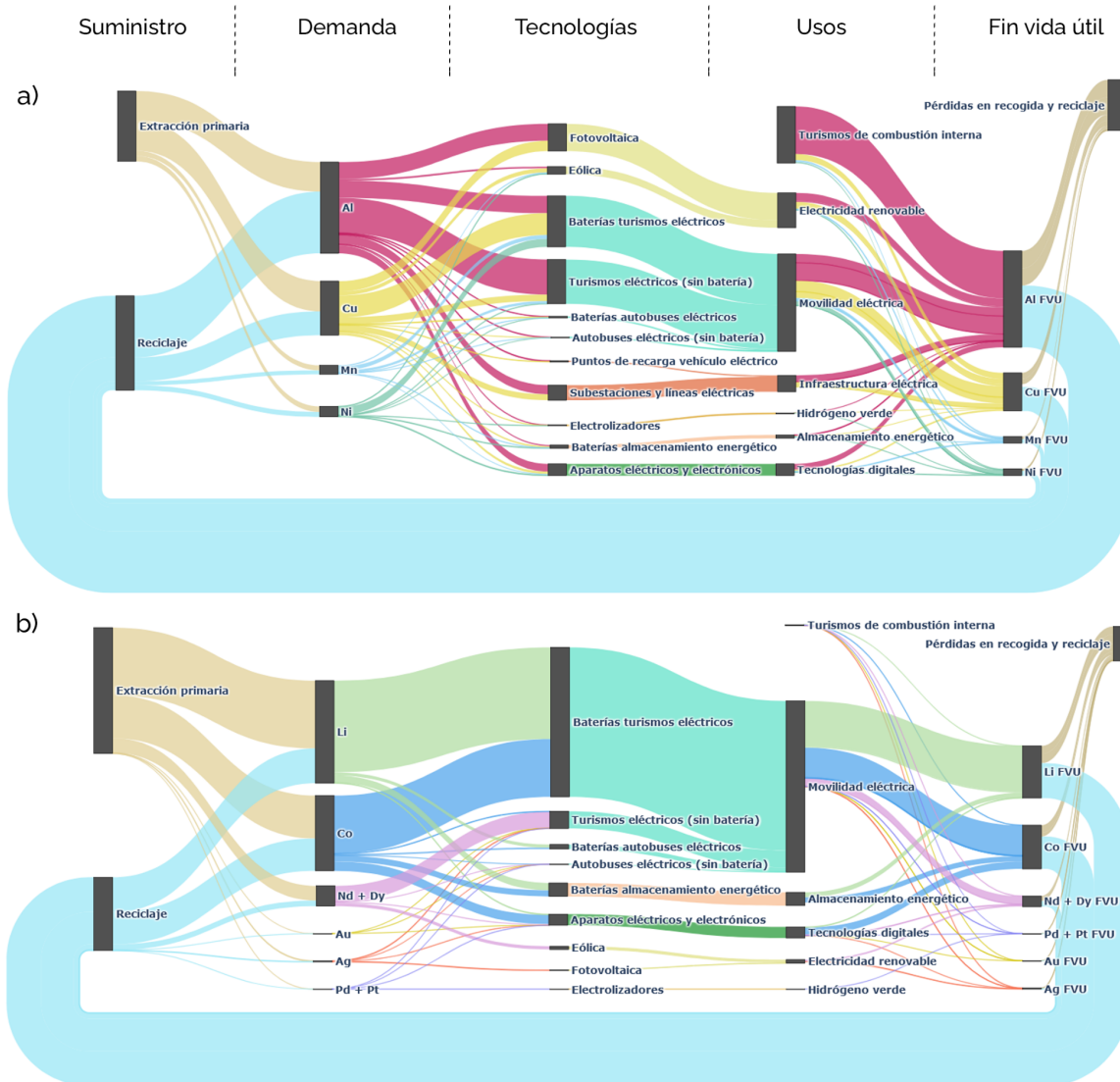


Figura 6. Diagrama de Sankey para aluminio, cobre, manganeso y níquel (a) y para litio, cobalto, tierras raras (Nd + Dy), oro, plata y PGM (Pd + Pt) (b) bajo el escenario de transición (ET). Resultados de demanda y reciclaje acumulados para la transición energética y digital en España entre 2020 y 2050. Se diferencian cinco etapas del ciclo de vida: suministro, demanda, tecnologías, usos y fin de útil. 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. FVU son las siglas de "fin de vida útil".

Así vemos claramente cómo la demanda de todos los metales está dominada principalmente por las tecnologías de movilidad eléctrica. Llama la atención cómo el 79% de la demanda de tierras raras (Dy + Nd) se corresponde a la movilidad eléctrica, mientras que las tecnologías eólicas son responsables únicamente del 16% de la demanda. En el caso del cobre y aluminio, las subestaciones y líneas eléctricas únicamente representan un 10-11% de la demanda, mientras que las baterías de turismos eléctricos son quienes dominan la mayor parte de la demanda.

En la Figura 7 representamos de forma simplificada los mismos resultados de demanda acumulada entre 2020 y 2050 en el escenario de transición. Apreciamos cómo los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado demandan aproximadamente

un 5-12% de la mayoría de metales, y hasta un 35% de la demanda total en el caso del oro. Aquí es importante recordar que la composición de los AEE se ha considerado constante, a pesar de que en el futuro es probable que se reduzca la cantidad de metales preciosos (Au, Ag, Pd o Pt) contenidos en ellos, lo que reduciría su contribución. Vemos también cómo la fabricación de electrolizadores para la producción de hidrógeno verde es el principal impulsor de la demanda de paladio y platino.

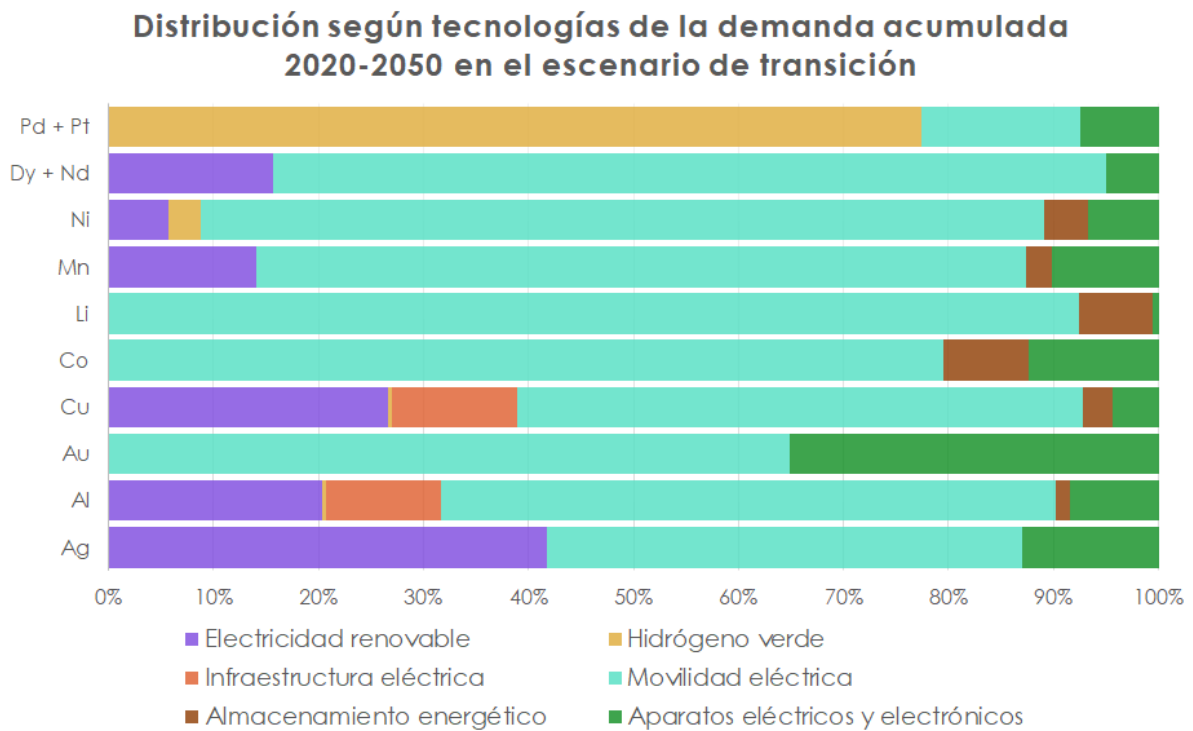


Figura 7: Distribución según tecnologías de la demanda acumulada 2020-2050 en el escenario de transición

En lo respectivo al reciclaje, los resultados muestran cómo la movilidad eléctrica ocupa también una posición central en la recuperación de metales debido a ocupar un lugar central en la demanda y a un ciclo de vida relativamente corto comparado con los vehículos de combustión interna. La recuperación de metales a partir de turismos con motor de combustión interna aporta también una porción significativa de la recuperación total en el caso de metales como el aluminio. En el periodo estudiado, 31,9 millones de estos vehículos llegan al fin de su vida útil debido a las condiciones generadas por las políticas públicas, convirtiéndose en una importante fuente de reciclaje.

En la Figura 8 representamos de forma simplificada los mismos resultados, mostrando la distribución de metales reciclados entre 2020 y 2050 según tecnologías.

Distribución según tecnologías del reciclaje de metales acumulado 2020-2050 en el escenario de transición

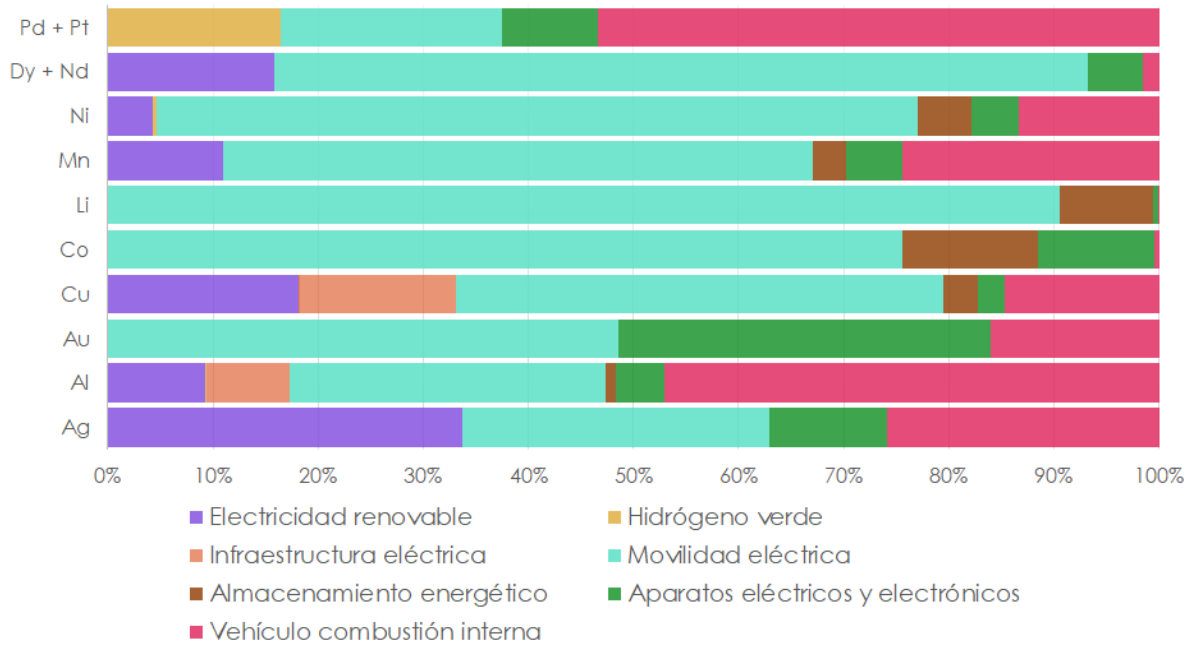


Figura 8: Distribución según tecnologías del reciclaje de metales acumulado 2020-2050 a partir de las tecnologías consideradas

Tanto los aparatos eléctricos y electrónicos como los vehículos de combustión representan una porción muy significativa de la recuperación de determinados metales. Esto se debe, principalmente, al corto ciclo de vida de ambos. En el caso del vehículo al forzar su desaparición en 2050 debido a las políticas en movilidad y en el caso de los AEE a su propio ciclo de vida. Estas dos tecnologías adquieren especial relevancia en el caso del paladio y platino, oro, aluminio y plata, donde juntas representan el 45-68% del reciclaje. Aquí debemos recordar que hemos considerado una composición mineral constante de AEE, la cual se caracteriza por ser tan cambiante como impredecible. Por su parte, el reciclaje de la infraestructura eléctrica aporta el 8% de la recuperación total de aluminio y el 15% de la de cobre.

En la Figura 9 representamos las pérdidas de los procesos de recogida y reciclaje en comparación con la cantidad de metales contenidos en las tecnologías que llegan al final de su vida útil entre 2020 y 2050.

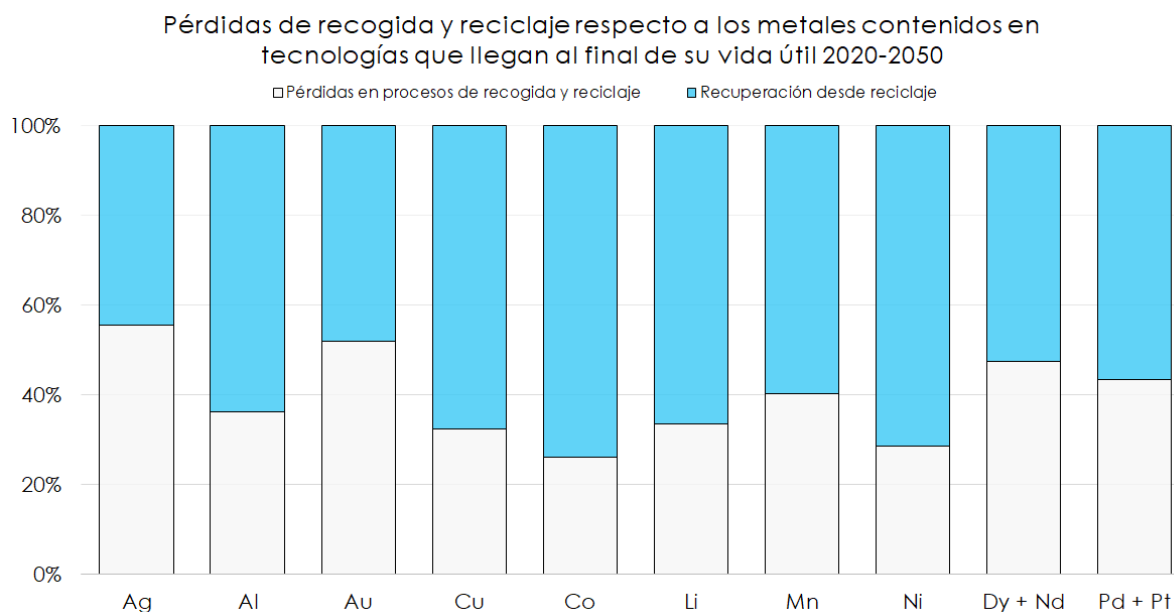


Figura 9: Pérdidas de recogida y reciclaje respecto a los metales contenidos en las tecnologías que llegan al final de su vida útil 2020-2050

De esta forma observamos cómo las pérdidas en los procesos de recogida y reciclaje alcanzan aproximadamente un 25-50% dependiendo de los metales analizados. Aquellos metales en los que las pérdidas son menores se corresponden adecuadamente con aquellos vinculados a la movilidad eléctrica como el cobalto, litio o níquel, debido a las ambiciosas tasas de reciclaje establecidas en el reglamento de baterías del Parlamento Europeo⁶¹. Las mayores pérdidas en recogida y reciclaje las encontramos en el oro y la plata, así como en el disprosio y neodimio, y paladio y platino. Todos ellos están presentes en pequeñas cantidades en los aparatos eléctricos y electrónicos, desde los cuales la recuperación de determinados metales requiere procesos complejos y costosos.

Por último, en la Figura 10 representamos el porcentaje de la demanda asociada a la transición energética y digital en España que podría ser cubierta a partir del reciclaje de las tecnologías consideradas. Mostramos los resultados correspondientes a 2030, a 2050 y los acumulados entre 2020 y 2050.

⁶¹ 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>

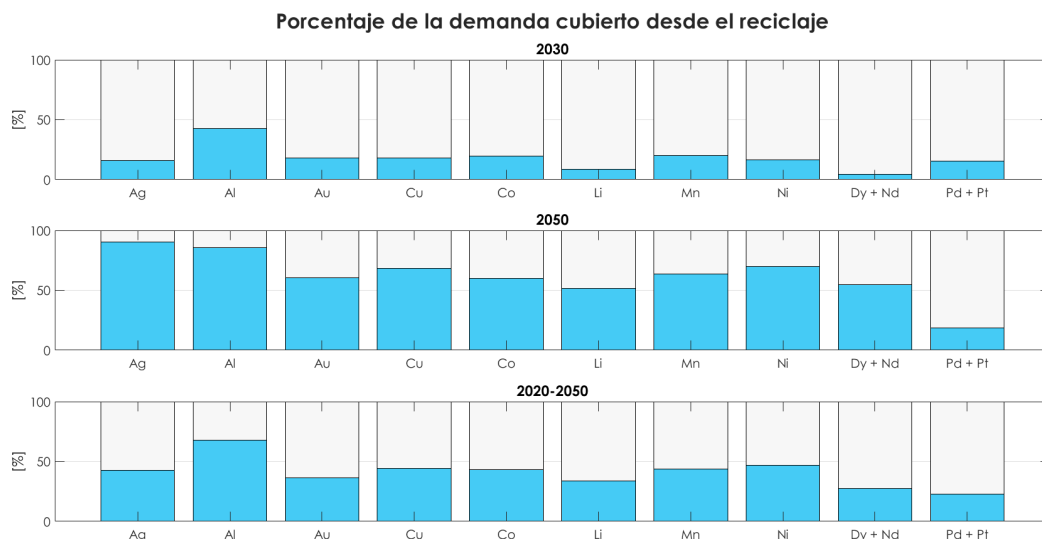


Figura 10. Porcentaje de la demanda asociada a la transición energética y digital en España cubierta desde el reciclaje de las tecnologías consideradas en 2030, 2050 y acumulado 2020-2050

La recuperación de metales tiene el potencial de cubrir más del 50% de la demanda a partir de 2040 para la mayoría de los casos. Sin embargo, en términos totales, el reciclaje acumulado entre 2020 y 2050 cubre menos del 50% de la demanda acumulada en el mismo periodo para todos los metales a excepción del aluminio. Esto se debe a la baja tasa de recogida y reciclado que se presenta en la actualidad. También se observa la ambición de los objetivos de reciclado para 2050. No obstante, este parámetro está muy ligado a la demanda esperada en ese momento. Por ejemplo, en el caso del paladio y platino la demanda sigue en crecimiento debido al uso de electrolizadores, lo que reduce su porcentaje cubierto por reciclado. Por otro lado, debemos recordar que aquí estamos considerando como fuente de reciclaje únicamente las tecnologías analizadas. Sin embargo, en otros casos, como el aluminio o el cobre podemos asegurar que hay muchos otros sectores de la economía que pueden actuar como fuente de reciclaje de metales, lo cual aumentaría el porcentaje de la demanda cubierta desde materias primas secundarias. En el caso de otros metales cuyo uso en la economía actualmente es reducido, los resultados obtenidos sí que se aproximan más a la situación a la que previsiblemente nos enfrentaremos, como es el caso del cobalto o el litio.

Pueden consultarse las gráficas detalladas de la evolución de demanda y reciclaje diferenciando según tecnologías para cada uno de los metales analizados en el **Anexo metodológico**.

5.4. Requerimientos de extracción primaria

Tal y como hemos descrito, los resultados obtenidos nos aportan una estimación de la demanda de metales asociada a algunos aspectos relevantes de la transición energética y digital en España, así como una estimación de la recuperación de metales a partir del reciclaje en "ciclo-cerrado" de esas mismas tecnologías. Juntando ambos resultados podemos obtener una estimación del parámetro que hemos denominado "extracción primaria". Con este nombre nos referimos a aquella parte de la demanda de metales que

no logra ser cubierta a partir de fuentes secundarias de materias primas según las condiciones establecidas por el análisis. Aquí debemos señalar algunas cautelas: los resultados obtenidos deben interpretarse a modo indicativo, considerando las limitaciones del método de cálculo, y el ambicioso aumento de las tasas de reciclado para 2050. En metales que actualmente se usan masivamente en la economía, las potenciales fuentes de reciclaje son muchas más que las aquí consideradas, por lo que los requerimientos de extracción primaria podrían ser menores a los obtenidos. Al mismo tiempo, en caso de no lograrse los ambiciosos objetivos de recogida y reciclaje considerados los requerimientos de extracción primaria serían mayores a los obtenidos.

En el Cuadro **10** se muestran los resultados obtenidos para el parámetro de extracción primaria acumulada en cada uno de los metales analizados. Estimamos los resultados acumulados entre 2020 y 2050, pero también nos interesa conocer los valores máximos de extracción primaria anual.

Cuadro **10**: Resultados de metales contenidos en tecnologías que llegan al final de su vida útil y los de metales reciclados entre 2020 y 2050

Requerimientos de extracción primaria acumulada 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
1,52	2.327,13	0,08	2.372,03	94,75	149,37	398,22	437,84	32,37	0,08
Máximo requerimiento anual de extracción primaria [t] y año en el que se produce									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
119,7	118.420,1	3,4	103.658,5	3.886,0	6.972,7	16.413,1	19.384,5	1.395,9	9,2
2023	2030	2041	2030	2049	2049	2045	2031	2042	2050

Considerando lo que nos ahorramos con el reciclaje, el máximo requerimiento de extracción primaria de cobre se produce en 2030, con 103,6 kt, lo cual representa un 73% de la extracción anual de cobre en España en 2021 (142,4 kt)⁶². En el caso del oro, el máximo requerimiento de extracción primaria se produce en 2041, con 3,4 t, lo cual representa más del doble de la extracción anual en España en 2021 (1,4 t). Por su parte, el máximo requerimiento de extracción primaria de plata se habría producido en 2023, con 119,7 t, que posteriormente se reduciría hasta 71 kt en 2030, 26 kt en 2040 y 10 kt en 2050. Esto se explica por una previsible, rápida y drástica reducción de la intensidad mineral de la plata en las tecnologías fotovoltaicas, unida a un incremento de sus tasas de reciclado.

Para conocer la evolución dinámica de los requerimientos de extracción primaria representamos en la Figura **11** la tasa de crecimiento anual compuesto de este parámetro para cada uno de los metales para las siguientes tres décadas hasta 2050. Excluimos de la representación la tasa de crecimiento anual compuesto del paladio y platino entre 2020-2030 porque en ese periodo los requerimientos de extracción primaria asociadas a las tecnologías analizadas pasan de 0,0 a 2,2 t.

⁶² MITERD (2023). **Estadística Minera Anual 2021**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://energia.gob.es/mineria/Estadistica/Paginas/Consulta.aspx>

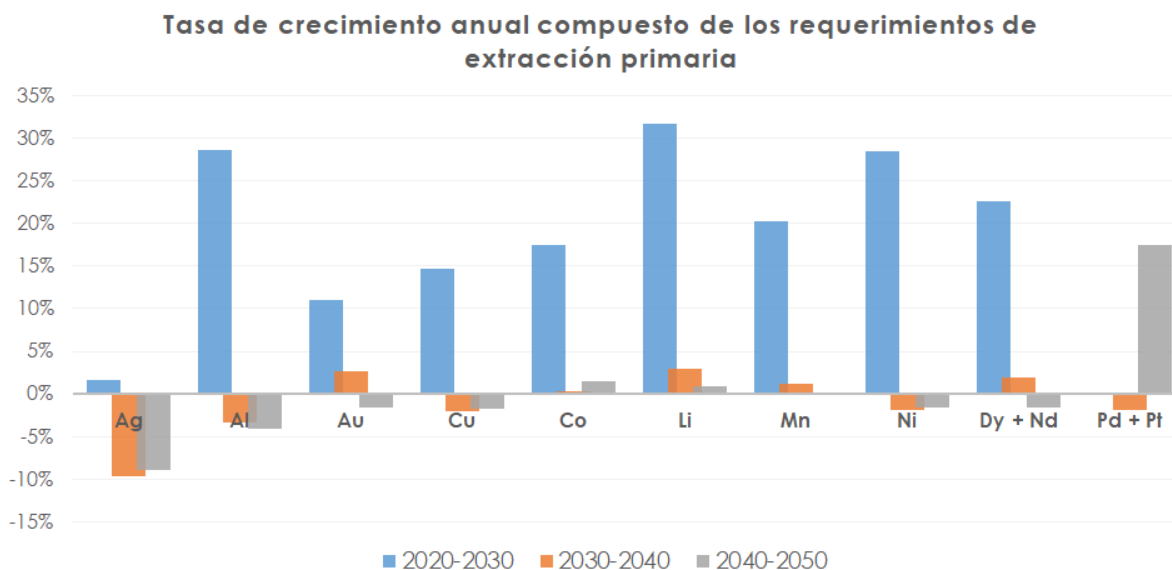


Figura 11: Tasa de crecimiento anual compuesto de los requerimientos de extracción primaria para cada uno de los metales analizados hasta 2050

De esta forma observamos claramente dos periodos diferenciados. Entre 2020 y 2030 se produce un fuerte crecimiento, que llega a alcanzar tasas del 20-30% anual en metales como el manganeso, níquel, litio o disprosio y neodimio. Posteriormente, en la década de 2030-2040 este crecimiento se suaviza por debajo del 5% anual, finalizando en la década de 2040-2050 por debajo del 2% anual, o incluso valores negativos en algunos casos. Los valores negativos implican que los requerimientos anuales se reducen con respecto a años previos, principalmente debido a la recuperación de metales desde el reciclaje. La plata y el paladio y platino son las únicas excepciones que siguen un perfil de crecimiento diferenciado, debido al fuerte desarrollo de la potencia de electrolizadores entre 2040 y 2050. Si consideramos la demanda de metales del resto de la economía, previsiblemente estas tasas de crecimiento fueran más suavizadas en el primer periodo para metales ampliamente utilizados, como el aluminio o el cobre. En otros casos, estas tasas de crecimiento representan adecuadamente el rápido crecimiento de la demanda de metales que actualmente se emplean en cantidades mucho más reducidas.

Para finalizar esta sección, representamos en la Figura 12 una síntesis de los resultados sobre extracción primaria comentados hasta ahora, mostrando la evolución de la demanda diferenciando entre metales obtenidos desde reciclaje y desde extracción primaria entre 2020 y 2050 en el escenario de transición.

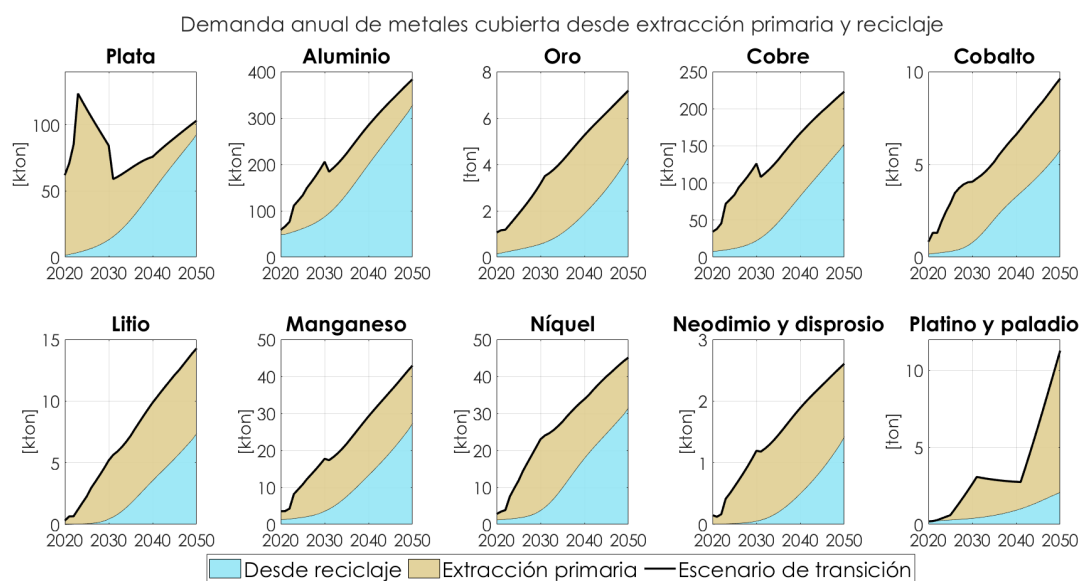


Figura 12: Evolución de la demanda diferenciando entre metales obtenidos desde reciclaje y desde extracción primaria entre 2020 y 2050 en el escenario de transición

Aquí comprobamos cómo a pesar del fuerte incremento del reciclaje, el aumento de la demanda dificulta el desplazamiento de la extracción primaria en la mayoría de los metales analizados. El pico observado en el perfil de demanda de la plata se corresponde con una reducción de la intensidad mineral de las tecnologías fotovoltaicas y un cambio de ritmo en el crecimiento de la potencia fotovoltaica entre 2022-2030 y entre 2030-2050. El pico observado en torno a 2023 en el aluminio, cobre, manganeso, disprosio y neodimio se debe al mismo cambio de ritmo en el crecimiento de la potencia eólica y fotovoltaica. El perfil de la demanda de paladio y platino se debe también a un cambio de ritmo en el crecimiento de la potencia de electrolizadores para la producción de hidrógeno verde entre 2030-2040 y 2040-2050.

5.5. Comparaciones con perspectiva de justicia global

Para concluir la descripción de resultados realizamos una aproximación con perspectiva de justicia global. La fabricación de una parte significativa de las tecnologías asociadas a la transición energética y digital en España tiene asociada la demanda de metales y los requerimientos de extracción primaria que hemos estimado. Las reservas a nivel global de estos metales son ampliamente superiores a los resultados obtenidos. Sin embargo, aquí nos hemos centrado únicamente en una parte de la demanda de España, 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". La población de España representa el 0,6% de la población mundial, por lo que, desde una perspectiva de justicia global y buscando unas hojas de ruta de transición universalizables, la fracción de las reservas minerales que le correspondería de forma equitativa sería el 0,6% de las mundiales. En el Cuadro 11 mostramos la "fracción equitativa" respecto a las reservas globales en 2022 recogidas por las estadísticas oficiales del *Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)*.

Cuadro 11. Cálculo de la "fracción equitativa" de las reservas globales en 2022 para España

"Fracción equitativa" respecto a las reservas globales en 2022 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
550	31.000.000	52	890.000	8.300	26.000	1.700.000	100.000	130.000.000	70.000

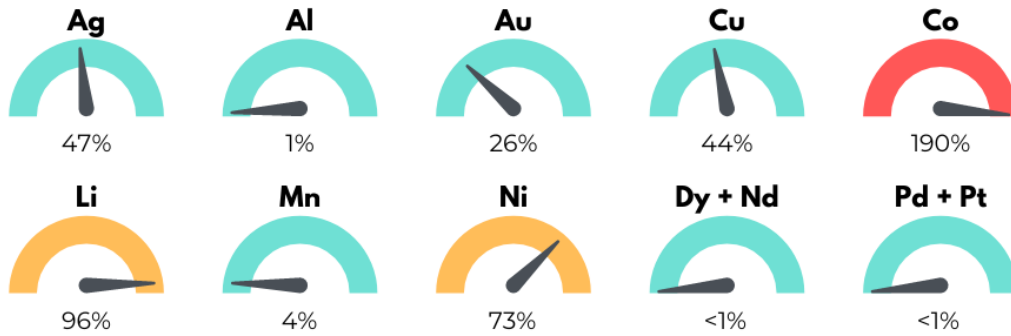
Esta aproximación es una simplificación, y hay diversas cautelas que deben tomarse, destacamos dos importantes. Por un lado, las reservas minerales no son un límite absoluto y fijo, sino que son dinámicas y dependen de múltiples factores económicos y tecnológicos. Un incremento de la demanda de determinados minerales puede impulsar la exploración y descubrimiento de nuevos yacimientos, o aumentar los precios haciendo rentables económicamente yacimientos que se habían descartado en el pasado. En el caso del litio, las reservas se duplicaron entre 2010 y 2022, mientras su producción se multiplicó por 5 en el mismo periodo. En el caso del cobre las reservas han aumentado un 30% en la última década. Por ese motivo, las reservas declaradas en 2022 no son un indicador estable con el que analizar la demanda mineral de las tres décadas posteriores, aunque sí nos aporta un orden de magnitud.

Por otro lado, debemos tener mucha cautela a la hora de hablar de una extracción mineral "equitativa". La minería es una de las actividades económicas con mayores impactos sociales y ambientales del mundo, que afectan especialmente a las comunidades y territorios en los que se realiza la extracción. Por eso, un mero reparto porcentual de las reservas entre países está lejos de resolver estos impactos. Esta cautela es especialmente importante para no caer en un reparto neocolonial de los recursos minerales del planeta.

Teniendo en mente las cautelas expuestas, este parámetro nos permite tener una aproximación a la cantidad de recursos minerales globales que se consumirían únicamente para la transición energética y digital de España. Esto nos ayuda a determinar si los actuales planes de transición representan una profundización de las enormes desigualdades en la apropiación de recursos entre los países del Norte global respecto a los del Sur global⁶³. Representamos en la Figura 13 la comparación entre los requerimientos de extracción primaria acumulados entre 2020 y 2050 respecto a la "fracción equitativa" de las reservas de cada uno de los metales. Representamos tanto los porcentajes obtenidos en el escenario de transición, en el cual se aplican unas ambiciosas tasas de recogida y reciclaje, como los que se obtendrían si se mantuvieran en el futuro las actuales tasas de recogida y reciclaje.

⁶³ Christian Dorninger, Alf Hornborg, David J. Abson, Henrik von Wehrden, Anke Schaffartzik, Stefan Giljum, John-Oliver Engler, Robert L. Feller, Klaus Hubacek, Hanspeter Wieland (2021). **Global patterns of ecologically unequal exchange: Implications for sustainability in the 21st century.** Ecological Economics, 179, 106824. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106824>.

Escenario de transición



Escenario de transición con las tasas de recogida y reciclaje actuales

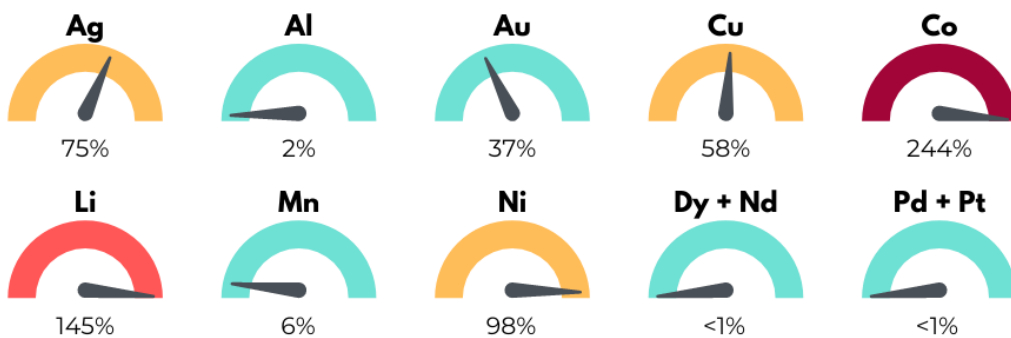


Figura 13: Comparación de los requerimientos de extracción primaria acumulada 2020-2050 respecto a la "fracción equitativa" de las reservas globales de los metales analizados

Estos resultados señalan que la demanda mineral asociada a las tecnologías para la transición energética y digital en España entre 2020 y 2050 superarían la "fracción equitativa" de las reservas globales de cobalto y prácticamente alcanzarían la del litio. Por otro lado, en el caso de no producirse una mejora significativa de las tasas actuales de recogida y reciclaje, los requerimientos de extracción primaria acumulados de litio pasarían a superar la "fracción equitativa", y las de níquel quedarían muy cerca. Además, los requerimientos de extracción primaria de cobalto serían 2,5 veces superiores a la "fracción equitativa".

Esta superación de la "fracción equitativa" puede interpretarse de dos formas, probablemente complementarias. Por un lado, impulsaría la ampliación de la exploración, descubrimiento y apertura de nuevos yacimientos mineros a nivel global. Por otro lado, la transición energética y digital en España acapararía una parte considerable de los recursos minerales globales, manteniendo probablemente las desigualdades internacionales existentes.

Así mismo, debemos recordar que estos resultados únicamente consideran una porción de la demanda general de estos metales, pues no estamos considerando el resto de sectores de la economía, que previsiblemente la aumentarían considerablemente en algunos casos.

6. Alternativas para reducir la demanda y minimizar la extracción primaria

Para concluir nuestro estudio dedicamos este capítulo a analizar distintas alternativas de economía circular y suficiencia para reducir la demanda de metales y minimizar la extracción primaria en el proceso de transición energética y digital en España. Nos basamos en investigaciones previas que han puesto sobre la mesa distintas posibilidades que suavizan el incremento de la demanda.

La investigación «*Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials*», publicada por Baars y colaboradores en 2021⁶⁴, reduce la demanda de cobalto en la movilidad eléctrica de la Unión Europea con medidas como la sustitución tecnológica del contenido de cobalto en las baterías eléctricas a partir de la comercialización de otras tipologías de baterías o promover la reutilización de las baterías eléctricas de vehículos eléctricos que llegan al final de su vida útil en otras aplicaciones menos exigentes. El informe «*Reducing New Mining for Electric Vehicle Battery Metals: Responsible Sourcing Through Demand Reduction Strategies and Recycling*», realizado por Dominish y colaboradores en 2021⁶⁵, plantea cuatro estrategias para reducir la demanda de estos metales en las baterías de los vehículos eléctricos. El informe «*The Future is Circular: Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition*», realizado Simas y colaboradores en 2022 por encargo de WWF⁶⁶, evalúa tres enfoques de economía circular, que se agrupan en: reducción de la demanda, prolongar la vida útil y reciclaje. Por último, el informe «*Achieving Zero Emissions with More Mobility and Less Mining*», publicado por el Climate and Community Project en 2023⁶⁷, establece una serie de escenarios de movilidad que supone un importante cambio modal hacia el transporte público, la bicicleta y los desplazamientos a pie, reduciendo así la propiedad de turismos privados y la dependencia hacia el automóvil.

Una parte importante de estas alternativas están centradas en la movilidad eléctrica, pues tal y como hemos visto es el ámbito que mayor demanda de metales impulsa en el proceso de transición energética.

A partir de los estudios consultados, planteamos el análisis con nuestro modelo las siguientes seis alternativas:

1. Alargar la vida útil de las tecnologías eólicas, fotovoltaicas y de turismos eléctricos
2. Aplicar las tasas de recogida y reciclado potenciales en 2030 en vez de en 2050
3. Limitar el tamaño de las baterías de turismos eléctricos
4. Aplicar un porcentaje de baterías de vehículos eléctricos que llegan al final de su

⁶⁴ 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>

⁶⁵ 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/>

⁶⁶ Moana Simas, Fabian Aponte y Kirsten Wiebe (2022). **The Future is Circular: Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition**. SINTEF Industry. <https://sintefbrage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/3032049>

⁶⁷ 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/>

- vida útil con una segunda vida en el almacenamiento energético
- 5. Escenario alternativo de movilidad con una reducción sustancial del parque de turismos en circulación y aumento drástico de autobuses
- 6. Todas las alternativas combinadas

A continuación describimos algunos de los detalles de cada una de las alternativas y los resultados obtenidos. En el **Anexo metodológico** se puede consultar un resumen de los parámetros exógenos modificados en cada una de las alternativas respecto al escenario de transición.

6.1. Alargar la vida útil

Cuanto menor sea la vida útil de una tecnología mayor será la cantidad de dispositivos que hay que fabricar para mantener el stock en uso requerido. Al alargar la vida útil se logran dos potenciales beneficios: se reduce la cantidad total de tecnologías requeridas y se da un mayor margen al desarrollo de avances que reduzcan la intensidad mineral de materias primas escasas en el futuro. Aquí nos centramos exclusivamente en las tecnologías eólicas, fotovoltaicas y de turismos eléctricos. Aplicamos el incremento de la vida útil descrito en el Cuadro **12**, manteniendo entre 2030 y 2050 el valor alcanzado en cada caso. En el escenario de transición la vida útil de las tecnologías era la de 2020, mientras que en esta alternativa se produce una mejora.

Cuadro **12**: Incremento considerado de la vida útil de las tecnologías eólicas, fotovoltaicas y de turismos eléctricos

Tecnología	Vida útil en 2020 [años]	Vida útil en 2030 [años]
Eólica	20	30
Fotovoltaica	20	30
Turismos eléctricos	10	16

Los resultados obtenidos muestran una reducción de la cantidad de tecnologías que es necesario instalar para mantener el mismo stock que en el escenario de transición. En el Cuadro **13** mostramos las instalaciones y bajas obtenidas, así como su comparación con el escenario de transición.

Cuadro **13**: Resultados de instalaciones y bajas acumuladas entre 2020 y 2050 para tecnologías eólicas, fotovoltaicas y de turismos eléctricos en la alternativa que alarga la vida útil

Tecnología	Instalaciones	Bajas
Eólica [GW]	114,9 (-14 %)	53,2 (- 26%)
Fotovoltaica [GW]	161,4 (- 14%)	60,4 (- 30%)
Turismos eléctricos [millones]	25,7 (- 25%)	8,8 (- 49%)

Observamos cómo aumentando algunos años la vida útil de estas tecnologías se logra reducción significativa de la instalación total en el periodo analizado. Tal y como

mostramos en la Figura 14, esto tiene un impacto claro sobre la demanda, reciclaje y extracción primaria de metales.

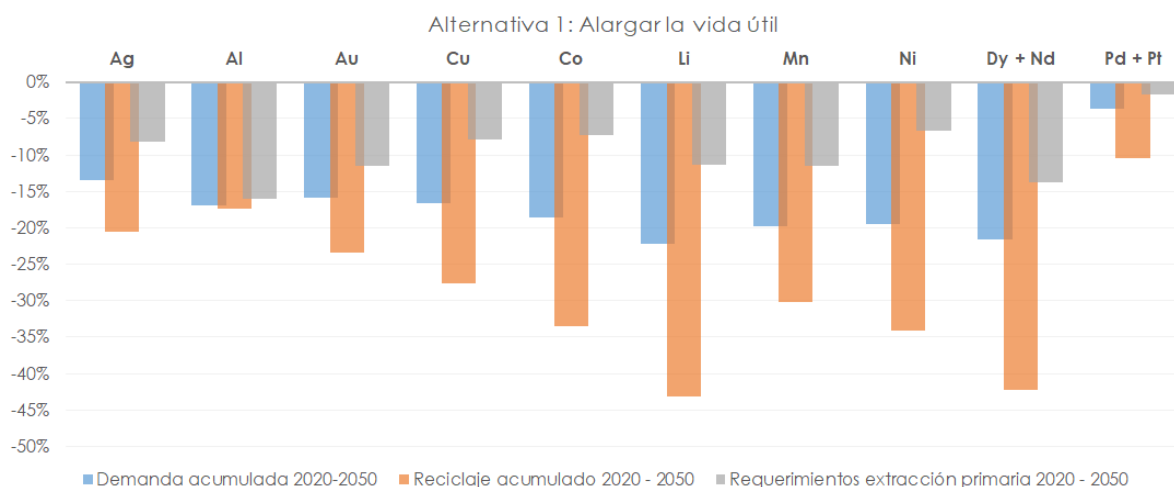


Figura 14. Resultados sobre la variación de la demanda, reciclaje y extracción primaria acumulada 2020-2050 en la alternativa que alarga la vida útil de las tecnologías

Obtenemos una reducción de la demanda del 10-20% en la mayoría de metales, al reducirse las instalaciones. Sin embargo, al reducirse significativamente la cantidad de tecnologías que llegan al final de su vida útil se reduce también la cantidad de metales recuperados desde el reciclaje, en un 15-40%. La reducción del reciclaje más significativa se produce en el litio y en el disprosio y neodimio, ambos fuertemente asociados a una movilidad eléctrica que ha visto reducida en un 49% las bajas de turismos eléctricos. No obstante, aunque estos dos factores se contrapesan el uno al otro, finalmente se produce una reducción de los requerimientos de extracción primaria situado en el umbral del 5-15% para todos los metales analizados. Además, la reducción en el porcentaje de reciclado también permite ahorrar recursos necesarios para la recuperación de metales, que incluyen combustibles fósiles y productos químicos nocivos para el medioambiente.

6.2. Reciclaje potencial en 2030

La segunda alternativa que evaluamos establece una aceleración del desarrollo de la industria del reciclaje en España. Consideramos que las tasas de recogida y reciclaje potencial, que inicialmente habíamos establecido como objetivo para 2050, se aplican en 2030. Esto afecta a todas las tecnologías, a excepción de las baterías eléctricas, en las cuales las tasas de reciclaje potencial ya se habían aplicado en 2030 en el escenario de transición, tal y como establece el reglamento de baterías del Parlamento Europeo.

En la Figura 15 mostramos los resultados obtenidos sobre la demanda, el reciclaje y la extracción primaria en esta alternativa respecto al escenario de transición.

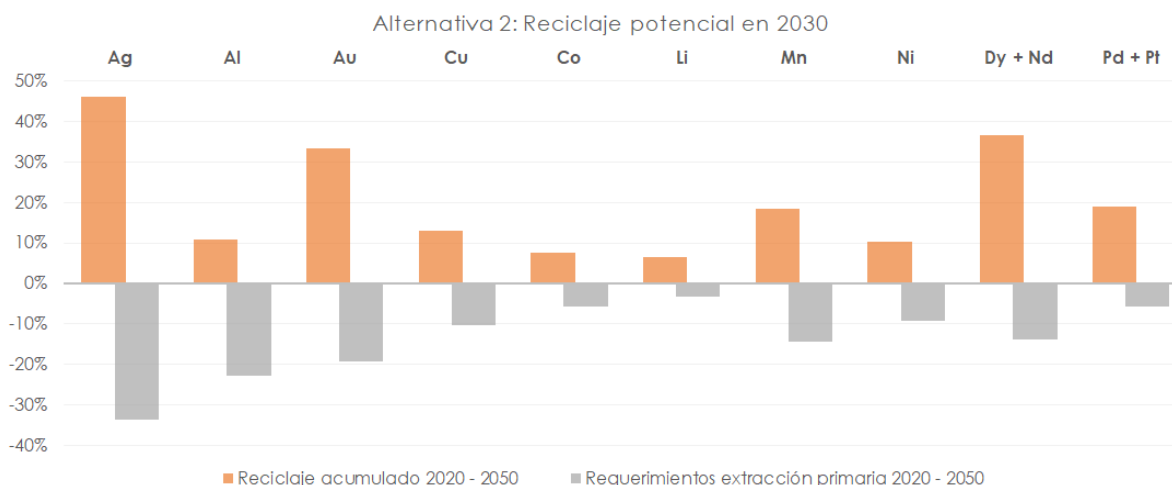


Figura 15: Resultados sobre la variación de la demanda, reciclaje y extracción primaria acumulada 2020-2050 en la alternativa que aplica las tasas de reciclaje potencial en 2030

Como es lógico, aumenta la cantidad de metales recuperados desde el reciclaje entre 2020 y 2050. Los incrementos más significativos se producen en la plata, el oro y el disprosio y neodimio. Esto se relaciona con una mejora del reciclaje de estos metales desde vehículos y aparatos eléctricos y electrónicos al final de su vida útil. Las pérdidas en los procesos de recogida y reciclaje de la plata se reducen un 37%, los del oro un 31% y los del disprosio y neodimio un 41%. Dado que la demanda se mantiene constante, el incremento del reciclaje resulta en una reducción de los requerimientos de extracción primaria, situado en el 5-20% en la mayoría de metales y que asciende hasta un más de un 34% en el caso de la plata.

6.3. Limitar tamaño de baterías

Durante los últimos años los turismos eléctricos han experimentado un crecimiento significativo del tamaño de las baterías. Mientras que en 2015 tenían un tamaño medio de 30 kWh⁶⁸, actualmente su tamaño medio es de 55 kWh⁶⁹, y se prevé un incremento por encima de los 70 kWh. Esto tiene asociado una mayor intensidad mineral, que impulsa la demanda y la extracción primaria de los metales utilizados. Por ese motivo en esta alternativa evaluamos las consecuencias que tendría frenar ese proceso y poner el límite del tamaño de las baterías de turismos en los 55 kWh actuales. En el escenario de transición esa cifra asciende hasta los 70 kWh, siendo probablemente una estimación conservadora a la baja de las tendencias observadas.

En la Figura 16 mostramos los requerimientos anuales de nuevas baterías resultantes de esta alternativa. Mostramos los resultados obtenidos en el escenario de transición para facilitar la comparación.

⁶⁸ IRENA (2017). **Electric Vehicles: technology brief**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Electric_Vehicles_2017.pdf

⁶⁹ IEA (2022). **Global EV Outlook 2022**. International Energy Agency, París. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>

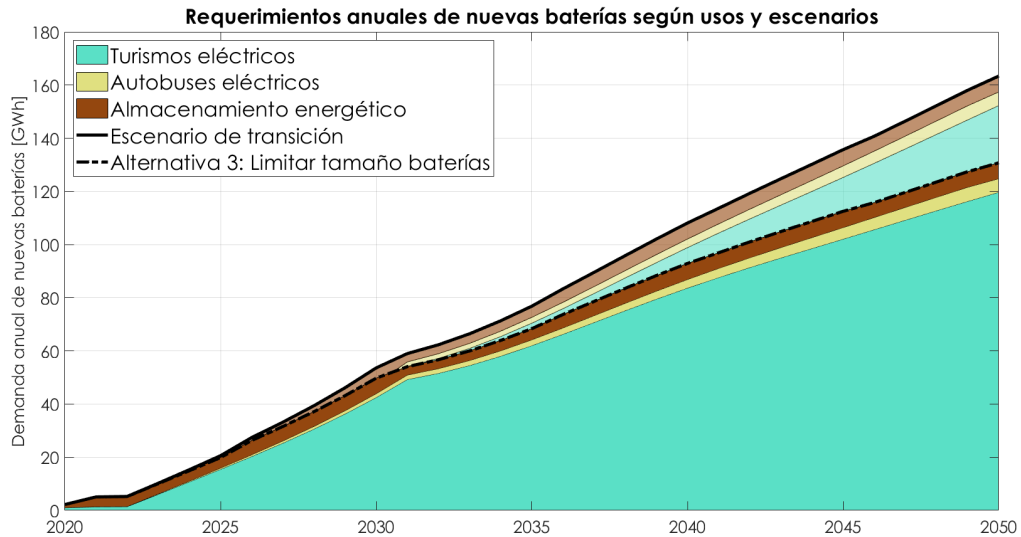


Figura 16: Requerimientos anuales de nuevas baterías eléctricas en la alternativa que limita el tamaño de las baterías de turismos eléctricos

Si en el escenario de transición los requerimientos anuales de nuevas baterías alcanzaban los 53 GWh en 2030, los 108 GWh en 2040 y los 163 GWh en 2050, en esta alternativa esos valores se ven reducidos hasta 50 GWh en 2030, 93 GWh en 2040 y 131 GWh en 2050. Como resultado, obtenemos las variaciones sobre la demanda el reciclaje y la extracción primaria representados en la Figura 17.

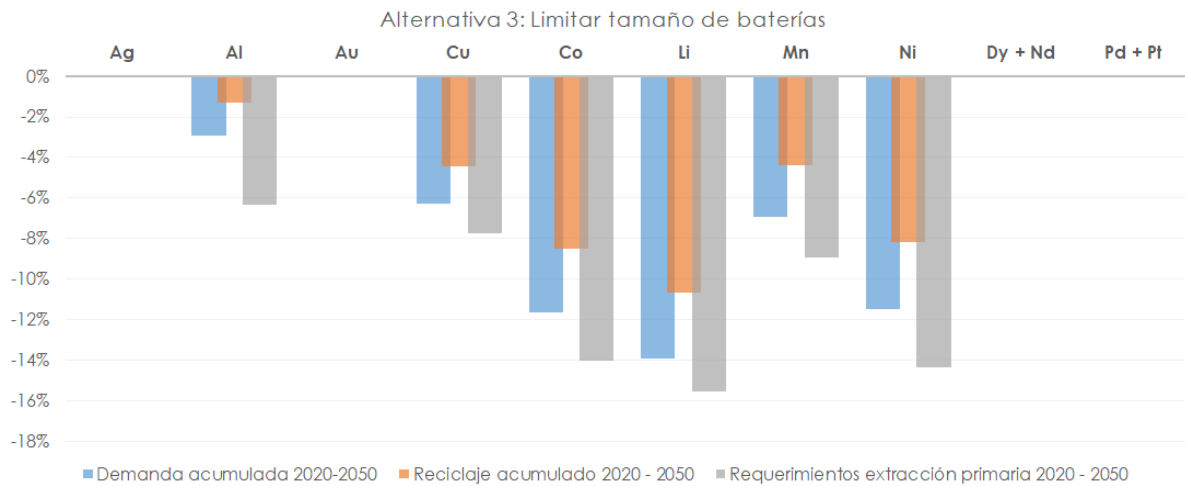


Figura 17: Resultados sobre la variación de la demanda, reciclaje y extracción primaria acumulada 2020-2050 en la alternativa que limita el tamaño de las baterías de turismos eléctricos

Como es lógico, esta alternativa tiene un impacto únicamente sobre aquellos metales contenidos en las baterías de turismos eléctricos. Observamos una reducción de la demanda del 3-14%. La recuperación de metales desde el reciclaje se reduce debido a que las baterías que llegan al final de su vida útil son de menor tamaño y contienen menos metales. Sin embargo, esta reducción no trae consigo un mayor requerimiento de extracción primaria, y además evita el consumo de recursos asociado a los procesos de reciclado. Así, la reducción de la demanda es mucho más significativa en valores

absolutos, resultando en un descenso de los requerimientos de extracción primaria del 6-16% entre 2020 y 2050.

6.4. Segunda vida baterías en almacenamiento

Una medida que aparece repetidamente en la literatura académica es la de aprovechar las baterías de turismos eléctricos que llegan al final de su vida útil para los requerimientos de almacenamiento energético del sistema eléctrico, dándoles así una segunda vida. Dado que en nuestro modelo hemos incluido ambos tipos de tecnologías podemos evaluar el impacto que tendría destinar distintos porcentajes de dichas baterías, sustituyendo así la necesidad de fabricar una parte de las nuevas baterías para los usos de almacenamiento.

Establecemos una pérdida del 20% de la capacidad de almacenamiento durante la utilización de la batería en la movilidad eléctrica. De esta forma, consideramos como constante el 80% restante de la capacidad de la batería en su nuevo uso. Como simplificación, aplicamos a estas baterías en su segunda vida la misma distribución de vida útil que la considerada para las nuevas baterías empleadas en almacenamiento energético, con una vida útil de 15 años. Al final de su segunda vida estas baterías se someten a los procesos de recogida y reciclaje con las tasas establecidas para el año correspondiente.

En el modelo fijamos el porcentaje de baterías de turismos eléctricos que están disponibles para una segunda vida en el almacenamiento energético. Este porcentaje se aplica sobre las baterías que llegan a los canales oficiales de recogida. Posteriormente, la capacidad restante de estas baterías se compara con la capacidad de baterías requeridas para el almacenamiento energético. El uso de baterías en su segunda vida tiene prioridad, así únicamente se demanda la fabricación de nuevas baterías cuando los requerimientos de capacidad son superiores a la capacidad que aportan las baterías en su segunda vida. Sin embargo, si la capacidad que aportan las baterías en su segunda vida es superior a los requerimientos de almacenamiento, la parte sobrante de baterías disponibles se destina al reciclaje.

Analizamos cinco casos para esta alternativa, con diferentes porcentajes de baterías de turismos eléctricos destinadas a segundas vidas: 5, 15, 25, 35 y 50%. En la Figura **18** representamos el porcentaje de la demanda anual de baterías para almacenamiento energético que se logra cubrir con segundas vidas de baterías de turismos eléctricos en cada uno de los casos planteados.

Porcentaje de la demanda anual de almacenamiento energético cubierta desde segundas vidas de baterías de turismos eléctricos

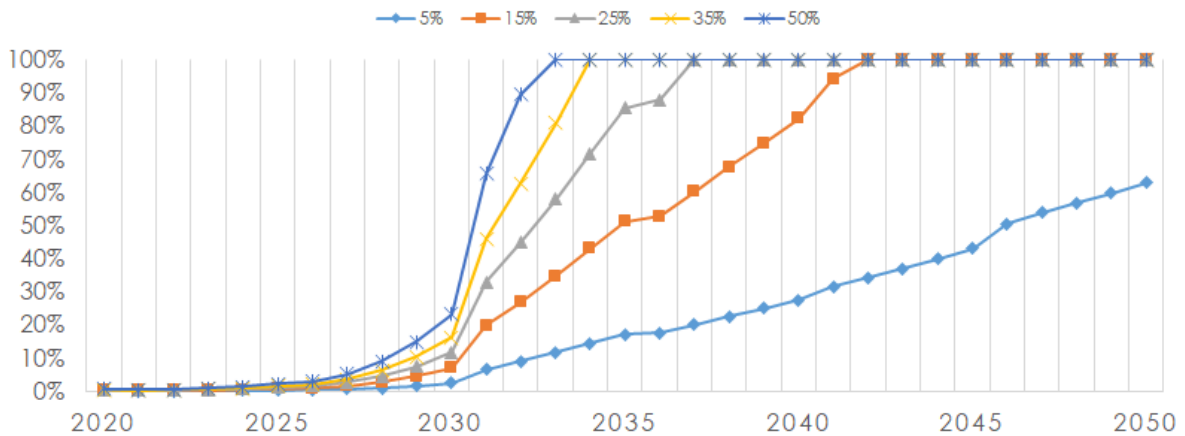


Figura 18: Porcentaje de la demanda anual de baterías para almacenamiento energético cubierta desde segundas vidas de baterías de turismos eléctricos

En los casos con un mayor porcentaje de baterías destinadas a segundas vidas (los casos del 35% y 50%) se cubre el conjunto de la demanda del almacenamiento antes de 2035. Aquí se observa claramente un fenómeno de "saturación", donde las baterías destinadas a segundas vidas rápidamente superan los requerimientos de capacidad para el almacenamiento. Esto lo podemos comprobar mejor en el Cuadro 14, donde se muestran el porcentaje de baterías que finalmente se aprovecha en segundas vidas y la demanda de baterías para el almacenamiento cubierto desde segundas vidas en el periodo completo 2020-2050, según los diferentes casos.

Cuadro 14: Porcentaje de baterías que finalmente se aprovecha en segundas vidas y porcentaje de la demanda de baterías para el almacenamiento cubierto desde segundas vidas en el periodo completo 2020-2050 según diferentes casos

Porcentaje de baterías disponible para segunda vida [%]	Baterías finalmente aprovechadas para segunda vida [%]	Demanda baterías almacenamiento cubierto desde segunda vida [%]
5	5,0	23,7
15	13,8	55,6
25	20,1	64,5
35	25,2	67,7
50	31,7	69,8

Observamos cómo a partir del objetivo de 15% de baterías de turismos eléctricos recogidas destinadas a segundas vidas superamos la cantidad que el almacenamiento realmente puede absorber, de forma que el modelo redirige las baterías sobrantes al reciclaje. Entre el 5 y 25% hay una rápida mejora en el porcentaje de demanda acumulado en almacenamiento cubierto desde segundas vidas de baterías, pero posteriormente con el 35-50% esa mejora se satura ya que los requerimientos anuales de almacenamiento no pueden absorber más baterías provenientes de segundas vidas. Esto nos lleva a considerar el caso del 25% de baterías disponibles para segundas vidas como el caso óptimo, sobre el que obtendremos el resto de resultados.

En la Figura 19 mostramos los resultados obtenidos sobre la demanda, el reciclaje y la extracción primaria en el caso de destinar un 25% de las baterías de turismos eléctricos que llegan al final de su vida útil y son recogidos a segundas vidas como almacenamiento energético.

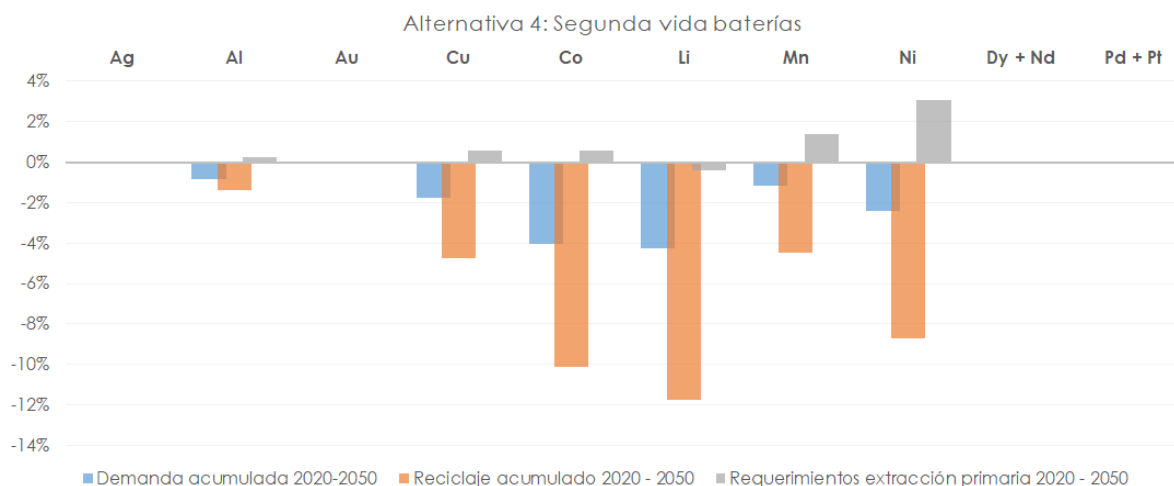


Figura 19: Resultados sobre la variación de la demanda, reciclaje y extracción primaria acumulada 2020-2050 en la alternativa que destina un 25% de baterías de turismos al final de su vida útil a segundas vidas en almacenamiento energético

Aquí observamos una reducción del 4-12% del reciclaje de los metales contenidos en las baterías eléctricas, acompañado de una leve disminución del 1-4% de la demanda de los mismos. En este caso, el contrapeso de ambos factores resulta en un incremento de los requerimientos de extracción primaria del 1-4% en comparación con el escenario de transición. Esto se debe a un desplazamiento temporal del reciclaje de una parte significativa de las baterías empleadas por turismos eléctricos. Al producirse el reciclaje de estas baterías más tarde en el tiempo, mientras que se recorre un periodo de fuerte incremento de la demanda de estos metales, se reduce el porcentaje de la demanda cubierto desde el reciclaje aumentando así los requerimientos de extracción primaria. Si analizáramos esta alternativa en un periodo posterior a 2050 en el que la demanda no experimentara un crecimiento tan rápido, es probable que resultara en una reducción de los requerimientos de extracción primaria.

6.5. Escenario alternativo de movilidad

Tal y como hemos comprobado en los resultados generales obtenidos, el mayor impulsor de la demanda de los metales analizados durante la transición energética y digital es la movilidad eléctrica. En gran parte, esto se debe a que la transición energética se aborda como un desafío de sustitución de unas tecnologías por otras sin cuestionar el uso y la dependencia generada por dichas tecnologías y su impacto en la sociedad. Anticipar la magnitud y la composición de la flota de vehículos del futuro es prácticamente imposible. Sin embargo, muchas veces las proyecciones realizadas tienen un doble carácter, analítico y performativo, estudiando qué pasaría en ese caso pero también planteando sus escenarios como única alternativa posible.

Por eso nos parece muy importante considerar escenarios alternativos de movilidad que impliquen una reducción sustancial del parque de turismo en circulación. Esta vía ha sido explorada por *Climate and Community Project*⁷⁰ a nivel de Estados Unidos, y por el *Grupo de Economía Ecológica y Dinámica de Sistemas* (GEEDS) de la Universidad de Valladolid⁷¹ a nivel global, obteniendo como resultado una reducción muy significativa de la demanda mineral. Sin analizar el impacto sobre la demanda mineral, Brand y colaboradores⁷² modelaron para el caso de Reino Unido diferentes transformaciones que lograrían reducir un 52% las distancias recorridas en vehículo privado, aumentar un 85% las distancias recorridas en autobús y lograr que las distancias recorridas en bicicleta pasen de representar el 1% del total hasta el 8%. Esto ocurriría mientras se divide entre 3 el número de vehículos individuales y se multiplica por 4 el número de autobuses. Por último, en el informe «*Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050*» elaborado por *Deloitte* en 2017⁷³ incluye un escenario de "Movilidad autónoma y compartida" en el que el parque de turismos se reduce hasta los 9-10 millones en 2050. En este escenario se considera que el 50% de la movilidad de pasajeros se realiza en un coche compartido, el 36% en coche particular y el 14% en transporte público.

A partir de todo lo anterior, definimos de forma simplificada nuestro escenario alternativo de movilidad para España. En el Cuadro **15** mostramos los parámetros que definen el escenario de movilidad y lo diferencian del escenario de transición.

Cuadro **15**. Parámetros que definen el escenario alternativo de movilidad analizado

Flota de turismos eléctricos [millones]	2030	3,3
	2050	9,0
Flota de autobuses eléctricos [miles]	2030	13
	2050	250

En este escenario pasaríamos desde la actual flota de 25,2 millones de turismos hasta los 9 millones de turismos en 2050, el 100% de ellos eléctricos. Al mismo tiempo, pasaríamos desde la actual flota 65,4 mil autobuses, en su mayoría de combustión interna, hasta 250 mil autobuses en 2050, el 100% de ellos eléctricos. Esto se encuentra en consonancia con las transformaciones planteadas por Brand y colaboradores para Reino Unido, así como con el escenario de movilidad autónoma y compartida de *Deloitte*. En la Figura **20** mostramos la evolución resultante del parque de turismos y autobuses bajo el escenario alternativo de movilidad establecido.

⁷⁰ 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/>]

⁷¹ Pulido-Sánchez, D., Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Frechoso, F. (2022). **Material and energy requirements of transport electrification**. *Energy & Environmental Science*, 15(12), 4872-4910. <https://doi.org/10.1039/D2EE00802E>

⁷² Brand, C., Anable, J., & Morton, C. (2019). **Lifestyle, efficiency and limits: modelling transport energy and emissions using a socio-technical approach**. *Energy Efficiency*, 12(1), 187-207. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9678-9>

⁷³ 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>

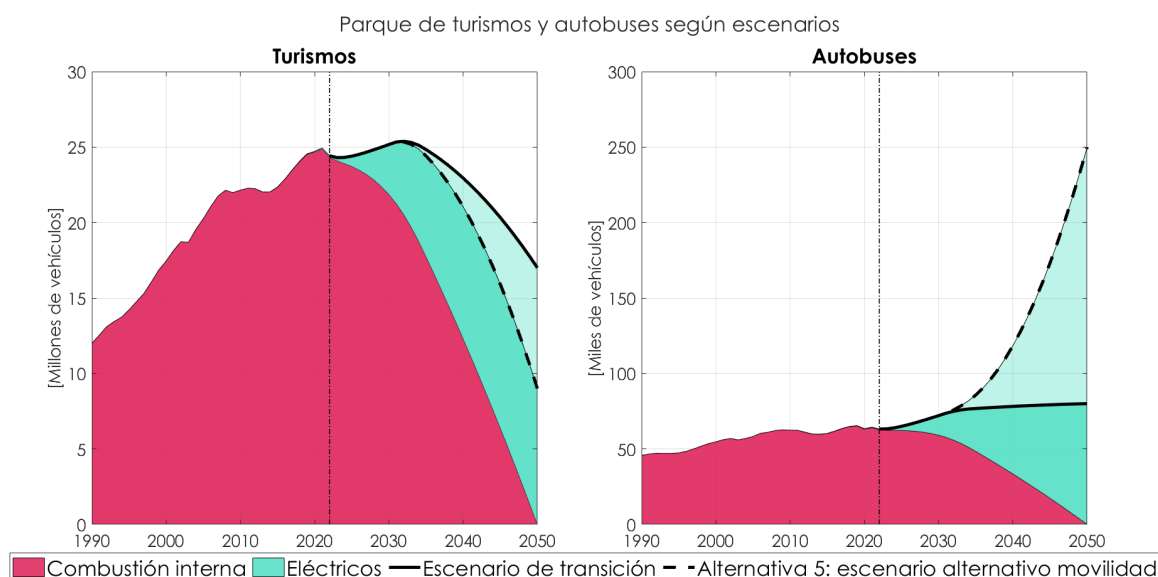


Figura 20: Evolución del parque de turismos y autobuses en España entre 1990 y 2050 bajo el escenario alternativo de movilidad, diferenciando entre motor de combustión interna y eléctricos

Bajo este escenario, entre 2020 y 2050 se matricularían 23,4 millones de turismos eléctricos y 346,4 mil autobuses eléctricos. Esto supone una reducción del 32% de los turismos y un aumento del 157% de los autobuses matriculados, en comparación con el escenario de transición. En la Figura 21 mostramos los requerimientos anuales de nuevas baterías obtenidos para este escenario. Mostramos los resultados de escenarios anteriores para facilitar la comparación.

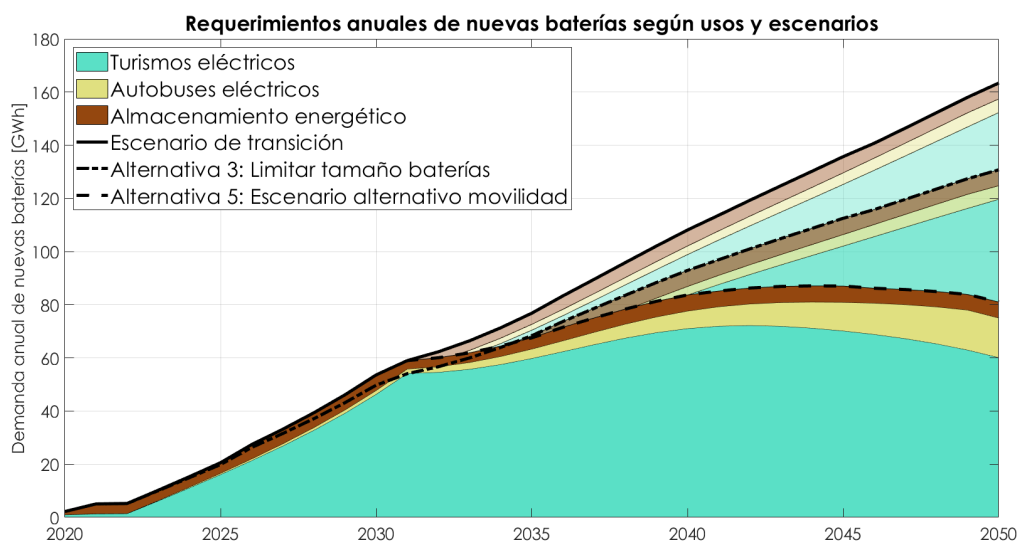


Figura 21: Requerimientos anuales de nuevas baterías eléctricas bajo el escenario alternativo de movilidad, según sus usos en turismos eléctricos, autobuses eléctricos y almacenamiento energético

Mientras que en el escenario de transición los requerimientos anuales de nuevas baterías alcanzaban los 53 GWh en 2030, los 108 GWh en 2040 y los 163 GWh en 2050, bajo el escenario alternativo de movilidad estos valores se ven reducidos hasta 53 GWh en 2030, 85 GWh en 2040 y 85 GWh en 2050.

En la Figura 22 mostramos los resultados sobre la variación de demanda, reciclaje y extracción primaria obtenidos para el escenario alternativo de movilidad.

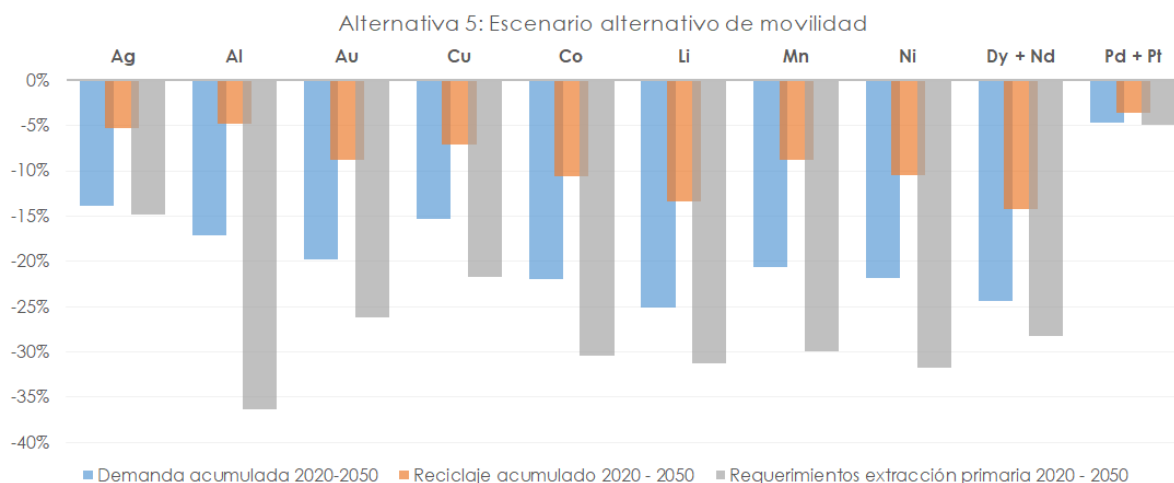


Figura 22. Resultados sobre la variación de la demanda, reciclaje y extracción primaria acumulada 2020-2050 para el escenario alternativo de movilidad

Comprobamos que se obtienen las reducciones de la demanda más significativas de todas las alternativas hasta ahora analizadas, logrando una disminución del 10-25% respecto al escenario de transición. Como consecuencia de un menor número de turismos puestos en circulación se reduce también la cantidad de metales recuperados del reciclaje, evitando el uso de los recursos necesarios durante los procesos de reciclado. Así, se logra una disminución del 5-35% de los requerimientos de extracción primaria para todos los metales respecto al escenario de transición. Esto es una demostración de la importancia y centralidad que tiene el cambio modal y el futuro de la movilidad sobre los requerimientos minerales de la transición energética y digital.

6.6. Combinación de todas las alternativas

Para finalizar este análisis evaluamos el impacto que tendría aplicar las cinco alternativas anteriores de forma combinada. No hay ningún elemento que las haga mutuamente excluyentes, y todas ellas avanzan hacia una mayor suficiencia y economía circular de los metales empleados en las tecnologías de transición energética digital en España.

En este escenario se reduce la fabricación de nuevas tecnologías a excepción de los autobuses eléctricos. En el caso de los turismos eléctricos se logra reducir un 51% los turismos eléctricos que deben fabricarse entre 2020 y 2050, al mismo tiempo que se limita el tamaño de la batería de dichos turismos. El resultado combinado es una reducción sustancial de los requerimientos anuales de nuevas baterías, tal y como se muestra en la Figura 23. Mostramos los resultados de escenarios anteriores para facilitar la comparación.

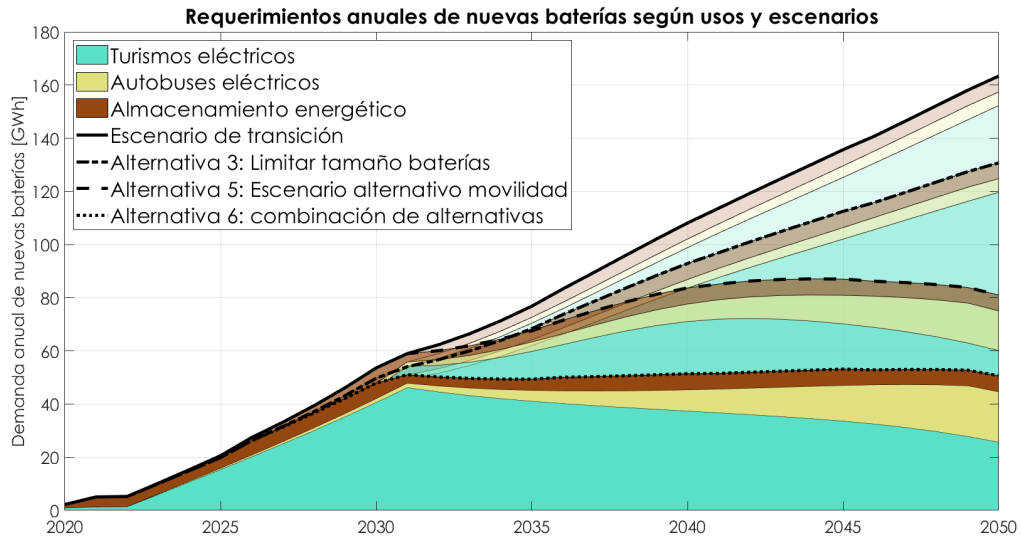


Figura 23: Requerimientos anuales de nuevas baterías eléctricas en la combinación de todas las alternativas

Mientras que en el escenario de transición los requerimientos anuales de nuevas baterías alcanzaban los 53 GWh en 2030, los 108 GWh en 2040 y los 163 GWh en 2050, bajo la combinación de todas las alternativas se logra reducir hasta 48 GWh en 2030, 51 GWh en 2040 y 51 GWh en 2050.

En la Figura 24 se muestran las variaciones sobre la demanda, el reciclaje y la extracción primaria obtenidas para la combinación de todas las alternativas, en comparación con el escenario de transición.

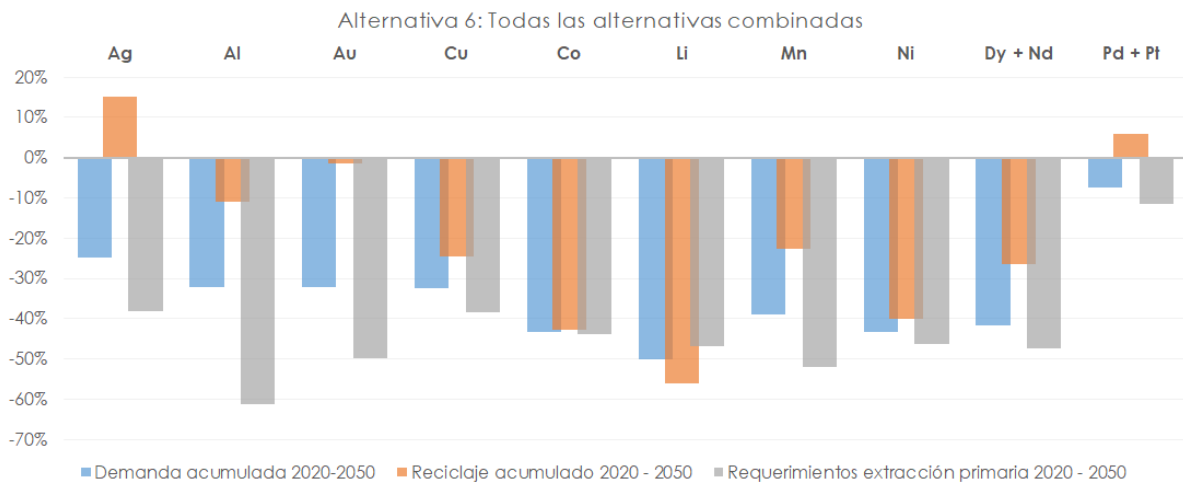


Figura 24: Resultados sobre la variación de la demanda, reciclaje y extracción primaria acumulada 2020-2050 para la combinación de todas las alternativas

Encontramos unas reducciones de la demanda de metales del orden de 10-50%, acompañado de unas variaciones sobre el reciclaje que oscilan entre +15% y -55%. La combinación de ambos factores resulta de una importante reducción de los requerimientos de extracción primaria, los cuales disminuyen un 10-60% con respecto al escenario de transición. Este cambio significativo en la evolución de la demanda, el

reciclaje y la extracción primaria puede visualizarse claramente en la Figura 25, donde se representan los valores anuales para cada uno de los metales analizados. Mostramos los resultados del escenario de transición para facilitar la comparación.

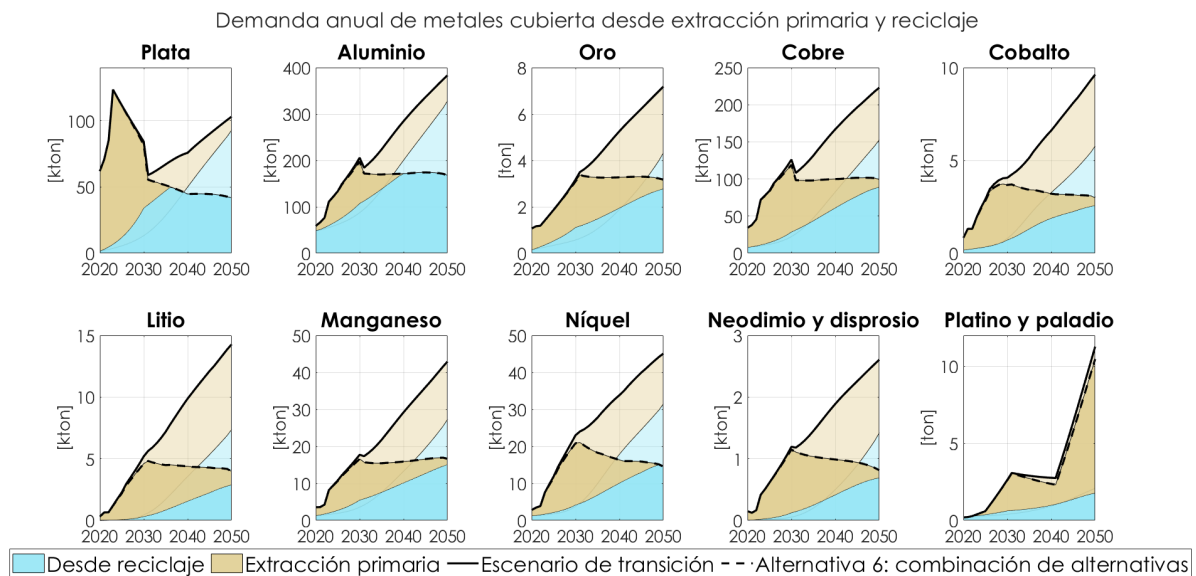


Figura 25. Evolución de la demanda diferenciando entre metales obtenidos desde reciclaje y desde extracción primaria entre 2020 y 2050

Observamos un perfil de evolución claramente diferenciado con respecto al escenario de transición. Combinando todas las alternativas se logra alcanzar un estado estacionario sobre la demanda de casi todos los metales analizados, a excepción del paladio y platino. En general, se observa un rápido crecimiento hasta 2030, cuando se desarrolla una parte importante de las tecnologías requeridas, mientras que la demanda posterior hasta 2050 se mantiene o incluso se reduce, manteniendo así las nuevas instalaciones y la renovación de las tecnologías que llegan al final de su vida útil. Es también significativo observar cómo el porcentaje de la demanda que logra cubrirse a partir del reciclaje alcanza el 100% para metales como la plata, el aluminio o el níquel, mientras que en el resto de metales este porcentaje es considerablemente superior al obtenido en el escenario de transición. En el caso del paladio y platino, el ritmo de crecimiento se mantiene debido a unos elevados objetivos de potencia de electrolizadores en 2050.

En la Figura 26 se representa el porcentaje de la demanda cubierta desde el 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).

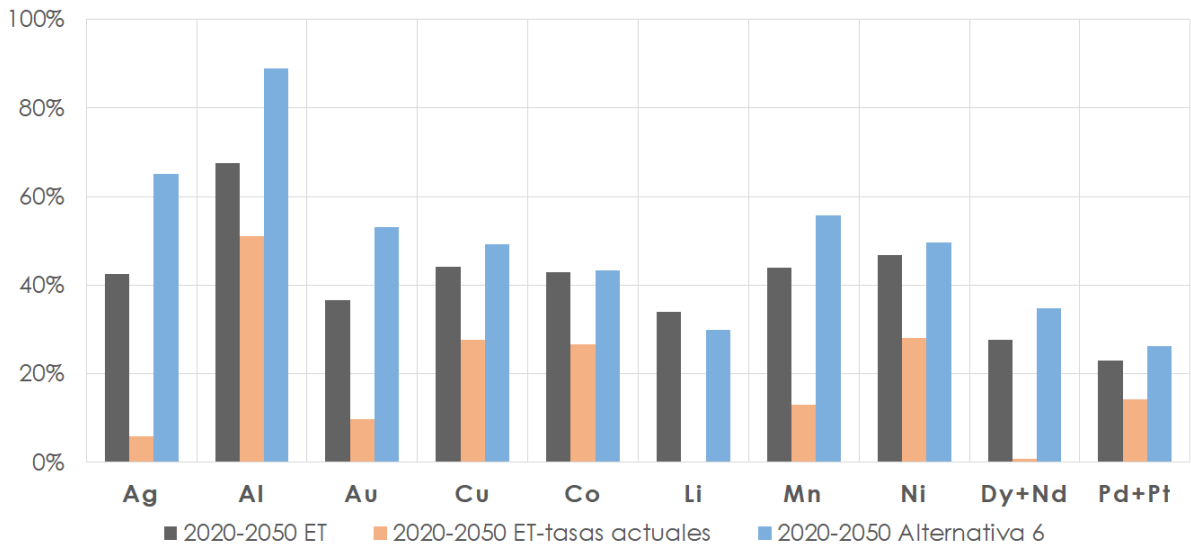


Figura 26: Porcentaje de la demanda cubierta desde el reciclaje de las tecnologías consideradas. Resultados acumulados entre 2020 y 2050 bajo el escenario de transición (ET) el escenario de transición sin mejora del reciclaje (ET-tasas actuales) y la combinación de todas las alternativas (Alternativa 6).

Con las ambiciosas tasas de recogida y reciclado consideradas en el escenario de transición (ET), el reciclaje de metales podría satisfacer entre el 23% y el 68% de la demanda acumulada 2020-2050, reduciendo así las necesidades de extracción primaria. Cuando se combina con medidas de economía circular y de suficiencia (Alternativa 6), esta cifra aumenta hasta el 26-89%. Por el contrario, si se mantienen las tasas actuales de recogida y reciclado (ET-tasas actuales) esta cifra se reduce al 1-51%.

Para finalizar, realizamos de nuevo bajo este escenario una comparación con perspectiva de justicia global. En la Figura 27 representamos la comparación entre los requerimientos de extracción primaria acumulados bajo este escenario entre 2020 y 2050 respecto a la "fracción equitativa" de las reservas de cada uno de los metales.

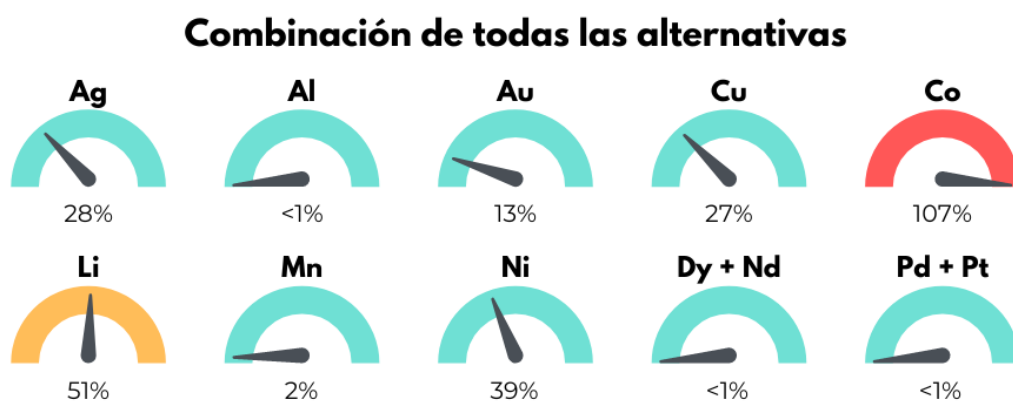


Figura 27: Comparación de los requerimientos de extracción primaria acumulada 2020-2050 en el escenario que combina todas las alternativas respecto a la "fracción equitativa" de las reservas globales de los metales analizados

Mientras que en el escenario de transición el litio y el níquel consumían el 96 y 73% de la "fracción equitativa" de las reservas, combinando todas las alternativas sus requerimientos

de extracción primaria se sitúan en el 51 y 39% respectivamente. El cobalto es el único metal que sigue situándose por encima del 100% de la "fracción equitativa" de las reservas globales en 2022.

7. Impactos generados y evitados

La minería tiene una gran cantidad de impactos socioambientales que no pueden obviarse. Sin ánimo de realizar un análisis exhaustivo, nos gustaría finalizar la descripción de los resultados obtenidos incorporando algunos de los impactos generados durante la extracción primaria y su disminución al aplicar las medidas analizadas. Nos centramos en los siguientes tres parámetros:

- **Roca extraída:** Los metales analizados están concentrados en la corteza terrestre de forma desigual, por tanto, para acceder a los minerales que los contienen es necesario remover una gran cantidad de roca que varía dependiendo del metal. El parámetro roca-a-metal determina esta cantidad de roca. Mientras que este parámetro es relativamente bajo en metales como el aluminio o el manganeso debido a su relativa abundancia en la corteza terrestre, en el caso de la plata, el oro o el platino su valor es entre 4 y 6 órdenes de magnitud superior. Una mayor cantidad de roca extraída implica un mayor impacto sobre los ecosistemas, la biodiversidad y las comunidades afectadas sobre el territorio.
- **Consumo energético:** Todo 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 u otros materiales empleados en estos procesos y que cuentan con su propia huella energética. Se estima que alrededor del 11% de la energía global se consume en los procesos mineros⁷⁴. Además, gran parte de esta energía es de origen fósil, por lo que consideramos que tiene gran interés conocer los principales vectores energéticos involucrados en el proceso: gas natural, diésel, carbón y electricidad.
- **Emisiones de CO₂:** La minería es responsable de aproximadamente el 4-7% de las emisiones de CO₂ a nivel global⁷⁵. Esto implica que cualquier reducción en los requerimientos de extracción primaria será también una reducción sobre las emisiones de CO₂.

Como simplificación suponemos un consumo energético constante a lo largo del tiempo. Sin embargo, una reducción de la ley mineral en los yacimientos, consecuencia de una elevada extracción, puede dar como resultado un aumento del consumo energético⁷⁶. Se estima que la ley mineral del cobre en Chile ha descendido un 30% en los últimos 15 años, provocando que el consumo energético de la industria minera de cobre de Chile se haya duplicado en las últimas dos décadas⁷⁷. Este fenómeno se está observando en el largo plazo para el cobre, cinc, plomo y níquel, mientras que los datos empíricos no

⁷⁴ Tsisilile Igogo, Kwame Awuah-Offei, Alexandra Newman, Travis Lowder, Jill Engel-Cox (2021). **Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches**. Applied Energy, 300, 117375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.

⁷⁵ Lindsay Delevingne, Will Glazener, Liesbet Grégoir, Kimberly Henderson (2020). **Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know**. McKinsey Sustainability. Disponible: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/climate-risk-and-decarbonization-what-every-mining-ceo-needs-to-know>

⁷⁶ Calvo G, Mudd G, Valero A, Valero A (2016). **Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?** Resources. 5(4):36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>

⁷⁷ Comisión chilena del cobre. Ministerio de minería (2017). **Energy consumption in the copper mining industry**. DEPP 03/2018. Gobierno de Chile. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Research/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%202017%20final%20-%20ENG.pdf>

muestran de momento una reducción de la ley mineral en la extracción de hierro, aluminio y manganeso⁷⁸. En el **Anexo metodológico** se incluye una tabla con los valores específicos de cada parámetro de impacto para cada uno de los metales analizados así como las fuentes bibliográficas consultadas para obtener los datos.

Calculamos únicamente estos tres parámetros de impacto sobre la extracción primaria resultante de los escenarios modelados. No obstante, los procesos de reciclaje también implican procesos metalúrgicos muy intensivos en energía y productos químicos con sus respectivos impactos medioambientales. La comparación entre extracción primaria y reciclaje de algunos metales permite apreciar esta idea. En el informe «*Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*» del Banco Mundial (2020)⁷⁹ se muestra cómo la huella de carbono de una tonelada de aluminio o cobre obtenida desde reciclaje es un 96 y 85% inferior a la obtenida desde extracción primaria. Sin embargo, en el caso de metales como el litio, níquel o cobalto la comparación entre reciclaje y extracción primaria reduce la huella de carbono únicamente en un 38%. Reconocemos la limitación de nuestro análisis al no incorporar también una estimación de los impactos asociados al reciclaje, lo cual nos aportaría una imagen más completa.

Una vez expresada esa cautela, pasamos a mostrar en el Cuadro **16** los resultados obtenidos sobre los diferentes parámetros de impacto asociados a la extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 en el escenario de transición para los metales analizados más el hierro, debido a su importancia másica en todas las tecnologías estudiadas. Para su cálculo se ha tomado la intensidad material de las fuentes anteriores y se ha supuesto que la extracción primaria es un 50% respecto a la demanda total, debido al reciclado del mismo. A pesar de esta simplificación, se pone de manifiesto la importancia de este metal en cuanto a los parámetros estudiados en este apartado, representando casi dos tercios de las emisiones de CO₂, por ejemplo. Además, los requerimientos materiales de la transición energética no sólo son de metales. Otros materiales como el cemento o el hormigón también podrían tener un impacto importante en cuanto a energía y emisiones de CO₂ se refiere. Por tanto, hay que tomar con cautela los siguientes resultados, ya que sólo se refieren a los metales estudiados.

Cuadro **16**. Resultados obtenidos sobre los parámetros de impacto para la extracción primaria acumulada 2020-2050 en el escenario de transición

Impactos acumulados 2020-2050 de la extracción primaria			
Parámetros	10 metales estudiados	Hierro	10 metales + Hierro
Roca extraída [Mt]	2.014,7	291,8	2.306,5
Consumo gas natural [PJ]	43,3	38,3	81,6
Consumo diésel [PJ]	21,7	13,2	34,9
Consumo carbón [PJ]	72,8	577,1	649,9

⁷⁸ Ester Van der Voet, Laurant Van Oers, Miranda Verboon, Koen Kuipers (2018). **Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals: Methodology and Application to the Case of Seven Major Metals**. Journal of Industrial Ecology, 23(1), 141-155. <https://doi.org/10.1111/jiec.12722>

⁷⁹ 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>

Consumo electricidad [PJ]	253,1	135,7	388,8
Emissiones CO2 [Mt]	33,5	64,8	98,3

La estimación de los impactos del hierro sólo tienen como objetivo indicar el peso que pueden tener otros metales o materiales en estos parámetros y que no se han estudiado en este informe. Por tanto, en lo que sigue de análisis sólo nos centramos en los 10 metales analizados. Así, en la Figura 28 mostramos la distribución de los diferentes parámetros de impacto para la extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 diferenciando la responsabilidad de los distintos metales analizados.

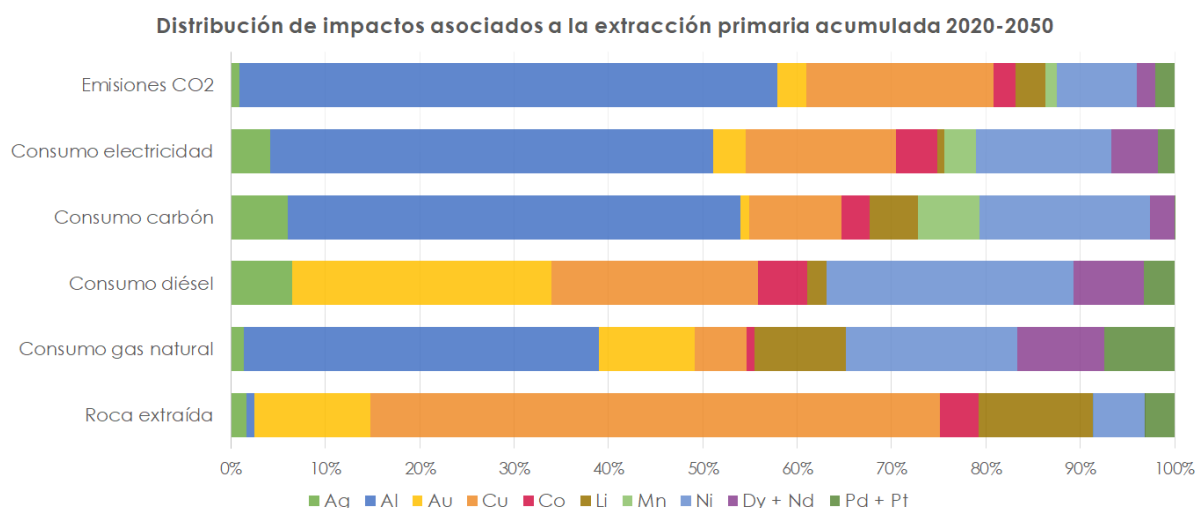


Figura 28: Distribución de los impactos asociados a la extracción primaria acumulada 2020-2050 diferenciando entre los metales analizados

Aquí observamos cómo el aluminio acumula más del 50% de las emisiones de CO2, el consumo de electricidad y el consumo de carbón. Esto se debe a la magnitud de los requerimientos de extracción primaria de este metal, que alcanzaban las 2.327 kt acumuladas entre 2020 y 2050, y a su proceso de refinado muy intensivo en electricidad. Apreciamos también aspectos que hasta ahora habían pasado desapercibidos, como el importante impacto sobre roca extraída que tiene oro en relación a su extracción primaria (0,08 kt), debido a la escasez geológica de este metal. No obstante, el cobre destaca en cuanto al parámetro de roca extraída debido a su relativa escasez (con leyes de mina por debajo del 0.6%) y gran necesidad de extracción primaria, ocupando la primera posición con unos requerimientos de 2.372 kt acumuladas. El disprosio y neodimio destacan en cuenta a consumo energético en relación a la extracción, ya que a pesar de representar únicamente el 0,5% de los requerimientos totales de extracción, consumen el 5% de electricidad, el 7% de diésel y el 9% de gas natural, principalmente debido a la huella energética provocada por la gran cantidad de productos químicos necesarios para su refinado.

En la Figura 29 mostramos la evolución anual de cada uno de los parámetros de impacto entre 2020 y 2050 bajo el escenario de transición.

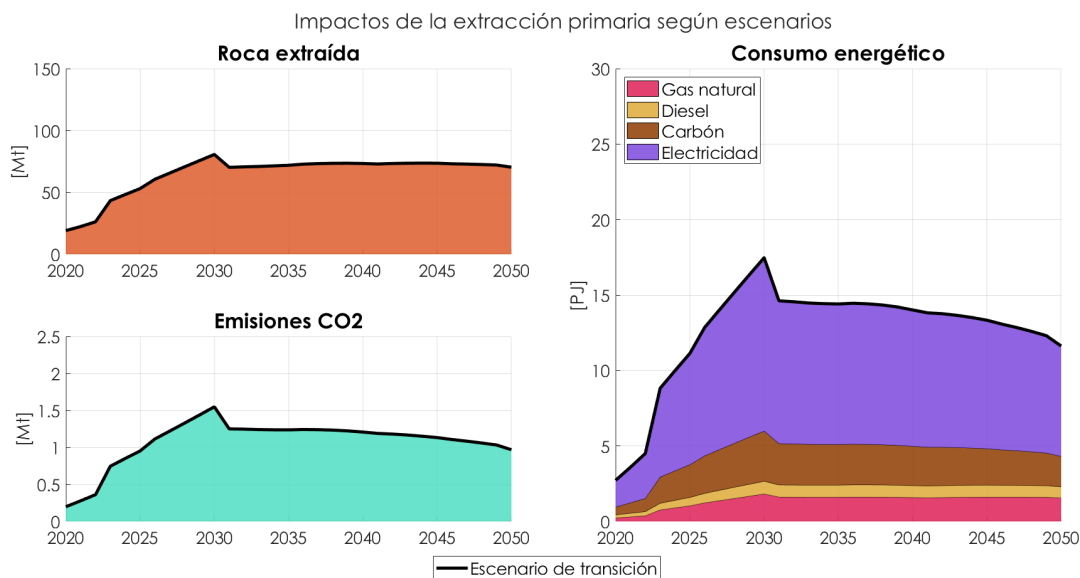


Figura 29: Evolución anual de los impactos asociados a la extracción primaria entre 2020 y 2050 en el escenario de transición

Nos encontramos con que los parámetros de impacto se estabilizan levemente tras una fase de rápido crecimiento hasta 2030. Esta estabilización se produce por no tener en cuenta el consumo energético y huella de carbono de los procesos de reciclado, que como se ha comentado previamente, es una simplificación realizada en este estudio pero que debería tenerse en cuenta al ser estos impactos significativos. Teniendo en cuenta esto, 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 CO₂ 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 CO₂ 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. Estos resultados apuntan a la importante reducción en consumo energético y emisiones que se daría al llevar a cabo la transición energética. Por otro lado, los buques cargueros de mayor capacidad (Cape) pueden transportar 110 kt de materias primas. Por expresarlo de forma gráfica: en 2050 necesitaríamos 2 Cape para transportar las 166 kt de metales obtenidos desde extracción primaria ese año destinadas a la transición energética y digital en España, pero si contáramos la cantidad de tierra removida, se necesitarían otros 636 Cape para cargar las 70 Mt de roca extraída para obtener dichos metales. Esto muestra un impacto significativo, que a su vez tiene asociados múltiples impactos sociales y medioambientales, como la pérdida de biodiversidad, la contaminación y los conflictos con las comunidades locales afectadas.

Por último, realizamos una comparación sobre los parámetros de impacto en dos escenarios alternativos: el más desfavorable y el más favorable. En la Figura 30 se muestra la variación sobre la cantidad de roca extraída, consumo energético y emisiones de CO₂ asociadas a la extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 para el escenario de transición manteniendo las tasas actuales de recogida y reciclaje y para el escenario que combina todas las alternativas.

Variación de los impactos de la extracción primaria según escenarios

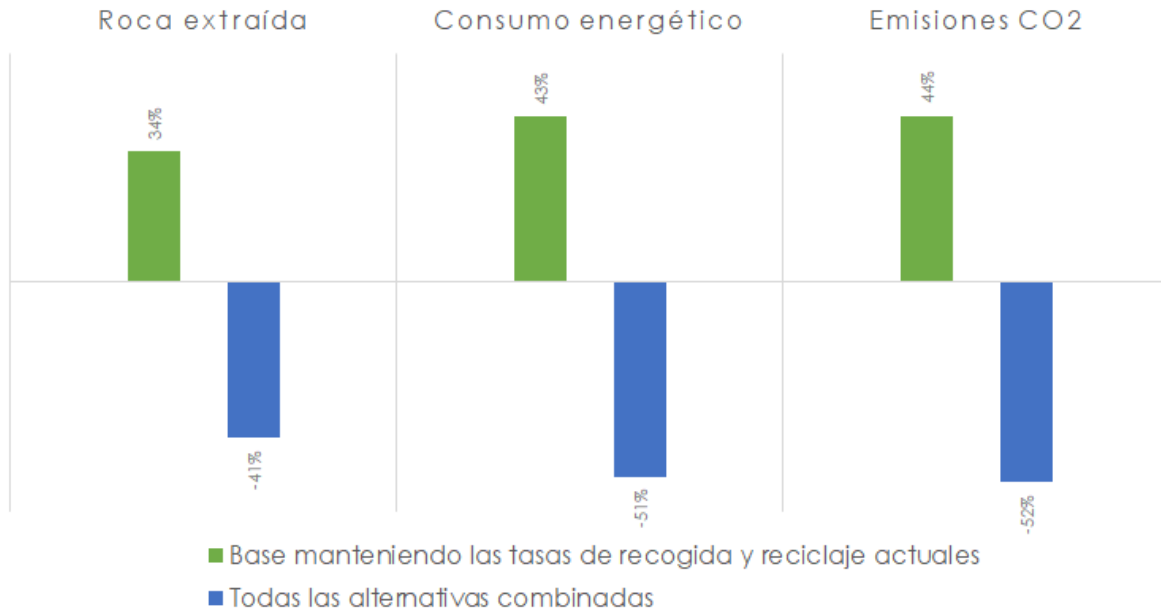


Figura 30: Variación de los impactos de la extracción primaria según escenarios en comparación con el escenario de transición

En el escenario más favorable, combinando todas las alternativas, los parámetros de impacto se reducen en un 31-52%. Mientras que en el escenario más desfavorable, si no hubiera ninguna mejora sobre los procesos de recogida y reciclaje, la cantidad de roca extraída, consumo energético y emisiones de CO2 aumentaría en un 34-44% respecto al escenario de transición. En la Figura 31 mostramos la evolución anual de los parámetros de impacto entre 2020 y 2050 para tres escenarios: escenario de transición, escenario de transición sin mejora del reciclaje y la combinación de todas las alternativas de economía circular y suficiencia.

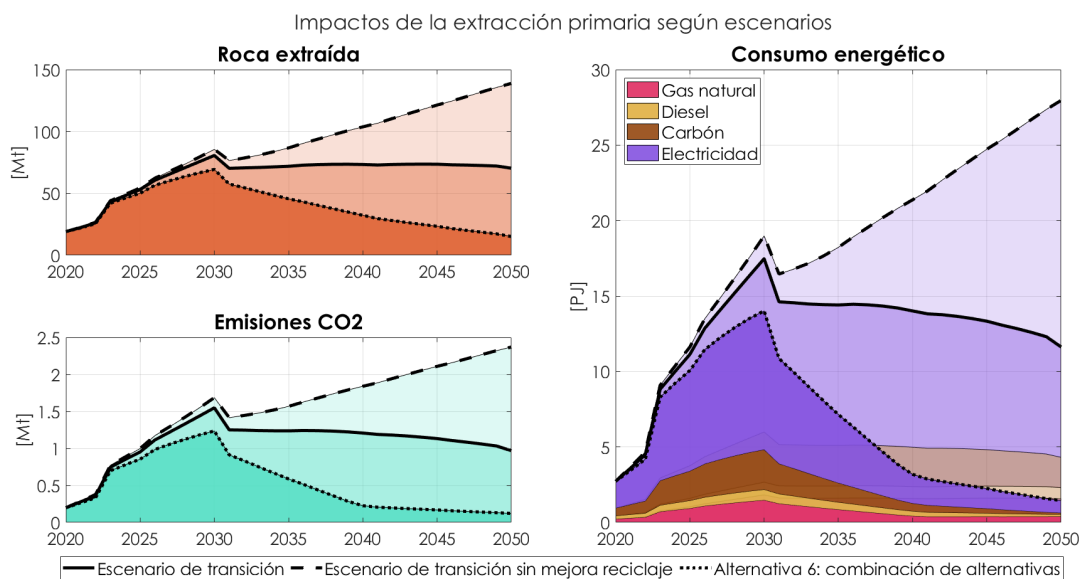


Figura 31: Evolución anual de los impactos asociados a la extracción primaria entre 2020 y 2050 en el escenario de transición

Al igual que ocurría en la Figura **26**, observamos claramente los beneficios de un mayor porcentaje de la demanda cubierto desde reciclaje. No obstante, conviene recordar que los impactos del reciclado no se están teniendo en cuenta. Tras el crecimiento hasta 2030, la entrada masiva del reciclaje junto a una demanda estabilizada logra reducir considerablemente los requerimientos de extracción primaria, y por tanto sus impactos asociados. Por repetir el ejemplo gráfico anterior, en este caso en 2050 necesitaríamos únicamente una fracción de buque Cape para transportar las 13 kt de metales obtenidos desde extracción primaria ese año, mientras que la flota de buques cargando las 15 Mt de roca extraída se habría reducido hasta los 136 Cape. En el escenario en el que no se mejora el reciclaje estas cifras ascienden en 2050 a 4 Cape cargando metales y 1.264 Cape cargando la roca extraída.

8. Discusión y comparaciones

En esta sección nos centramos en aportar algunos elementos que ayuden a situar los resultados obtenidos en un contexto más amplio. En primer lugar, realizamos algunas comparaciones con estudios previos e introducimos algunas cifras sobre el consumo de metales en el resto de la economía española. En segundo lugar, realizamos cuatro comparaciones que nos ayudan a arrojar más luz sobre los resultados tecnológicos obtenidos y que introducen nuevos datos de demanda de metales vinculados con la movilidad. Por último, dada la importancia central que tiene en nuestros resultados, realizamos una aproximación a la discusión sobre movilidad, con el foco puesto en la dependencia del automóvil en España.

8.1. Comentario sobre los resultados generales

Nuestro objetivo aquí es contextualizar y comparar algunos de los resultados del informe con otras fuentes y estadísticas disponibles.

El informe «*Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge*»⁸⁰ de la Universidad KU Leuven (2022) es una de las referencias principales en las que se basa la «*Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales*» del MITERD. En él se establece un escenario de demanda de metales para la transición energética siguiendo las políticas actuales de los estados europeos, teniendo en cuenta tecnologías como energías renovables, vehículo eléctrico, redes eléctricas, almacenamiento con baterías y producción de hidrógeno. De esta forma, obtienen unos resultados de demanda de metales para la transición en Europa que se corresponden con las tecnologías que son producidas domésticamente, sin tener en cuenta aquellos metales contenidos en las tecnologías que son importadas desde fuera de Europa. Según sus hipótesis, esto excluye al 30% de las baterías de vehículos eléctricos y de los electrolizadores, o al 75% de los imanes permanentes de aerogeneradores y de los componentes del vehículo eléctrico. A pesar de que el enfoque de estudio sea diferente al que hemos adoptado en este informe, merece la pena comparar los resultados obtenidos, tal y como hacemos en el Cuadro 17.

Cuadro 17: Comparación de la demanda anual de metales en 2050 obtenida en este estudio con respecto a la obtenida en el informe de KU Leuven

Demanda anual de metales para la transición energética en Europa en 2050 (KU Leuven) [kt]					
Al	Cu	Co	Li	Ni	Dy + Nd
5.000	1.500	50-60	600-800	300-400	2,8 - 5,6
Demanda anual de metales para la transición energética y digital en España en 2050 (este estudio) [kt]					
Al	Cu	Co	Li	Ni	Dy + Nd
383	223	9	14	45	2,6
Comparación entre los resultados de este estudio respecto a la demanda para la transición europea [%]					
Al	Cu	Co	Li	Ni	Dy + Nd
8%	15%	16%	2%	13%	62%

⁸⁰ 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/rqocybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>

De esta forma comprobamos cómo nuestros resultados para España representan un 2-16% de la demanda de metales obtenidos en el informe de KU Leuven para la transición energética en Europa. Para tener una referencia con la que comparar, España representa un 6% del PIB de la Unión Europea, un 8% de su consumo energético y un 11% de su población. La excepción se encuentra en las tierras raras, donde la comparación alcanza el 62%. Esto se explica por el enfoque de su informe y el elevado porcentaje de imanes permanentes para aerogeneradores y componentes de vehículos eléctricos que son fabricados fuera de las fronteras de Europa. En términos generales consideramos que esta comparación valida nuestros resultados, ya que se encuentran en el orden de magnitud que les corresponde, a pesar de las diferentes hipótesis y marco de análisis adoptado.

En segundo lugar, centramos nuestra atención en la demanda de metales del resto de la economía. Eurostat recopila para cada estado miembro de la Unión Europea el indicador de «consumo de material doméstico»⁸¹, que engloba la extracción doméstica de un material más las importaciones menos las exportaciones. En el Cuadro 18 mostramos una comparación entre el consumo material doméstico de aluminio, cobre y níquel en España y la máxima demanda anual de estos metales en nuestro estudio sobre la transición energética y digital, correspondiente a 2050.

Cuadro 18. Comparación de los resultados obtenidos sobre la demanda anual de aluminio, cobre y níquel en 2050 respecto al consumo material doméstico en España

Miles de toneladas	Consumo material doméstico en España (Media 2016-2021, Eurostat)	Demanda anual 2050 (este estudio)
Al*	3.624	383
Cu	12.139	223
Ni	20	45

* la categoría del Al se denomina "Bauxita y otros aluminios" según el Eurostat, por tanto los valores presentados pueden ser inferiores

La demanda de aluminio y cobre asociada a la transición energética y digital en 2050 representa apenas un 10% y 2% del consumo material doméstico en España durante los últimos años. En el caso del cobre, observamos un aumento significativo del consumo material doméstico en España a partir de 2016, siendo la media de 2005-2015 de 3,600 kt. Si lo comparamos con ese dato, obtenemos que la máxima demanda anual de cobre asociada a la transición representaría el 6%. En el informe de KU Leuven la demanda anual de cobre asociada a la transición en 2050 representa el 25% de la demanda total de cobre. Esta diferencia considerable la atribuimos al registro estadístico del consumo de cobre en España. Esto apunta que el grueso de la demanda de estos metales se encuentra en otros sectores de la economía.

⁸¹ 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

A partir de las estadísticas de Eurostat sobre los usos finales de las materias primas⁸² vemos como los usos más comunes del cobre son la construcción (26%), los productos eléctricos y electrónicos (13%), los productos metálicos y muebles (13%) y la maquinaria y vehículos a motor (10%). El caso del níquel es distinto, pues vemos como la demanda para 2050 es más del doble de la actual. Esto se debe a que es un metal esencial para las tecnologías empleadas en la transición energética, principalmente por su uso en baterías de vehículos eléctricos. Los usos más comunes del níquel actualmente son los vehículos a motor (12%), la construcción (12%) y la maquinaria (8%), pero es probable que se desplacen en el futuro como consecuencia de la transición. No existen datos disponibles para metales como litio, cobalto o tierras raras, lo cual nos impide realizar una comparación en aquellos casos en los que la demanda para la transición energética tendría un peso mucho mayor.

Esto visibiliza cómo la demanda principal de algunos de los metales incluidos en este estudio no se encuentra en las tecnologías de transición energética y digital, sino en otros sectores de la economía. Esto quiere decir que pueden verse afectados por situaciones de escasez temporal de suministro y aumento de precios, ya que su demanda total es superior a la reflejada en este informe focalizado únicamente en la transición. Esta situación es especialmente importante para el caso del cobre, pues tal y como hemos visto la extracción primaria obtenida para la transición energética y digital ronda el 49-61% de la "fracción equitativa" de sus reservas. Esto significa que si otros sectores demandan mayores cantidades de este metal podrían existir conflictos con el acceso al mismo.

8.2. Algunas comparaciones de los resultados

A partir de los resultados obtenidos realizamos algunas estimaciones que nos ayudan a obtener una imagen más completa. Realizamos cuatro comparaciones: dos tecnológicas y dos sobre la demanda de metales. En el **Anexo metodológico** se presentan los datos y fuentes en las que nos apoyamos en este apartado.

En primer lugar nos centramos en el consumo eléctrico asociado a la flota de vehículos eléctricos en circulación. Lo estimamos a partir de los kilómetros recorridos anualmente y el consumo eléctrico de los vehículos. De esta forma obtenemos que en la flota de turismos y autobuses eléctricos del escenario de transición consumiría unos 9 TWh en 2030, 30 TWh en 2040 y 48 TWh en 2050. Este consumo eléctrico representaría el 9% de la generación eléctrica de 510 TWh en 2050 considerada en la «Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP 2050)»⁸³. La potencia de tecnologías renovables instalada requerida para suministrar esta electricidad sería de 4 GW en 2030, 12 GW en 2040 y 19 GW en 2050, lo cual representaría un 8% de los 225 GW previstos por la ELP 2050 para el 2050. Según los datos de 2019⁸⁴, el consumo energético del transporte por

⁸² Eurostat (2023). **Material footprints - details by final use of products** [ENV_AC_RMEFD]. Oficina Europea de Estadística. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_RMEFD_custom_6650346/default/table?lang=en&page-time:2019

⁸³ 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>

⁸⁴ MITERD (2022). **La Energía en España 2019**. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://energia.gob.es/balances/Balances/LibrosEnergia/libro-energia-espana-2019.pdf>

carretera de turismos y autobuses se situaba en 167 TWh, el 94% de los cuales se correspondían a productos petrolíferos. Por tanto, los resultados obtenidos indican que la flota de turismos y autobuses eléctricos en 2050 consumiría un 71% menos de energía que la actual flota de turismos y autobuses. Esta diferencia se debe a la mejora en la eficiencia energética de los motores eléctricos frente a los de combustión y a una flota de vehículos menor.

Por otro lado, estudiamos la producción anual de hidrógeno, el consumo eléctrico asociado y la potencia instalada de renovables requerida. Obtenemos que la potencia instalada de electrolizadores considerada en este estudio (Cuadro 5) se corresponde con una producción de 0,7 Mt de hidrógeno en 2030, 3,1 Mt en 2040 y 10,7 Mt en 2050. A pesar de la actualización del *PNIEC 2023-2030* (pasando de 4 a 11 GW en 2030), estas cifras se sitúan por debajo de las 2 Mt de hidrógeno verde que se prevé exportar en 2030 a través del hidroducto H2Med⁸⁵, representando el 10% del hidrógeno verde consumido por la Unión Europea según el Plan «*REPowerEU*». Se encuentran también por debajo de las estimaciones de *Enagás*⁸⁶, quienes estiman una producción de hidrógeno renovable de 2-3 Mt en 2030 y 3-4 Mt en 2040, junto a un potencial de 27 Mt de hidrógeno exportado en 2050. En el Cuadro 19 se muestran la comparación de la producción de hidrógeno

Cuadro 19: Comparación entre valores de producción de hidrógeno entre 2030 y 2050 según este estudio y las previsiones del H2Med y Enagás

Mt de H2	2030	2040	2050
Este estudio	0,7	3,1	10,7
H2Med	2,0 exportación	-	-
Enagás	2-3	3-4	27 exportación

La producción de hidrógeno verde en nuestro escenario de transición obtenida consumiría 38 TWh de electricidad en 2030, 147 TWh en 2040 y 412 TWh en 2050. De esta forma, la potencia renovable instalada requerida para suministrar esta demanda eléctrica sería de 15 GW en 2030, 59 GW en 2040 y 165 en 2050. Esto quiere decir que la producción de hidrógeno verde requeriría el 81% de los 510 TWh de generación eléctrica y el 73% de los 225 GW de potencia renovable instalada en 2050 según la *ELP 2050*. Estos drásticos resultados coinciden con las advertencias lanzadas desde la *Fundación Renovables y Greenpeace*⁸⁷, quienes señalan cómo los planes de desarrollo del hidrógeno verde aumentarán los requerimientos de potencia renovable instalada por encima de lo previsto en las actuales políticas públicas.

⁸⁵ La Moncloa (22/01/2023). **España celebra la incorporación de Alemania al proyecto H2Med**. Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2023/220123-incorporacion-alemania-proyecto-h2med.aspx>

⁸⁶ Arturo Gonzalo (2023). **El hidrógeno renovable, un vector energético clave para España y Europa**. Enagás. Disponible en: https://www.enagas.es/content/dam/enagas/es/ficheros/accionistas-e-inversores/comunicados-cnmv/otra-informacion-relevante/2023/20230119_PPT%20D%C3%ADa%20H2_ESPA%C3%91OL.pdf

⁸⁷ Fundación Renovables y Greenpeace (2023). **Desmontando el H2MED: una coartada para una falsa transición energética**. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2023/03/20230309-H2Med-el-hidrogeno-y-la-politica-energetica.pdf>

En tercer lugar, realizamos una estimación de la demanda de metales asociada a la producción doméstica de turismos en España. La mayoría de los turismos matriculados en España son importados, mientras que la mayoría de los turismos producidos en España son exportados. La actividad económica de la automoción tiene un peso central en la economía española (10% del PIB), y es justamente el mantenimiento de esta actividad económica lo que impulsa la demanda doméstica de determinados metales. Trazando una equivalencia con los objetivos establecidos en el «Plan de la Automoción 2020-2040»⁸⁸ la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), analizamos un escenario en el que la producción de turismos alcanza los 2 millones en 2040. Eso supone un incremento desde los 1,4 millones de turismos producidos en España en 2022, y se situaría en los niveles previos a la crisis de 2008. De esta forma, entre 2020 y 2050 se producirían 39 millones de turismos eléctricos por la industria automovilística en España. Para cumplir con esta producción, la capacidad anual de baterías requeridas para la producción doméstica de turismos sería de 59 GWh en 2030, 119 GWh en 2040 y 128 GWh en 2050. En el Cuadro 20 se muestra la demanda de metales acumulada entre 2020 y 2050 para la producción de turismos y su comparación con la demanda general de todas las tecnologías de descarbonización en el escenario de transición.

Cuadro 20: Resultados de demanda total acumulada para la producción doméstica de turismos en España entre 2020 y 2050.

Demanda total acumulada para la producción doméstica de turismos 2020-2050 [kt]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
1.3	4.651.3	0.1	2.516,5	147,1	228,4	569,1	742,7	40,0	0,0
Porcentaje que representa la producción de turismos respecto a la demanda escenario de transición [%]									
Ag	Al	Au	Cu	Co	Li	Mn	Ni	Dy + Nd	Pd + Pt
50	65	100	59	89	101	80	90	89	0

De esta forma comprobamos cómo al tener en cuenta la actividad económica del sector de la automoción prácticamente se duplica la demanda de metales como el oro, el cobalto, el litio, el manganeso, el níquel y las tierras raras. Estos resultados son coherentes ya que en el escenario de transición se matriculan 34 millones de turismos en el mismo periodo y la movilidad eléctrica tiene un peso central sobre la demanda de metales. Esto visibiliza la doble importancia que tiene la automoción en España sobre la demanda futura de metales: tanto en la flota doméstica como en la producción.

Por último, estimamos la demanda de litio asociada a una expansión masiva de las bicicletas eléctricas en España. Consideramos un incremento drástico de las ventas desde los 1,3 millones de bicicletas vendidas en 2019⁸⁹ hasta 2,5 millones en 2030 y 7 millones en 2050, de las cuales el 20% serían eléctricas en 2030 y el 50% en 2050. Esto da como resultado un incremento de la flota de bicicletas eléctricas desde los 0,4 millones en 2019 hasta 2,8 millones en 2030, 10,8 millones en 2040 y 24,1 millones en 2050. Es decir, esto sería equivalente a una bicicleta eléctrica por cada dos habitantes de España

⁸⁸ ANFAC (2020). **Plan de la Automoción 2020-2040**. Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones. Disponible en: https://anfac.com/wp-content/uploads/2020/03/Informe-Ejecutivo-AUTO-2020_40-ANFAC.pdf

⁸⁹ Asociación ConBici y GEA21 (2022). **Las Cuentas de la Bicicleta: Poniendo cifras al efecto bicicleta**. Disponible en: <https://conbici.org/noticias/informe-las-cuentas-de-la-bicicleta>

en 2050. La capacidad anual de baterías requerida para la fabricación de estas bicicletas eléctricas sería de 1,1 GWh en 2040 y 2,4 GWh en 2050. La demanda de litio acumulada entre 2020 y 2050 asociada a esta expansión masiva de las bicicletas eléctricas sería de 3,5 kt. Esto representa un 1,6% de la demanda acumulada de litio entre 2020 y 2050 obtenida para el escenario de transición.

8.3. Discusión sobre movilidad

Los resultados obtenidos a lo largo de este estudio indican que la movilidad eléctrica es la mayor demandante de los metales analizados durante la transición energética y digital. En el caso de litio y cobalto, fundamentales para la fabricación de baterías, se alcanza un consumo del 96-145% y del 190-244% de la "fracción equitativa" de las reservas de litio y cobalto respectivamente. En investigaciones previas se ha puesto también de manifiesto la gran cantidad de materias primas críticas que se requerirá en los nuevos modelos de vehículos eléctricos⁹⁰. Esto nos lleva a afirmar que hablar sobre la demanda de metales en la transición energética y digital es hablar principalmente de movilidad eléctrica. Por lo tanto, este sector es probablemente el que más riesgos deberá afrontar ante futuras situaciones de cuellos de botella en el suministro de materias primas y encarecimiento de precios. Se vislumbra un escenario de una enorme vulnerabilidad con consecuencias graves para la industria automovilística, poniendo en peligro el propio sector y los puestos de trabajo asociados.

En efecto, la industria automovilística en España cuenta con 17 fábricas, 15 centros tecnológicos y más de 1.000 plantas de producción de componentes, representando el segundo país fabricante de vehículos a nivel europeo y el noveno a nivel mundial. En 2022, la fabricación de vehículos y componentes empleó a 148.671 personas, mientras que la venta y reparación de vehículos ascendía hasta los 334.790 empleos⁹¹. La facturación anual del sector representa aproximadamente el 10% del Producto Interior Bruto (PIB) de España. Esta dependencia se convierte en un problema en un momento de estancamiento de la actividad económica y una disminución de las ventas de vehículos como el actual. Las matriculaciones de vehículos han caído desde 2019: un -12% a nivel mundial, un -10% a nivel europeo y un -35% en España. Acompañando la caída en las matriculaciones, se ha producido una caída en la fabricación de vehículos desde 2019: un -13% a nivel mundial, un -24% a nivel europeo y un -21% en España. Como consecuencia, las fábricas europeas están funcionando con unas tasas de producción del 56% de su capacidad. Las tasas de utilización suelen ser superiores al 70%, e incluso durante la crisis del 2008 estos porcentajes no fueron más bajos del 65%.

Las previsiones futuras ante una competencia feroz con el mercado chino de vehículos eléctricos y la actual dependencia de este sector de materias primas críticas, principalmente en manos de países de fuera de la Unión Europea, no auguran una recuperación del sector. En base a nuestros resultados, consideramos que este problema

⁹⁰ 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>

⁹¹ CCOO Industria (2023). **El sector de automoción en 2022: Situación y perspectivas**. Disponible en: <https://industria.ccoo.es/cbd408877a5c4306b0f115930c036bf3000060.pdf>

debe abordarse de manera conjunta: 1) impulsando estrategias de economía circular en la propia industria y 2) planteando escenarios alternativos de movilidad.

Como planteamos en estudios previos⁹², los procesos de reciclaje actuales de vehículos están orientados a recuperar, a través de procesos físicos de bajo coste, los metales de mayor peso relativo, principalmente el acero, aluminio y cobre. Sin embargo, los metales críticos y estratégicos que representan una menor proporción, pero que son fundamentales para la electrónica y las baterías, acaban perdiéndose o subciclándose con otras fracciones metálicas. Ante esta situación, es fundamental plantear nuevos modelos de producción, que pasen por, entre otros: desmaterializar, utilizar materiales abundantes y locales, maximizar el uso de materiales reciclados, diseñar para durar, concentrar todas las piezas de alto valor metálico en un lugar específico del coche para facilitar su desmontaje, estandarizar, evitar el uso de materiales complejos y mezclas imposibles de reciclar o apostar por el reacondicionamiento de piezas del automóvil. Una línea de producción de vehículos debería ser capaz tanto de ensamblar como de desensamblar todas sus piezas para su posterior reutilización. En este cambio, la I+D+i deberá jugar un papel central. La reciente propuesta de regulación de vehículos fin de vida por la Comisión Europea⁹³ está alineada en gran medida con estos planteamientos y ciertos fabricantes ya están empezando a implementar algunas de estas estrategias. Esto tiene una gran importancia para los nuevos vehículos eléctricos, pero también para los vehículos de combustión interna que van a llegar al final de su vida útil durante las próximas décadas y pueden colaborar significativamente como fuente de recuperación de metales, tal y como hemos demostrado en este informe.

Dicho esto, aun adoptando estas medidas ambiciosas en torno a la circularidad del vehículo, las restricciones de materias primas seguirían estando presentes. Es por ello que en este estudio hemos analizado las consecuencias que tendrían alternativas sobre la movilidad eléctrica, como la limitación del tamaño de las baterías o un escenario alternativo de movilidad en el que se reduce significativamente la flota de turismos en circulación. Son justamente estas alternativas las que han dado como resultado una mayor reducción sobre los requerimientos de extracción primaria, logrando una disminución del 6-16% y 5-35% respectivamente. Esto revela la importancia de las tendencias y transformaciones del futuro de la movilidad y sus impactos minerales.

Por tanto, si queremos comprender los impactos minerales debemos comprender los factores que moldean la movilidad en España, que actualmente es altamente dependiente del automóvil. Investigaciones recientes identifican cinco factores que impulsan la profundización de esta dependencia: (1) la industria de la automoción, (2), las infraestructuras para el automóvil, (3) las dinámicas en el uso del suelo, (4) el debilitamiento del transporte público y (5) la cultura del automóvil⁹⁴. Sin ánimo de realizar

⁹² Abel Ortego, Alicia Valero, Antonio Valero, Marta Iglesias (2018). **Downcycling in automobile recycling process: A thermodynamic assessment.** Resources, Conservation and Recycling, 136, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.006>.

⁹³ Comisión Europea (2023). **End-of-life vehicles Regulation.** Disponible en: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles/end-life-vehicles-regulation_en

⁹⁴ Mattioli, G., Roberts, C., Steinberger, J. K., & Brown, A. (2020). **The political economy of car dependence: A systems of provision approach.** Energy Research and Social Science, 66(July 2019), 101486. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101486>

un repaso exhaustivo, podemos señalar algunas de estas tendencias sobre el caso de España.

Entre 1992 y 2012, se construyeron diariamente en España 1,2 kilómetros de autovías o autopistas⁹⁵, dando lugar a los 17.551 km actuales que sitúan a España como el país europeo con la mayor red de carreteras de gran capacidad. A esto se le suma el desmantelamiento de infraestructuras ferroviarias y servicios públicos en zonas rurales junto a la aplicación de un modelo urbanístico que aumenta las distancias que la población necesita recorrer día a día. Según los últimos datos disponibles⁹⁶, cada habitante de España recorre anualmente 15.184 km, de los cuales 10.538 se recorren en automóvil, 577 a pie y en bicicleta y 2.247 en metro, tranvía, ferrocarril y autobús. En la mayoría de ocasiones, el uso del vehículo privado no es una elección sino una obligación. Muestra de ello se encuentra en que el vehículo privado representa el ~50% de los desplazamientos a los centros de trabajo en ciudades como Madrid, Barcelona, Valencia o Zaragoza, y ascienda hasta el 70-83% en ciudades como Sevilla, A Coruña, Málaga o Cáceres⁹⁷.

Es en este contexto, junto con la centralidad económica y laboral del sector en España, en el que debemos analizar los escenarios futuros de movilidad. Por parte de la industria existe un fuerte interés en relanzar la producción de automóviles, adaptándose a las políticas públicas que introducen primordialmente el vehículo eléctrico. Muestra de ello son los anuncios de instalación de plantas de fabricación de baterías en diferentes regiones de España: Sagunto (*Volkswagen*, 40 GWh anuales), Valladolid (*Inobat*, 32 GWh), Navalmoral de la Mata (*Envision AESC*, 30 GWh), Badajoz (*Phi4Tech*, 10 GWh) y Vitoria (*Basquevolt*, 10GWh). Esto acumularía una capacidad de fabricación de 122 GWh anuales, equivalente a unos 2,2 millones de turismos eléctricos. Se han producido también múltiples estímulos económicos de la industria de la automoción mediante financiación pública. El *Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica del Vehículo Eléctrico y Conectado* (PERTE VEC)⁹⁸ acumula ayudas por valor de 2.975 millones de euros, y la tercera edición del *Programa de Incentivos a la Movilidad Eficiente y Sostenible* (MOVES III)⁹⁹ destina 1.200 millones de euros para la ayuda a la compra de coches eléctricos e instalación de puntos de recarga. A esto se le suma la desgravación del 15% del IRPF para la compra de vehículos eléctricos aprobada recientemente por el gobierno de España¹⁰⁰.

⁹⁵ Alfonso Sanz Alduán, Pilar Vega Pindado, Miguel Mateos Arribas (2016). **Las cuentas ecológicas del transporte en España**. Grupo de Estudios y Alternativas 21, SL (gea21, S.L.). Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/28795/>

⁹⁶ MITMA (2008). **Movilia 2006/2007: Encuesta de Movilidad de las Personas Residentes en España**. Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana. Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/informacion-para-el-ciudadano/informacion-estadistica/movilidad/movilia-20062007/encuesta-de-movilidad-de-las-personas-residentes-en-espana%CC%83a-movilia-20062007>

⁹⁷ DGT, IDAE (2019). **La movilidad al trabajo: un reto pendiente**. Dirección General de Tráfico, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/la_movilidad_al_trabajo_un_reto_pendiente_dgt_idae_junio_2019.pdf

⁹⁸ La Moncloa (18/03/2022). **Publicada la convocatoria del PERTE del vehículo eléctrico y conectado**. Disponible en: <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/publicada-la-convocatoria-del-perte-del-vehiculo-electrico-y-conectado>

⁹⁹ IDAE (2023). **Programa MOVES III**. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. Disponible en: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>

¹⁰⁰ Europa Press (26/06/2023). **El Gobierno aprueba este martes una desgravación en el IRPF para vehículos eléctricos y el derecho al olvido oncológico**. Disponible en: <https://www.europapress.es/nacional/noticia-sanchez-anuncia-aprobara-desgravacion-irpf-15-compra-vehiculos-electricos-20230626221020.html>

Tal y como hemos visto en nuestros escenarios, un aumento de la movilidad eléctrica conducirá a unos requerimientos cada vez mayores de metales, cuya disponibilidad puede verse afectada dando lugar a situaciones de falta de suministros o encarecimiento de precios, afectando seriamente a la viabilidad de las plantas. Estas consecuencias pueden ser esquivadas mediante transformaciones que logren un cambio en el modelo de movilidad. Existen diversos enfoques que abordan el futuro de la movilidad buscando maximizar el bienestar social al mismo tiempo que se reduce el impacto medioambiental de su actividad¹⁰¹. La mayoría de ellos trabajan desde el marco de la satisfacción de necesidades humanas, desvinculándolas de un elevado uso de energía y recursos materiales¹⁰². Otros enfoques fijan la mirada en el “exceso de viajes en automóvil”¹⁰³, y arrojan resultados que cuantifican los beneficios de su limitación. Algunas investigaciones estudian las posibilidades de implementar un “servicio de movilidad garantizado”¹⁰⁴ en el país, diagnosticando qué regiones y segmentos de población no tiene acceso a transporte público con los actuales servicios e infraestructuras. Cuando se integran varias de estas transformaciones en un modelo de evaluación integrada se obtiene que se podrían reducir un 52% las distancias recorridas en automóvil y dividir entre 3 el número de vehículos individuales¹⁰⁵. Estos futuros posibles se pueden observar en ejemplos actuales, cómo en el caso de Países Bajos, donde una persona media recorre en bicicleta 1.000 km al año, representando el 9% del total de distancias recorridas.

Son justamente estos otros enfoques los que hemos tratado de simular en nuestro [escenario alternativo de movilidad](#), en el que se llega a una flota de turismos eléctricos en circulación en 2050 tres veces menor a la actual. Los resultados obtenidos sobre la demanda de metales revelan los beneficios de este tipo de transformaciones. Además, en la comparación realizada con un escenario en el que se alcanzan las 24 millones de bicicletas eléctricas en 2050 obtenemos que su demanda de litio asociada se corresponde únicamente con un 1,6% de la demanda de litio obtenida en el escenario de transición. Esto señala que la industria de la automoción debería someterse a transformaciones importantes en el futuro de la movilidad para evitar una creciente dependencia de recursos minerales cada vez más escasos y favorecer el cambio social. Ir más allá de una mera electrificación de la flota existente de vehículos es fundamental para una descarbonización del transporte en la escala y velocidad necesarias¹⁰⁶. Tal y como hemos analizado en este estudio, lograrlo también es fundamental para reducir la extracción primaria de los metales requeridos para la flota de vehículos en circulación.

¹⁰¹ Dillman, K. J., Czepkiewicz, M., Heinonen, J., & Davíðsdóttir, B. (2021). **A safe and just space for urban mobility: A framework for sector-based sustainable consumption corridor development**. *Global Sustainability*, 4. <https://doi.org/10.1017/sus.2021.28>

¹⁰² Brand-Correa, L. I., Mattioli, G., Lamb, W. F., & Steinberger, J. K. (2020). **Understanding (and tackling) need satisfier escalation**. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 16(1), 309–325. <https://doi.org/10.1080/15487733.2020.1816026>

¹⁰³ Wadud, Z., Adeel, M., Anable, J., & Lucas, K. (2022). **A disaggregate analysis of 'excess' car travel and its role in decarbonisation**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109(July). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103377>

¹⁰⁴ Laa, B., Shibayama, T., Brezina, T., Schönfelder, S., Damjanovic, D., Szalai, E., & Hammel, M. (2022). **A nationwide mobility service guarantee for Austria: possible design scenarios and implications**. *European Transport Research Review*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00550-5>

¹⁰⁵ Brand, C., Anable, J., & Morton, C. (2019). **Lifestyle, efficiency and limits: modelling transport energy and emissions using a socio-technical approach**. *Energy Efficiency*, 12(1), 187–207. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9678-9>

¹⁰⁶ Milovanoff, A., Posen, I.D. & MacLean, H.L. (2020). **Electrification of light-duty vehicle fleet alone will not meet mitigation targets**. *Nat. Clim. Chang.* 10, 1102–1107. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00921-7>

9. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y los análisis posteriores realizados destacamos seis conclusiones principales de este estudio.

1. **La demanda de metales para la transición energética y digital está impulsada fundamentalmente por la movilidad eléctrica:** Las tecnologías de movilidad eléctrica son responsables del 54-58% de la demanda acumulada entre 2020-2050 de aluminio y cobre, del 73-92% de manganeso, cobalto, níquel y litio y del 79% de la demanda de disprosio y neodimio. Las tecnologías eólicas son responsables únicamente del 16% de la demanda acumulada de disprosio y neodimio, mientras que las líneas y subestaciones eléctricas únicamente representan el 10-11% de la demanda de cobre y aluminio. Esto se debe fundamentalmente a la fabricación de 34 millones de turismos eléctricos durante el periodo analizado, con el objetivo de alcanzar y mantener una flota de 17 millones en 2050. Los requerimientos anuales de nuevas baterías alcanzan los 53 GWh en 2030, 108 GWh en 2040 y 163 GWh en 2050.
2. **Unos ambiciosos sistemas de recogida y reciclaje lograrían cubrir casi la mitad de la demanda de metales entre 2020 y 2050:** Según el escenario de incremento drástico de las tasas de recogida y reciclaje obtenemos que la recuperación de metales en ciclo cerrado a partir de las tecnologías analizadas podría cubrir el 15-30% de su demanda en 2030 y el 50-60% en 2050. En términos generales, entre 2020 y 2050 se lograría cubrir el 40-50% de la demanda total de metales para la transición energética y digital a partir del reciclaje, lo cual reduciría considerablemente los requerimientos de extracción primaria. Si se incorporaran otras fuentes de reciclaje de otros sectores de la economía estos porcentajes podrían ser superiores. Para hacer posibles estas tasas de recogida y reciclaje debería planificarse y desarrollarse una industria de la minería urbana en España y adoptar medidas de diseño orientado al reciclaje por parte de los fabricantes.
3. **La aplicación de medidas de economía circular y suficiencia podría reducir la mitad de los requerimientos de extracción primaria:** Las alternativas que mayor reducción de la extracción primaria logran son aquellas que limitan el tamaño de las baterías de los turismos eléctricos 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. En el primer caso se logra una reducción del 6-16% de los requerimientos de extracción primaria, y en el segundo caso del 5-35%. Cuando se combinan todas las alternativas de economía circular y suficiencia propuestas logramos una reducción de los requerimientos de extracción primaria del 10-60% para los diferentes metales analizados. En este último caso, los requerimientos anuales de nuevas baterías se reducen hasta 48 GWh en 2030, 51 GWh en 2040 y 51 GWh en 2050.
4. **Los impactos de consumo energético y emisiones son reducidos, mientras que la cantidad de roca removida puede tener asociado impactos medioambientales mucho mayores:** El consumo energético y las emisiones de

CO₂ acumuladas entre 2020 y 2050 asociadas a la extracción y refinado de los metales estudiados incorporados en las tecnologías para la transición representaría el 8-12% del consumo anual de energía primaria y de las emisiones de CO₂ anuales en España en la actualidad. No obstante, estos valores se verían incrementados si se toman en consideración otras materias primas, como el hierro o el cemento, o si se considerasen los impactos asociados al reciclado, que no son despreciables. El impacto de la roca extraída para obtener los metales es más considerable y tiene asociados múltiples impactos sociales y medioambientales, como la pérdida de biodiversidad, la contaminación y los conflictos con las comunidades locales afectadas. Poniendo las cifras en contexto, en 2050 se necesitarían 2 buques mercantes para transportar la extracción primaria anual de metales para la transición energética y digital en España, los cuáles se complementarían con otros 727 buques que cargarían la cantidad de roca extraída para obtener dichos metales. Combinando las alternativas de economía circular y suficiencia los impactos se reducen en un 37-50%, mientras que si se mantuvieran las tasas actuales de recogida y reciclaje éstos se verían incrementados en un 30-38%.

5. **Analizado desde una perspectiva de justicia global, la transición energética y digital en España supera la "fracción equitativa" de las reservas de litio y cobalto:** Comparamos los resultados de extracción primaria obtenidos con la "fracción equitativa" de las reservas minerales que le corresponderían a España, calculado como el 0,6% de las reservas globales. En el escenario de transición, con unos ambiciosos sistemas de recogida y reciclaje, la extracción primaria acumulada entre 2020 y 2050 duplica la "fracción equitativa" de cobalto, prácticamente alcanza la de litio y se consume el 49% y 73% de la de cobre y níquel, respectivamente. Si las tasas de recogida y reciclaje se mantuvieran en los niveles actuales se consumiría un 145-244% de la "fracción equitativa" de litio y cobalto, y un 61-98% de la de cobre y níquel. Combinando todas las alternativas de economía circular y suficiencia se logra reducir hasta consumir únicamente un 51-107% de la "fracción equitativa" de litio y cobalto, y un 33-39% de la de cobre y níquel. Esto visibiliza la centralidad de los metales más vinculados con la movilidad eléctrica y los riesgos de desarrollar una transición energética y digital que aumente la dependencia de terceros países y potencie las desigualdades internacionales existentes a través de la apropiación de recursos materiales. También cabe señalar el caso del cobre, ya que es un metal ampliamente utilizado en otros sectores y con una "fracción equitativa" de las reservas relativamente alta (49-61%), lo que podría dispararla drásticamente si estos sectores estuvieran contabilizados,
6. **Las comparaciones posteriores validan los resultados y fijan la atención en la producción doméstica de automóviles y los requerimientos energéticos del hidrógeno verde:** Los resultados de demanda de metales obtenidos para España se corresponden con el 8-16% de la demanda asociada a la transición energética europea obtenida por estudios previos, lo cual es coherente con el peso que representa España en Europa. En el caso del cobre y aluminio, la máxima demanda anual asociada a la transición energética y digital en España representa

únicamente el 2 y 10% del consumo material doméstico actual, lo cual pone de relieve la importancia del resto de sectores de la economía para estos metales. Si tomamos en consideración la producción doméstica de turismos en España obtenemos que la demanda de metales entre 2020 y 2050 prácticamente se duplicaría para metales como el manganeso, cobalto, níquel, litio, disprosio y neodimio. En cambio, en un escenario de expansión masiva de bicicletas eléctricas, hasta alcanzar un stock de 24 millones en 2050, la demanda de litio acumulada representaría únicamente el 1,6% de la del escenario de transición, mientras que permitiría reducir la dependencia del vehículo privado. En el caso de la producción de hidrógeno, obtenemos que el escenario estudiado se corresponde con una producción de 1 Mt en 2030, 3 Mt en 2040 y 11 Mt. Esta producción requeriría el 81% de la generación eléctrica y el 73% de la potencia renovable instalada en 2050 según la *ELP 2050*. Este resultado hace pensar que en caso de desarrollarse esta producción de hidrógeno debería aumentarse la potencia instalada de renovables, aumentando la demanda de metales asociada.

A partir de las conclusiones extraídas, llegamos a las siguientes ocho recomendaciones:

1. Llevar a cabo el estudio, discusión pública y planificación del futuro de la movilidad en España, realizando las transformaciones necesarias para reducir la flota de turismos en circulación.
2. Impulsar y planificar el desarrollo de una industria de minería urbana en España que sea capaz de cumplir unas ambiciosas tasas de recogida y reciclaje en la magnitud y temporalidad asociada al volumen de residuos tecnológicos. Esta medida es especialmente relevante en el sector de la automoción, para el que la adopción de la economía circular será esencial en un escenario de cada vez mayor dependencia de materias primas escasas.
3. Llevar a cabo el estudio, discusión pública y planificación de los requerimientos de extracción primaria tomando en consideración a las comunidades locales afectadas y desde una perspectiva de justicia global que evite reproducir las desigualdades internacionales existentes.
4. Realizar un análisis de 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.
5. Profundizar el análisis de escenarios alternativos de movilidad mediante modelos de evaluación integrados que permitan 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.
6. Complementar el estudio de demanda de metales asociada a políticas públicas sobre transición energética y digital integrando una mayor coherencia y detalle sobre los escenarios e hipótesis consideradas.

7. Dedicar mayores esfuerzos al estudio de la digitalización en España, integrando tecnologías como los centros de datos y el consumo energético asociado.
8. Integrar al análisis los impactos energéticos y medioambientales del reciclaje.