



La nueva generación de automóviles eléctricos va a necesitar una mayor cantidad de componentes electrónicos, en los que se emplean metales como el neodimio, el praseodimio y el disprosio, para los imanes permanentes, y otros elementos como la plata, el indio, el tántalo o el lantano. Foto: Álvaro López.

Nuevos materiales, nuevas tecnologías y nuevos retos de la transición ecológica

Antonio Valero, Guiomar Calvo, Alicia Valero
Instituto Mixto CIRCE, Universidad de Zaragoza.

La transición energética y las tecnologías renovables para limitar los efectos del cambio climático a nivel mundial están en entredicho, porque su dependencia de materias primas críticas puede provocar en el corto plazo desabastecimientos y alta volatilidad de sus precios y en el largo plazo una gran injusticia generacional por dejar a las generaciones futuras leyes mineras muy bajas y costosas de extraer. Lo mismo ocurre con la transición digital e incluso con la transición alimentaria, por su dependencia en estos minerales que al ser escasos estarán sometidos a tensiones políticas y económicas poderosas. Es fundamental conocer dónde se usan y qué alternativas tenemos para mantener un suministro constante que no dependa de forma exclusiva de la producción primaria. Es necesario plantear esta cuestión en España para realizar una auténtica transición ecológica basada en la recuperación funcional de estos materiales de los residuos generados. La basura tecnológica es una oportuni-

dad para España, tanto en legislación, como en investigación, desarrollo empresarial, minería y cambio social. El Instituto CIRCE de la Universidad de Zaragoza lleva más de veinte años trabajando en este problema. En este artículo se explican algunos de los resultados alcanzados, corroborados recientemente por la Agencia Internacional de la Energía.

Las energías limpias, la movilidad sostenible, la alimentación y la sobrecogedora rapidez de la digitalización, están vinculadas a una demanda exponencial de materias primas escasas. Es necesario analizar los límites a su crecimiento y proponer soluciones. Llevamos más de veinte años trabajando y comunicando los riesgos de este preocupante tema, pero su visibilidad más pública se ha manifestado últimamente con el informe de la Agencia Internacional de la Energía, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, al movilizarse la

Es necesario plantear el tema de las materias primas críticas para realizar una auténtica transición ecológica basada en la recuperación funcional de estos materiales de los residuos generados. La basura tecnológica es una oportunidad para España, tanto en legislación, como en investigación, desarrollo empresarial, minería y cambio social

Unión Europea con el nuevo Pacto Verde y su programa *Next Generation* que promulga la transición ecológica integral de Europa.

Cada vez demandamos más elementos de la tabla periódica; hemos pasado de consumir en la prehistoria unos tres kilos de recursos naturales por habitante y día hasta los cuarenta y cuatro kilos que se consumen en nuestra sociedad industrializada. A esto hay que sumar que el avance tecnológico que ha tenido lugar con el paso de los siglos ha ido incrementando progresivamente el número de elementos que empleamos. De tan solo unos pocos en el siglo XVII (hierro, cobre, plomo...), hemos pasado a usar la práctica totalidad de los que figuran en la tabla periódica hoy en día.

Lógicamente, las nuevas tecnologías no son una excepción a este frenético aumento del ritmo de consumo. Cada vez confiamos más en multitud de aparatos eléctricos y electrónicos que parecen simplificarlos la vida. Las ventas de teléfonos móviles, por ejemplo, comenzaron a crecer rápidamente desde 2009, alcanzando cifras anuales aproximadamente constantes de 1,5 mil millones de teléfonos entre 2016 y 2020. Lo que resultó en ventas acumuladas entre 2007 y 2020 de casi catorce mil millones de teléfonos y casi duplicando la población mundial y algo más de ciento sesenta millones de tabletas electrónicas, solo en 2020 (Torrubia, Valero y Valero, 2021).

Todos estos dispositivos están compuestos por muchos elementos base como el acero, cobre o aluminio, pero también por otros metales menores que son escasos y cuya extracción, refinado y procesamiento requiere de ingentes cantidades de energía. Por otro lado, el aumento de las ventas y la renovación constante de estos aparatos lleva consigo un incremento de la cantidad de residuos generados.

Lamentablemente, en la gran mayoría de los casos, estos aparatos no se gestionan de forma adecuada cuando son desechados. Por ejemplo, un informe de las Naciones Unidas estimó en cincuenta millones de toneladas la generación de residuos compuestos de aparatos eléctricos y electrónicos, que incluyen no solamente teléfonos móvi-

les u ordenadores, también televisiones, tostadoras, aspiradoras o grandes electrodomésticos como lavadoras o frigoríficos, entre otros, solo para el año 2019. Esta cantidad en peso es equivalente a casi cuatro mil quinientas torres Eiffel de residuos (World Economic Forum, 2019). De todas estas toneladas, apenas un 20 % fueron sometidas a reciclado a través de los sistemas de gestión correspondiente. Dado que el crecimiento esperado de la venta de estos aparatos es de un 3 % anual, para 2050 podríamos llegar a generar un total de ciento veinte millones de toneladas de residuos de este tipo (Nijman, 2019). Tan solo en Europa se reemplazan un total de diez millones de teléfonos móviles cada mes, sin contar tabletas, ordenadores y equipos vinculados al internet de las cosas.

Pero esto no es más que un simple ejemplo de la demanda mundial de metales raros en la próxima generación. En realidad, los vehículos eléctricos, las energías renovables con sus baterías de almacenamiento energético, incluido el hidrógeno, la aviación comercial, sin olvidar las necesidades de equipos de defensa de los países, y la demanda creciente de fertilizantes son los que constituirán el grueso de la extracción de minerales. Es evidente que algunos de los elementos que los componen puedan llegar a presentar un riesgo de suministro considerable en el futuro. Son lo que usualmente denominamos materiales críticos, veamos con más detalle por qué se llaman así y cuáles son.

¿Qué consideramos un material crítico?

Un recurso natural puede ser considerado crítico cuando es escaso y al mismo tiempo es fundamental para la economía moderna (van Oers and Guinée, 2016). Ejemplos muy conocidos de este tipo de recursos son las tierras raras, que se extraen en muy pocas zonas a nivel global y cuyo uso en nuevas tecnologías no ha hecho más que incrementarse, pero hay muchas materias primas incluidas en esta lista.

Los criterios más habituales para que un elemento o materia prima sea considerada crítica se basan en que son pocos países donde se concentra su extracción minera y/o

su procesamiento. La Agencia Internacional de la Energía describe como “tres cuartas partes del suministro de litio, cobalto y tierras raras, están controladas por solo tres países. Así, la República Democrática del Congo (RDC) y China produjeron aproximadamente el 70 % y el 60 % de la producción mundial de elementos de cobalto y tierras raras, respectivamente, en 2019.” Además, el nivel de concentración es aún mayor para las operaciones de procesamiento, donde China tiene una fuerte presencia en todos los ámbitos. La posibilidad de perturbaciones en las cadenas de suministro o de tensiones comerciales monopolísticas ponen en riesgo la necesaria transición energética vinculada al Cambio Climático.

A nivel mundial hay muchos países que cuentan con listas de materiales críticos, entre ellos destacan Estados Unidos, Japón, Reino Unido o Australia. En el caso de la Unión Europea, en 1975 ya empezó la preocupación por el abastecimiento de materias primas. Desde entonces, los costes crecientes de la energía y su alta dependencia de las importaciones de ciertos recursos son temas candentes en la agenda política.

En el año 2008 se creó la Iniciativa de las Materias Primas, que es la responsable de elaborar, entre otras tareas, informes periódicos sobre qué materias son críticas para la comunidad y cuál es el impacto en su industria. Entre sus resultados figura la publicación y actualización de una lista de materias primas críticas para la Unión Europea. El primer informe, hecho público en 2011, incluía catorce

materiales críticos y desde entonces la lista ha ido aumentando hasta los treinta que aparecen en informe de 2020 (European Commission, 2020). Entre ellos destacan, como no, las tierras raras, los elementos del grupo del platino además de otros como el titanio, el niobio o el cobalto.

Como se puede deducir de estas listas de materiales críticos, gran parte de estos elementos se emplean en tecnologías muy relevantes en la actualidad (indio, galio, germanio, litio, niobio, tántalo...). Por tanto, no es de extrañar que en casi todos los países que hacen estudios de este tipo nos encontremos los mismos elementos y que, de hecho, sean los mismos que nos encontramos también en todas las nuevas tecnologías.

Curiosamente, no es la escasez geológica la que domina la definición económico-geopolítica de material crítico, sin embargo, si un elemento es abundante, su minería y procesamiento están distribuidos por toda la corteza y no generarán problemas de suministro. Por el contrario, si un mineral es geológicamente escaso o se presenta con leyes de mina muy raras, lo que provoca que su procesamiento sea costoso, tarde o temprano, generará problemas de suministro esencialmente vinculados a costes crecientes de energía, agua, residuos, problemas ambientales, sociales y económicos tales como corrupción, minería ilegal o riesgo de actuaciones monopolísticas. Y lo que es más grave, una injusticia generacional que dejará una escasez futura del acceso a minerales, un planeta pleno de residuos y altamente contaminado.

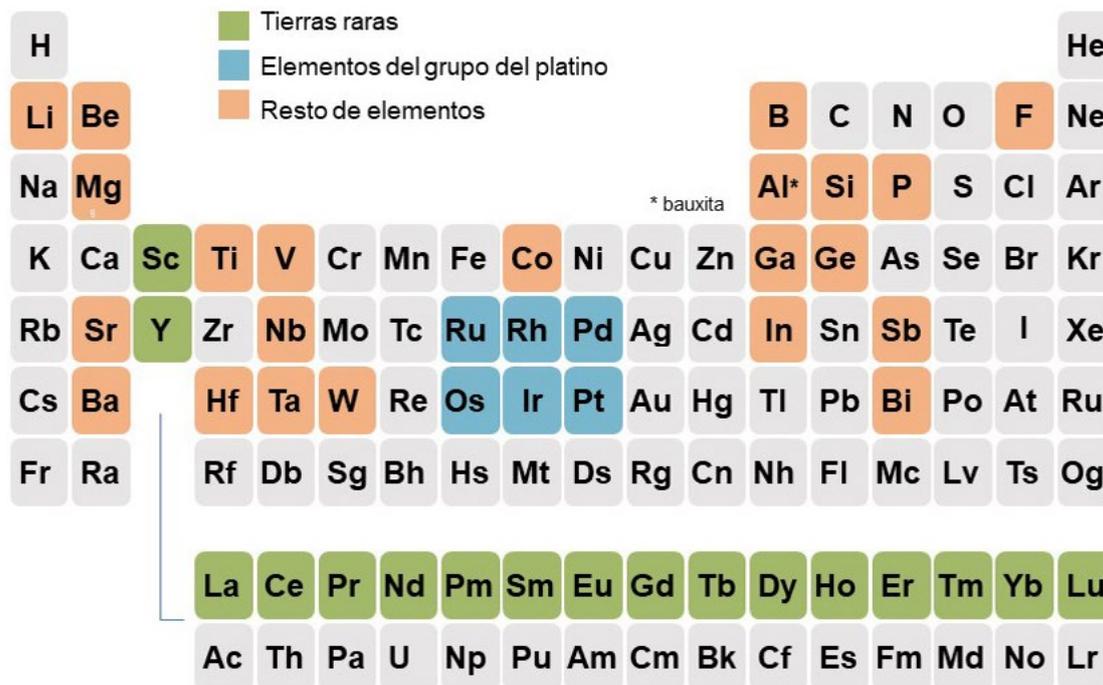


Tabla periódica donde aparecen resaltados los elementos considerados críticos para la Unión Europea en el informe hecho público durante el año 2020.



Entre 2007 y 2020 se vendieron casi catorce mil millones de teléfonos móviles. Foto Álvaro López.

Nuevos materiales para la transición digital, el caso de los teléfonos móviles

Un teléfono móvil no es solamente un aparato común, sino que es el equipo tractor e integrador de casi todas las nuevas tecnologías electrónicas y de comunicaciones. Esto es debido a su miniaturización y a su demanda mundial que genera economías de escala con costes constantemente decrecientes. De hecho, las aplicaciones del internet de las cosas están vinculadas a la sensorización y a la electrónica derivada de los teléfonos móviles. A su vez es el ejemplo más evidente del modelo de usar y tirar de nuestra sociedad en la que se incita a los usuarios a cambiarlo por otro equipo nuevo, con mayores prestaciones, en muchos casos innecesarias. Además, la propia miniaturización y su proliferación -una persona, un móvil-, hacen inviable la recuperación, por logística inversa, de la mayor parte de sus componentes más críticos.

Un teléfono móvil se compone de varias partes: pantalla, batería, cámara y placa base en el que está el circuito impreso que controla todas sus funciones, internacional-

mente se denomina PCB. De todas estas partes, esta es precisamente la fracción más heterogénea y complicada (Sahan *et al.*, 2019) ya que generalmente está compuesta por un 33 % de dispositivo semiconductor, 24 % de condensadores, 23 % de sustrato de circuito impreso, 12 % de resistencias y 8 % de otros. Así, las PCB se componen de materiales heterogéneos con una alta diversidad de elementos y concentraciones elementales: 44 % metales, 25 % óxidos metálicos y cerámicas, 26 % polímeros plásticos, 5 % bromo (E-Waste, 2013).

Muchos metales se emplean en todos estos componentes, desde el cobre para los cables, el oro, para bañar las placas al ser un metal muy buen conductor de la electricidad; la plata, que se emplea combinado con estaño en soldaduras; el tántalo, en los condensadores y distintas aleaciones que contienen de nuevo más tierras raras y que forman parte de los imanes permanentes que hay en el altavoz y en el micrófono. Aparte de la batería basada en iones de litio y muchos otros, como el galio, arsénico, fósforo, antimonio, silicio, plomo, hierro, zinc, niobio, titanio, platino, tántalo..., cada uno con una función muy concreta. En total nuestro teléfono móvil contiene más de treinta elemen-



Antiguas instalaciones de la mina de Rodalquilar (Níjar, Almería) de la que se extraían, entre otros elementos, oro y plata; cerró en la década de 1960.

Si queremos llegar a una transición energética completa y emplear solo fuentes de energía renovables y transportes basados en la electricidad, tanto la cantidad como la diversidad de materiales que se van a necesitar van a ser elevadas y pasaremos de una dependencia de los combustibles fósiles a otra multidependencia de materias primas críticas

tos químicos diferentes, un tercio de todos los elementos de la tabla periódica que tienen origen natural.

El peso medio de un teléfono móvil está entre los 140 y los 170 gramos, y gran parte corresponde a la carcasa y a la batería. Si quisiéramos recuperar, por ejemplo, el oro de los teléfonos, necesitaríamos una tonelada de teléfonos móviles para obtener unos doscientos gramos, ya que de acuerdo con la empresa Umicore, se necesitan 35 teléfonos móviles para conseguir un gramo de oro. Al precio actual del oro, en cada teléfono móvil hay oro por valor de 0,9 €. Pero pongamos esta cifra en perspectiva. En las minas resulta rentable extraer este preciado metal cuando hay más de cinco gramos de oro por tonelada de roca, aunque lo más habitual son las minas que tienen concentraciones entre ocho y diez gramos por tonelada. Es decir, en una tonelada de teléfonos móviles tendríamos más de veinte veces más que en las minas; hay más oro en nuestras montañas de teléfonos usados que en las minas que se explotan hoy en día.

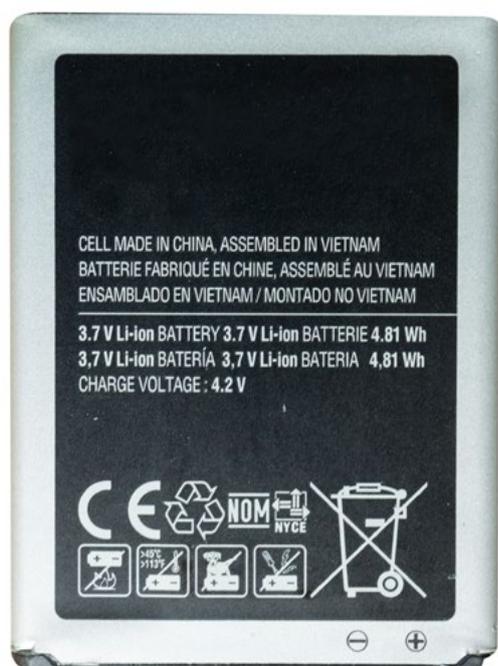
Haciendo un cálculo sobre los casi catorce mil millones de teléfonos acumulados entre 2007 y 2020 en el mundo (*Statista, Mobile phones between 2007 and 2021*), los elementos más abundantes incorporados en sus PCB fueron el cobre (98 000 toneladas), silicio (23 000 t), bromo (17 000 t) y aceros diversos (12 000 t). Sin embargo, algunos elementos, a pesar de tener menos cantidad incorporada en

estos componentes, son muy significativos con relación a su producción anual. Ejemplos de esta situación los encontramos en el paladio, se necesitaron 74 toneladas, mucho si lo comparamos con su producción anual en 2019, que apenas supera las doscientas toneladas (Garside, Pd, 2021). Lo mismo sucede con el tántalo, en esos teléfonos móviles hay unas 600 toneladas sobre una producción de 1 800 t (Garside, Ta, 2021), el galio, 46 t sobre 351 (USGS, Ga, 2021), el oro, 250 t sobre 3 200 (Garside, Au, 2021), el indio, con 25 t sobre 760 (Sönnichsen, In, 2021), el platino con 5,2 t sobre 170 (Garside, Pt, 2021) o la plata, con 750 t sobre 26 500 (Garside, Ag, 2021).

Los teléfonos móviles son la punta del iceberg, porque de acuerdo con el informe *The Global E-Waste Monitor 2020* la generación mundial de residuos electrónicos (RAEE) alcanzó el año pasado los 53,6 millones de toneladas (Mt), de los que 12 Mt corresponden a Europa. Se prevé que en 2030 se alcancen los 74 Mt con una tasa de duplicación de tan solo 15 años respecto a 2014.

Todos estos datos nos ayudan a destacar la importancia de reciclar estos elementos que podrían ser una importante fuente secundaria de materiales en el futuro para reducir el impacto ambiental mediante el uso de residuos de PCB y evitar parte de la extracción de minerales. Esto ayudaría a mitigar los impactos ambientales, que serán mayores en el futuro a medida que se agoten las minas actuales. Además, tal y como acabamos de ver, algunos de estos elementos como el tántalo, galio, indio y platino, son considerados críticos por la Comisión Europea debido a su importancia económica para el desarrollo tecnológico (European Commission, 2020). A esto hay que sumar que se espera que aumenten su demanda en un futuro próximo, por lo que fuentes secundarias de estos elementos podría ser crucial.

El gran problema del reciclado de estos residuos es de naturaleza entrópica. Es muy costosa la logística inversa para concentrar los teléfonos obsoletos y guardados en domicilios dispersos por todo el planeta. Y una vez concentrados, es muy complejo recuperar todos sus elementos, pues son el mejor ejemplo de “híbridos monstruosos” (McDonough, y Braungart, 2005). En efecto, la separación de, por ejemplo, el oro, deja un residuo mucho más irrecuperable que su antecesor, de tal forma que cada separación por procesos químicos se complica tecnológicamente y encarece la recuperación de los siguientes elementos. La falta de un ecodiseño apropiado es crucial pues permitiría desensamblar y reponer sólo aquellas partes obsoletas o deterioradas. El fin de vida de un componente nunca debería ser el fin de vida del equipo entero. Falta investigación, legislación, industrias del reciclado y concienciación de la sociedad de este fenomenal problema oculto en vergonzosos vertederos.



Las baterías de los móviles pueden contener, además de iones de litio muchos otros minerales, como el galio, arsénico, fósforo, antimonio, silicio, plomo, hierro, zinc, niobio, titanio, platino, tántalo. Foto: Álvaro López.

Materiales críticos en la transición energética

Siendo los teléfonos móviles un motivo serio de preocupación, son las energías renovables las que más van a demandar materiales críticos. Una potencia eléctrica de 1000 MW, instalada con 200 aerogeneradores de 5 megavatios (MW), necesita actualmente unas 160 000 toneladas de acero, 2000 de cobre, 780 de aluminio, 110 de níquel, 85 de neodimio y 7 de disprosio. La misma potencia instalada con gas natural como combustible requiere unas 5500 toneladas de acero, 750 toneladas de cobre y 750 de aluminio aproximadamente, es decir, unas 25 veces menos cantidad de metales que en el caso de la eólica (Valero, *et al.* 2018 a,b). Si tenemos en cuenta que en el mundo se producen unas diecisiete mil toneladas de neodimio metálico al año y que la tendencia consiste en instalar cada vez más aerogeneradores, estamos en una situación de riesgo, que podría obstaculizar los esfuerzos internacionales para abordar el cambio climático. El neodimio y el disprosio son los componentes esenciales de los imanes permanentes necesarios para la conversión de la energía mecánica de rotación en energía eléctrica en el generador.



Parque solar de Gelsa (Zaragoza).

La energía fotovoltaica no se escapa del problema pues las células convencionales necesitan cobre, estaño y plata además de silicio. Pero las nuevas más eficientes necesitan indio, galio y selenio, o telurio y cadmio dependiendo de la tecnología utilizada. Se espera de las tecnologías fotovoltaicas un mayor crecimiento que la de la propia eólica. Por contraste, la irreciclabilidad de los paneles solares es mucho mayor que la de los componentes metálicos de los aerogeneradores.

Asimismo, la intermitencia del viento o la cadencia día/noche hace necesario o un almacenamiento energético

masivo o una potencia instalada distribuida por el territorio unas tres veces mayor que la potencia de una central térmica convencional. El almacenamiento de energía es consustancial con la energía renovable. Si éste es por baterías, demandará masivas cantidades de litio, grafito y cobalto junto con níquel, manganeso y aluminio entre otros. De nuevo, algunos elementos muy escasos de la corteza terrestre. Si el almacenamiento es por hidrógeno, requerirá níquel y circonio para los electrolizadores y metales del grupo del platino para las células de combustible. En mayor o menor medida todas las energías renovables necesitan elementos no frecuentes en la naturaleza, ver por ejemplo (Valero An. y Valero Al., 2014).

El vehículo eléctrico y digital. La nueva movilidad

El concepto de vehículo ha cambiado radicalmente en lo que llevamos de siglo XXI. La electrónica ha desplazado a muchas funciones mecánicas, los nuevos materiales han disminuido el peso o aumentado sus prestaciones y los vehículos eléctricos sustituirán en gran parte a los motores térmicos. Ello lleva consigo la incorporación de componentes nuevos que utilizan actualmente hasta más de cincuenta elementos químicos.

En efecto, la nueva generación de automóviles va a necesitar una mayor cantidad de componentes electrónicos, en los que se emplean metales como el neodimio, el praseodimio y el disprosio, para los imanes permanentes, y otros elementos como la plata, el indio, el tántalo o el lantano (Ortego *et al.*, 2018). Pero en especial, requerirán elementos que son básicos en las baterías tales como el litio, el cobalto, el níquel o el manganeso.

En peso, el hierro es lógicamente el elemento que mayor relevancia tiene en un vehículo, al estar presente en multitud de componentes, seguido del aluminio y del cobre y tan solo una pequeña pero importantísima fracción del total lo componen elementos menores pero críticos. Aquellas piezas del vehículo donde se emplean estos elementos críticos son el motor, la caja de cambios, o la unidad de info-entretenimiento y es precisamente ahí donde volvemos a encontrarnos con los componentes eléctricos y electrónicos que tantos metales raros necesitan.

La gran mayoría de estos componentes críticos, cuando un vehículo se lleva a un centro autorizado de tratamiento para su destrucción y reciclado, se pierden. En estos centros tan solo se eliminan manualmente los elementos peligrosos (como aceites, combustibles, etc.), las ruedas y los catalizadores, entre otros. Después el vehículo va a parar a una fragmentadora, donde todos los metales terminan mezclados y tras la cual se separan las fracciones férricas de las no férricas, y del resto que suele ir a vertedero. Se

El proceso de reciclado en el sector del automóvil, y en general de cualquier producto, está diseñado para recuperar el mayor porcentaje posible del objeto en peso, pero se olvida de los metales menores cuya masa relativa es poco relevante y que sin embargo son elementos extremadamente críticos para nuestra sociedad actual

recicla más del 85 % del vehículo en peso, tal y como marca la legislación vigente, pero de los más de cincuenta elementos diferentes de los que está compuesto un vehículo, tan sólo el acero, aluminio, cobre, plomo y los metales del catalizador se reciclan.

¿Qué ocurre entonces con el litio, cobalto, manganeso, níquel, tierras raras, galio, indio, niobio, tántalo..., muchos de los cuales son considerados críticos para la Unión Europea y otras economías? La respuesta es que o bien acaban en el vertedero junto con el ASR (mezclas de plásticos, gomas y espumas), o bien mezclados en muy pequeñas cantidades en distintas aleaciones. Es decir, se están subciclando.

El subciclado puede definirse como el proceso de reciclado en el que el producto final tiene un valor inferior al producto inicial. Por ejemplo, el tántalo puede acabar en aleaciones de acero o aluminio en pequeñísimas cantidades. Este elemento valioso no confiere ninguna propiedad especial a la aleación; de hecho, incluso puede dar lugar a aceros con unos contenidos máximos de ciertos elementos demasiado elevados que impiden su uso en determinadas aplicaciones, por lo que habrá que añadir acero virgen para poder recuperarlo. Así que el tántalo, aunque no haya acabado en un vertedero, habrá perdido su funcionalidad original como material semiconductor usado principalmente en condensadores.

En un estudio reciente se detectó que, de diecisiete metales analizados, tan solo el platino de los convertidores catalíticos era reciclado de forma funcional, es decir, que se volvía a recuperar y emplear para la misma aplicación, el resto se “perdían” (Andersson *et al.*, 2017). Otro ejemplo lo vemos en el níquel, tan solo el 40 % del níquel contenido en automóviles se reutiliza en rollos de chapa de aceros por su contenido en níquel, un 40 % se subcicla junto a otros metales y el restante 20 % termina en vertederos (Nickel Institute, 2016).

En resumen, el proceso de reciclado en el sector del automóvil, y en general de cualquier producto, está diseñado para recuperar el mayor porcentaje posible del objeto en peso, pero se olvida de los metales menores cuya masa relativa es poco relevante y que sin embargo son elementos extremadamente críticos para nuestra sociedad actual.

La agricultura y la transición alimentaria

La biomasa que extraemos de los campos, no es solo materia orgánica compuesta esencialmente de carbono, hidrógeno y oxígeno. También contiene nitrógeno, fósforo, azufre, sodio, potasio, calcio, cloro, flúor, cobre, cobalto, manganeso, zinc, silicio, ..., y una inmensa cantidad de componentes orgánicos. Al usarla como combustible, se destruye esa riqueza mineral que se convierte en cenizas corroyendo y complicando los equipos de combustión. En consecuencia, los suelos se empobrecen en minerales que hay que reponer en forma de fertilizantes y enmiendas agrícolas, contribuyendo a agotar los recursos no renovables del planeta. Excepto para materiales altamente recalcitrantes, el consumo de biomasa para fines energéticos debería limitarse y devolver al suelo los elementos que se le han extraído en la cosecha o utilizarla como materia prima para un fin mejor como las biorrefinerías. La agricultura global da cuenta del 24 % de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).

El elemento crítico más esencial en la agricultura es el fósforo que en forma de ion fosfato es clave para la síntesis de ARN y ADN y por tanto para la vida, sin posibilidad de reemplazarlo por ningún otro elemento químico. Su conservación es estratégica para mantener la vida en este planeta. Afortunadamente, los suelos como receptores de todos los detritus son potenciales suministradores de fósforo, sin embargo, en vez de investigar cómo explotarlo, se recurre a la relativamente escasa roca fosfática que se

La producción de alimentos es insostenible. Utiliza nitrógeno sintético, fósforo mineral, un uso masivo de agua que representa el 70% del agua extraída de los acuíferos, arroyos y lagos, aplica intensivamente pesticidas, consume una energía fósil que multiplica por más de diez la energía de los alimentos que ingerimos (Torres *et al.* 2013), y en términos energéticos, se pierde en residuos más del 80% de la producción agroganadera antes de procesarse

utiliza para producir el fertilizante industrial. En lo que va de siglo XXI, la utilización de fertilizantes se ha incrementado en más de un 42 %. De acuerdo con Bouwman *et al.* (2016) entre 9 a 14 millones de toneladas que acaban en los océanos aumentando de esta forma su dispersión y perdiendo capacidad de ser aprovechado. Steffen *et al.* (2015) advierten que los límites planetarios de los ciclos de nitrógeno y fósforo se han sobrepasado y aun así sigue aumentando su consumo a unas tasas de entre 2 y 3 % anual. En el largo plazo y si la tendencia no cambia, el agotamiento de las minas de fosfatos podría provocar un colapso mundial en la alimentación humana.

La producción de alimentos es insostenible. Utiliza nitrógeno sintético, fósforo mineral, un uso masivo de agua que representa el 70 % del agua extraída de los acuíferos, arroyos y lagos, aplica intensivamente pesticidas, consume una energía fósil que multiplica por más de diez la energía de los alimentos que ingerimos (Torres *et al.* 2013), y en términos energéticos, se pierde en residuos más del 80 % de la producción agroganadera antes de procesarse. Bajo estas condiciones, la demanda de superficie arable, tendría que aumentar entre un 70 y un 110 % en 2050, lo que llevaría a cabo un proceso mundial de deforestación, aparte de una degradación creciente de los suelos fértiles. El 35 % del grano mundial se emplea para alimentar al ganado. Reducir el consumo de carne en un 10 % pero suministrando las mismas calorías, reduciría el consumo de combustibles fósiles en un 6 % y los requerimientos de superficie cultivada en un 13.5 %. Los alimentos desperdiciados en últimas etapas son críticas en el ahorro. Según la FAO y otros autores se podría aumentar el rendimiento de los cultivos por hectárea entre el 45 y el 75 % si se aplicara eficientemente la tecnología actual (FAO, 2017; Waggoner *et al.*, 2002).

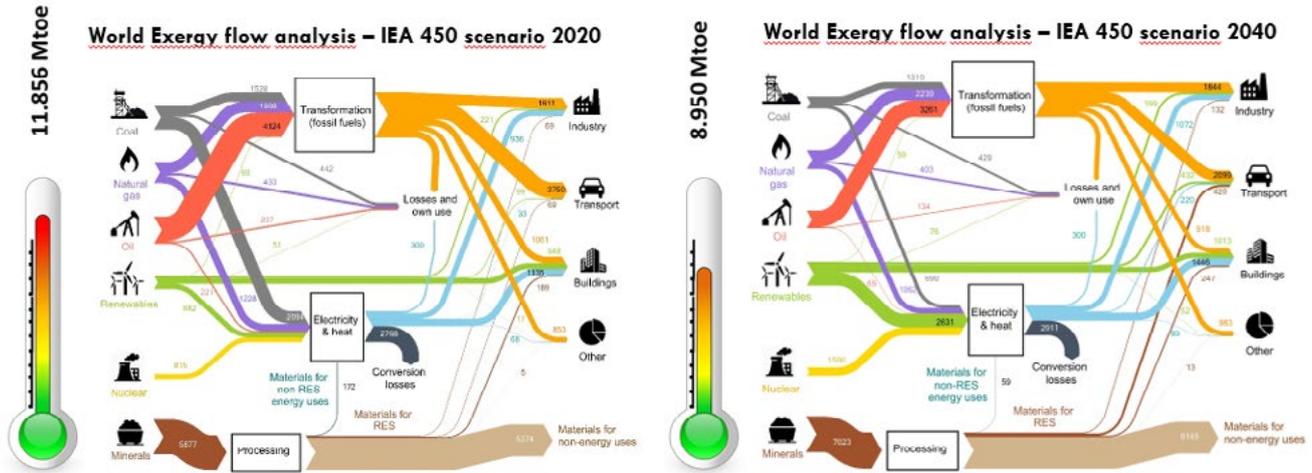
En definitiva, la biomasa para usos energéticos no solo está compuesta por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, sino por metales escasos que será necesario ahorrar para mantener la alimentación de las generaciones futuras. Es

decir, la transición alimentaria hacia la sostenibilidad requiere reponer todos los elementos químicos y nutrientes que se extraen de los suelos. Ello conduce al desarrollo de la Bioeconomía circular. Si no es así, estaremos sujetos a fertilizantes de origen mineral, especialmente los fosfatos cuya disponibilidad limitará la cantidad de alimentos que el ser humano podrá crear en el futuro, pues en este caso no habrá elemento químico sustitutivo. Y la producción de fertilizantes nitrogenados deberá realizarse con electricidad renovable, lo que la vincula a la transición energética, pues más del 2- 3 % de la energía primaria del planeta se utiliza para romper la molécula de nitrógeno mediante la síntesis Haber-Bosch (Valero, A. 2019).

Qué nos depara el futuro

Si queremos llegar a una transición energética completa y emplear solo fuentes de energía renovables y transportes basados en la electricidad, como acabamos de ver, tanto la cantidad como la diversidad de materiales que se van a necesitar van a ser elevadas, pasaremos de una dependencia de los combustibles fósiles a otra multidependencia de materias primas críticas, como pusimos de manifiesto en el artículo “Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways” (Valero *et al.*, 2018). Desde una perspectiva termodinámica, basada en una nueva propiedad que propusimos llamar “rareza termodinámica” que tiene en cuenta la calidad física de las materias primas en términos de escasez y energía necesaria para extraer y refinar los materiales, pudimos comprobar que los minerales, medidos en unidades de rareza, van a tener una presencia cuantitativa enorme en la transición energética, tal y como muestra la siguiente figura.

Teniendo en cuenta las necesidades del presente y futuras de estos elementos críticos y la composición de aerogeneradores, paneles solares y vehículos eléctricos actuales, se puede hacer una estimación de cuánto vamos a deman-



-25% Energía pero +16% minerales!

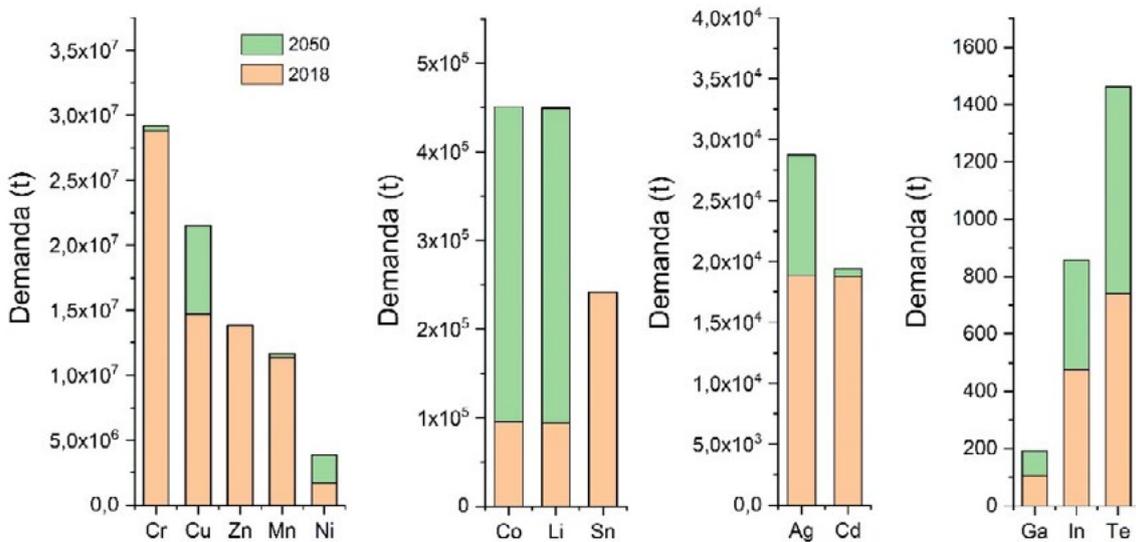
Análisis exérgico de la Transición Energética en el que se observa que el impacto de la rareza de los metales empleados en la transición energética superaría en 2040 a toda la producción eléctrica actual con combustibles fósiles. Fuente: Valero *et al.* (2018).

dar en el futuro. Hay trece elementos que, a primera vista, resultarán más importantes que el resto por los posibles problemas de suministro que podríamos tener, y son los que aparecen en la figura, entre ellos están el cadmio, el cobalto, el galio, el indio o el litio (Calvo *and* Valero, Al., 2021).

Aquellos que van a experimentar previsiblemente un mayor aumento en la demanda en las tecnologías renovables son el litio, el cobalto, el telurio, el níquel y el indio. En el

caso del indio y del telurio, habrá un aumento considerable en su demanda para la fabricación de paneles solares y el aumento del litio y cobalto se explica principalmente por su uso en las baterías de los vehículos eléctricos.

Muchos de estos elementos se producen hoy en día en países que tienen una situación que deja bastante que desear en cuanto a legislación medioambiental o derechos humanos y cuya futura extracción podría llegar a estar en riesgo al proceder de tan solo unos pocos países. Por ejemplo, el



Aumento de demanda de ciertos elementos, comparando la demanda de 2018 con la esperada en 2050 de las tecnologías renovables (manteniendo la demanda del resto de sectores constante).



Un informe de las Naciones Unidas estimó en cincuenta millones de toneladas la generación de residuos compuestos de aparatos eléctricos y electrónicos, sólo para el año 2019. De todas estas toneladas, apenas un 20% fueron sometidas a reciclado a través de los sistemas de gestión correspondiente. Foto Álvaro López.

principal productor a nivel mundial del telurio y del indio es China (más de 60 y 40 % del total, respectivamente) y como hemos visto, la República Democrática del Congo produjo más del 70 % del cobalto a nivel mundial en 2020 (USGS, 2020). Por otro lado, este consumo creciente va ligado a las dificultades de aumentar la producción, dado que, en algunos casos, como el cobalto, al ser subproductos, su producción viene limitada por la producción primaria de otro metal, en este caso el cobre o el níquel.

Hemos presentado estas previsiones desde 2014, año en el que publicamos el libro *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources*, (Valero, A y Valero, A, 2014). Muchos otros investigadores han planteado conclusiones similares, pero sin la aproximación termodinámica. Lo cierto es que ni las empresas ni los decisores políticos ni la propia OCDE han considerado este tema como un serio obstáculo al desarrollo de la transición energética.

Finalmente, ha sido la Agencia Internacional de la Energía, quien ha puesto de manifiesto este asunto con preocupación en su informe recién publicado “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Technologies”. Aunque sus análisis se centran en unos pocos minerales que consideran críticos, por fin se vincula la explosiva demanda de estos minerales con el impacto que puede tener sobre la lucha contra el cambio climático y la transición ecológica.

En resumen, este informe dice que “si el mundo siguiera la vía recomendada hacia el desarrollo sostenible, escenario SDS, la demanda en 2040 de litio, cobalto, níquel, cobre y tierras raras para las energías limpias totalizaría el 80 %, 65 %, 60 %, 42 % y 40 % respectivamente de la demanda mundial de estos elementos. En cualquier caso, una transición aún más rápida para llegar a un cero neto a nivel mundial para 2050, requeriría seis veces más insumos minerales en 2040 que en la actualidad. El litio

La transición energética hoy tiene su talón de Aquiles en las materias primas críticas porque se espera una gran volatilidad con subidas agudas de precios, así como inseguridades en las cadenas de suministro

tendrá un crecimiento más rápido, con un aumento de la demanda de más de 40 veces en la SDS para el 2040, seguido de grafito, cobalto y níquel (alrededor de 20-25 veces). La expansión de las redes eléctricas significa que la demanda de cobre para líneas eléctricas aumentará más del doble durante el mismo período”.

La magnitud de la transición energética es tan enorme y urgente que para satisfacer las necesidades energéticas limpias del planeta habría que multiplicar, por ejemplo, más de trescientas veces la potencia eólica actual.

Conclusiones

La dependencia de materias primas críticas y de su extracción primaria en las minas podría poner en jaque el futuro de la transición energética. Evitar la dependencia de los combustibles fósiles implicará aceptar la dependencia de muchos metales y elementos considerados críticos.

Europa y España dependen de China, pero no solo en cuanto a materias primas, también en cuanto a tecnologías. Casi todo se produce y diseña allí. Actualmente estamos viendo problemas de desabastecimiento de semiconductores formados por algunos de estos elementos que han interrumpido o ralentizado la producción de automóviles y electrodomésticos. El resultado social es que muchos trabajadores pueden perder su empleo.

La transición energética hoy tiene su talón de Aquiles en las materias primas críticas porque se espera una gran volatilidad con subidas agudas de precios, así como inseguridades en las cadenas de suministro.

La llamada basura electrónica no debe verse como un problema, sino como una oportunidad. Sin embargo, para que esto sea así, es necesario contar con ciertas tecnologías específicas de recuperación. España debe asumir este problema promoviendo empresas de reciclaje funcional, es decir, aquél en el que el elemento reciclado deba volver a ser utilizado por la misma tecnología de la que provie-

ne. Es urgente promover con fondos público-privados al menos una empresa que sea capaz de recuperar los elementos menores pero esenciales para la transición energética. Esto debe de ir acompañado de canales sólidos de recolección de todas las tecnologías intensivas en este tipo de recursos y aumentar la trazabilidad de los residuos. Para ello, será esencial invertir en I+D+i en todas las fases del ciclo de vida de los elementos críticos, así como en la sustitución de materiales raros por otros más abundantes. Reactivar la minería primaria y la minería residual para la recuperación en relaves y balsas de decantación, el eco-diseño industrial para hacer más asequible el reciclado, la recuperación de RAEE en electrónica de consumo, en baterías y equipamiento obsoleto de energías renovables y especialmente en la recuperación de metales críticos en desguaces de automóviles. El problema es tan acuciante, que la Agencia Internacional de la Energía y muchos gobiernos están planteando como medida estrella, el aprovisionamiento estratégico de reservas de minerales críticos como se hace actualmente con el petróleo. Analizando el panorama, la medida estrella debería estar más bien enfocada a repensar la economía y reducir drásticamente el consumo de recursos.

La sociedad debe ser informada de la criticidad de este problema, pero a su vez las poblaciones afectadas por nuevas minas deben ser respetadas y compensadas adecuadamente, con una visión intergeneracional. El lema “Recursos por Desarrollo” debe ser una prioridad política, en vez de esquilmar de nuevo a la España vaciada. La legislación en materias primas críticas es fundamental y la cooperación con países en desarrollo para generar nuevos suministradores debe ser una política central de la Unión Europea. Europa y el mundo desarrollado no evitarán los efectos del cambio climático por querer producir de forma limpia toda su energía, si no se plantean en profundidad su dependencia de las materias primas críticas. ✿

Bibliografía

Andersson, M., Söderman, M., Sandén, B.A., 2017. Are scarce metals in cars functionally recycled? *Waste Manag.* 60, 407–416.

Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., Lassaletta, L., Van Apeldoorn, D. F., Van Grinsven, H. J. M., Zhang, J., & Ittersum Van, M. K. (2017). Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Scientific Reports*, 7 (December 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep40366>

Calvo, G., Valero, Al., 2021. Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environ. Dev.* DOI:10.1016/j.envdev.2021.100640

European Commission, 2020. Study on the EU’s list of Critical Raw Materials (2020). Final Report. Garside M. Palladium mine production worldwide by country 2010-2020 – Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/273647/global-mine-production-of-palladium> . [12.3.2021].

- E-waste 2 February 2013 Edition 1: Disponible en <https://www.thersa.org/globalassets/pdfs/reports/e-waste.pdf> [12.3.2021]
- FAO. (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura, Tendencias y desafíos, 131. Retrieved from www.fao.org/3/a-i6583e.pdf
- Garside M. Global tantalum production 2010-2019 – Available at: <https://www.statista.com/statistics/1009169/global-tantalum-production/>. [12.3.2021].
- Garside M. Global production of gold mines 2005-2020. – Available at: <https://www.statista.com/statistics/238414/global-gold-production-since-2005/>. [12.3.2021].
- Garside M. Palladium mine production worldwide by country 2010-2020 – Available at: <https://www.statista.com/statistics/273647/global-mine-production-of-palladium/>. [12.3.2021].
- Garside M. Global platinum mine production by country 2010-2020 – Available at: <https://www.statista.com/statistics/273645/global-mine-production-of-platinum/> [12.3.2021].
- Garside M. World silver mine production 2005-2020. – Available at: <https://www.statista.com/statistics/253293/global-gold-production-since-2005/> [12.3.2021].
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Quinto informe de evaluación (2014) http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- McDonough, W., Braungart, M., (2005). Cradle to cradle. Rediseñando la forma en que hacemos las cosas de la cuna a la cuna. ISBN 13: 9780099535478
- Nickel Institute, 2016. Recycling of nickel-containing materials in automobiles. Disponible en <https://nickelinstitute.org/about-nickel/nickel-and-transport/>
- Nijman, S., 2019. UN report: Time to seize opportunity, tackle challenge of e-waste. – Available at: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-report-time-seize-opportunity-tackle-challenge-e-waste> [12.3.2021].
- Ortego, A., Valero, Alicia, Valero, Antonio, Restrepo, E., Vehicles and Critical Materials A Sustainability Assessment Using Thermodynamic Rarity. March 2018; Journal of Industrial Ecology 22(4). DOI:10.1111/jiec.
- Sahan M, Kucuker MA, Demirel B, Kuchta K, Hursthouse A. Determination of metal content of waste mobile phones and estimation of their recovery potential in Turkey. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019 Mar 1;16(5).
- Sönnichsen N. Global indium production 2014-2019 – Available at: <https://www.statista.com/statistics/1060401/global-refinery-production-of-indium-by-country/>. 2021. [12.3.2021].
- Statista: Mobile phone sales between 2007 and 2021. – Available at: <https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/> [12.3.2021].
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... Hector, A. (2015). Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- The Global E-Waste Monitor 2020” by GESP,UNU.ITU and ISWA. – Available at: www.globalewaste.org y <http://ewastemonitor.info> [12.3.2021].
- Torrubia, J., Valero, A., Valero, Al., Assessment of the thermodynamic rarity of mobile phones PCB's. ECOS 2021 Conference, Art 278, Taormina, Italy
- Torres C., Valero A., Valero Al., (2013) Exergoecology as a tool for ecological modelling. The case of the US food production chain. Ecological Modelling 255 (2013) 21–28
- USGS, 2020. Mineral Commodity Summaries 2020. United States Geological Service.
- U.S. Geological Survey. Global gallium production. – Available at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-gallium.pdf>. [12.3.2021].
- Valero, A.; Valero, Al. (2014) Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources. World Scientific Publishing. Singapore.
- Valero Al., Valero A., Calvo G., Ortego A., Ascaso S., Palacios L-L., Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways. Energy 159 (2018) 1175-1184.
- Valero, Al., Valero, A., Calvo, G., Ortego, A. (2018). Material bottlenecks in the future development of green technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 178–200.
- Valero, A. (2019), Materiales más allá del Cambio Climático. Capítulo de la trad. española del libro Come On!, por Ernst Ulrich von Weizsäcker, Anders Wijkman, et al. Ed. Planeta, ISBN 987-84.234-3066-6
- van Oers, L., Guinée, J., 2016. The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. Resources 2016, 5(1), 16; <https://doi.org/10.3390/resources5010016>.
- Waggoner, P. E., & Ausubel, J. H. (2002). A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(12), 7860–7865. <https://doi.org/10.1073/pnas.122235999>
- World Economic Forum, 2019. A new circular vision for electronics. Time for a global reboot. In support of the United Nations E-waste coalition. http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf Global material requirements for the energy transition. [12.3.2021].