

Límites minerales de la transición energética

Alicia Valero Delgado

Instituto CIRCE-Universidad de Zaragoza

¿De qué está hecho un panel fotovoltaico? ¿Y un aerogenerador? ¿Qué materiales contienen las baterías que permitirán electrificar los vehículos? ¿De dónde provienen estas materias primas? ¿Hay suficientes materiales en la corteza terrestre para abastecer el crecimiento necesario de las renovables y frenar así el cambio climático? ¿Qué porcentaje de materiales se está reciclando actualmente, es suficiente? ¿Cuál es la relación energía-materiales-medio ambiente?

La primera clase que di en la Universidad de Zaragoza sobre cambio climático fue en el año 2003. Por aquél entonces, cuando preguntaba a mis alumnos si habían oído hablar de ello, la respuesta general era que no. Quince años después, sigo impartiendo una clase sobre cambio climático, pero con la diferencia de que ahora todos los alumnos conocen el problema, aunque no son conscientes de la gravedad del mismo. Así que me pongo una corbata, y actúo como si fuese el secretario general de las Naciones Unidas y simulamos entre todos, una conferencia sobre cambio climático. Divididos en tres grupos representando a países ricos, emergentes y pobres, los alumnos deben llegar a acuerdos de reducción de emisiones con el objetivo de no superar los 2°C de aumento de temperatura global del planeta. A continuación simulamos la temperatura del planeta gracias a un magnífico software desarrollado por el MIT denominado [C-Roads](https://croads.worldclimate.climateinteractive.org/unsupported.html)¹. ¡Qué sorpresa se llevan cuando ni en la tercera ronda de negociaciones logran no sobrepasar el límite planteado! Luego se dan cuenta, jugando con el programa, que la solución está en actuar inmediatamente y de forma drástica. En efecto, para evitar superar los 2°C o incluso menos, tal y como se estableció en los Acuerdos de París en el 2015, es necesario descarbonizar la economía lo antes posible. ¿Y cómo lograr esto? Fundamentalmente, realizando una transición energética en la que se pase de una economía basada en los combustibles fósiles, a otra basada en las energías renovables, o sea, ir hacia lo que algunos llaman una “economía verde”.

¹ <https://croads.worldclimate.climateinteractive.org/unsupported.html>

La energía eólica, la fotovoltaica, la solar termoeléctrica, la biomasa, o el coche eléctrico no emiten CO₂ (o tienen emisiones neutras como es el caso de la biomasa). Sin embargo, nos olvidamos de un aspecto importante: para construirlos, son necesarios muchos materiales. Pensemos que por ejemplo para producir 1 gigavatio (GW) de potencia eléctrica que es la equivalente a la que podría suministrar una central térmica de gas natural, se necesitan 200 aerogeneradores de 5 megavatios (MW) o bien 1000 aerogeneradores de 1 MW. Esto implica el uso de unas 160.000 toneladas de acero, 2000 de cobre, 780 de aluminio, 110 de níquel, 85 de neodimio y 7 de disprosio para su fabricación². La central térmica en cambio habrá necesitado principalmente de 5500 toneladas de acero, 750 toneladas de cobre y 750 de aluminio aproximadamente, o lo que es lo mismo, en peso, unas 25 veces menos de metales que en el caso de la eólica. Dicho esto, la cantidad de materiales no es el aspecto más preocupante del problema, sino la variedad de los mismos. Mientras que en la central térmica entran en juego metales convencionales y relativamente abundantes, las nuevas tecnologías son altamente voraces en muchos elementos distintos, algunos de ellos escasos en la naturaleza o bien controlados por unos pocos países. En la siguiente figura podemos ver la variedad de materiales necesarios para producir algunas de estas tecnologías limpias.

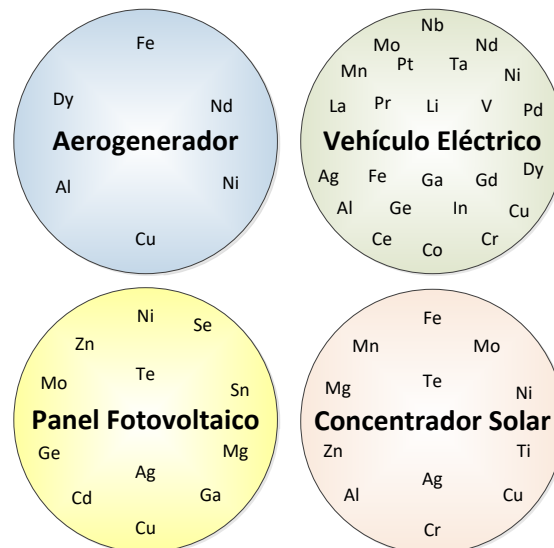


Figura 1. Algunos de los elementos que se emplean para la fabricación de tecnologías verdes (basado en Valero, A., Valero, A., Calvo, G., & Ortego, A. (2018). Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 178–200.)

² Según los estudios que realizamos en el Instituto CIRCE para la siguiente publicación: Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo, Abel Ortego, Sonia Ascaso, Jose-Luis Palacios. Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways. *Energy* 159 (2018) 1175-1184.

Así que el aerogenerador es en realidad una de las tecnologías renovables que menos variedad de materiales necesita para su fabricación. Por lo tanto, más que una economía verde, podríamos hablar de una “economía multicolor”, ya que las nuevas tecnologías están empleando prácticamente toda la tabla periódica de los elementos. Es probable que muchos de los lectores de este artículo no hayan oído hablar de estos elementos, pero estoy convencida de que al igual que pasó con el cambio climático, pronto las tierras raras, el indio, el litio o el telurio serán bien conocidos por la sociedad. Hablemos de algunos de ellos.

Empecemos por las tierras raras. Se denomina así a un conjunto de 17 elementos de la tabla periódica compuesto por los 15 lantánidos más el itrio (Y) y el escandio (Sc). Al grupo de las tierras raras pertenecen varios elementos esenciales para el desarrollo de las nuevas tecnologías y las energías renovables, como son el neodimio (Nd) y el disprosio (Dy) en los imanes permanentes en la eólica. Además, encontramos cada vez mayor número y variedad de tierras raras en iluminación eficiente (fluorescentes y LEDs), en vehículos o en electrónica. No es de extrañar por tanto que su producción se haya multiplicado por 7 en los últimos 40 años. Estos elementos se extraen fundamentalmente de dos minerales, la monacita y la bastnasita y a pesar de su nombre, no son especialmente raros en la naturaleza, aunque requieren de mucha energía para poder obtener los elementos por separado. Otro problema fundamental es que su producción está hoy día controlada en más de un 80% por China, país que en 2011 hizo temblar a muchos gobiernos cuando limitó drásticamente sus exportaciones a 24000 toneladas frente a la demanda exterior que se cifró en unas 55000 – 60000 toneladas. ¿Por qué exportar tierras raras cuando pueden exportar aerogeneradores cuyo valor añadido es muchísimo mayor? Periódicos como el Wall Street Journal o el Financial Times ya alertaron al mundo de que, al controlar la llave de la exportación, China llegará a controlar el desarrollo global de las nuevas tecnologías sostenibles.

Otros dos elementos de los que se va a oír hablar mucho en los próximos años son el litio y el cobalto. Ambos elementos son fundamentales para el desarrollo de las baterías eléctricas. En veinte años, la producción de cobalto y litio se ha multiplicado por cinco y ocho, respectivamente. En el 2017, el precio del cobalto se duplicó en menos de un año y hoy se ha convertido en uno de los elementos más críticos en el sector de la automoción que está apostando fuertemente por el vehículo eléctrico. El litio se obtiene de dos fuentes principales: de los salares chilenos y del espodumeno, un mineral que se extrae

y exporta fundamentalmente en Australia. Aunque preocupante, el litio no parece presentar tantos problemas de suministro como el cobalto, que se encuentra en su mayoría en el Congo y cuya extracción es cuanto menos éticamente cuestionable.

El indio (In), galio (Ga) y el telurio (Te) son otros tres elementos clave para las nuevas tecnologías y la energía solar fotovoltaica. El indio y el galio se encuentran en la tecnología fotovoltaica de capa fina llamada CIGS (por sus siglas cobre-indio-galio-selenio), mientras que el Te en las células de telururo de cadmio (CdTe). Ambas tecnologías ofrecen las mejores prestaciones en términos de eficiencia del mercado y es por ello que su producción va a ir en aumento en los próximos años. El problema está en que estos elementos son muy escasos en la corteza terrestre. Hoy en día se obtienen de los barrillos del refinado del zinc, cobre y del aluminio, principalmente. Al año, la producción de estos elementos juntos no supera las 1000 toneladas y sin embargo cada vez son más habituales en nuestros hogares. La tecnología táctil se debe al ITO (óxido de indio y estaño en sus siglas en inglés), un material semiconductor presente en teléfonos móviles o tabletas electrónicas. El indio y galio están también presentes en las tecnologías LED, confiriendo distintos colores a la iluminación eficiente.

Hablemos ahora del fósforo (P). Este elemento es mucho más conocido que los anteriores porque es un nutriente esencial en la agricultura y por tanto en los cultivos energéticos. Junto con el nitrógeno (N) y el potasio (K), es el ingrediente básico de los fertilizantes. Mientras que el potasio y el nitrógeno son abundantes en la naturaleza, la roca fosfórica (mineral de donde se extrae el fósforo) es escasa. Los nutrientes, al contrario que el resto de elementos, no pueden sustituirse. ¡A una planta no podremos alimentarla con plomo o cobre cuando escasee el fósforo! Por otra parte, los biocombustibles pueden entrar en competición por los nutrientes y el suelo con otros cultivos para la alimentación de una población creciente y que va ritmo de alcanzar los 10.000 millones en el año 2050. Esto significa que el fósforo tiene muchas papeletas para que se convierta en el próximo "oro verde". Además, su producción se limita a unos pocos países. En el Sáhara Occidental se encuentran las mayores reservas de roca fosfórica a nivel mundial. ¿Podemos entender ahora quizás mejor la razón de los conflictos en esa zona inhóspita del planeta? Y sin embargo las oportunidades de reciclado de fósforo son inmensas ya que todos los seres vivos estamos hechos de fósforo y los animales miccionamos y excretamos fósforo.

En efecto, una de las grandes diferencias que hay entre los combustibles fósiles y los minerales no energéticos es que mientras los primeros desaparecen al quemarlos, convirtiéndose en CO₂ y agua, los segundos no se pierden. El capital mineral de cada elemento en la tierra es constante y en teoría podríamos usarlo una y otra vez sin que se perdiese. Y entonces, ¿por qué no se hace? De acuerdo con un informe de las Naciones Unidas³, el porcentaje de reciclado de muchos de los nuevos elementos esenciales para la descarbonización de la economía es inferior al 1%. Los esfuerzos de reciclado, excepto para los metales tradicionales como el hierro, cobre o aluminio, se han centrado en evitar contaminar, más que en recuperar los materiales valiosos que contienen. De hecho, el metal que hoy en día tiene la mayor tasa de reciclado es el plomo, que se encuentra principalmente en baterías de coche y para las cuales hay una legislación de reciclado muy estricta. Los tubos fluorescentes también deben someterse a un proceso de reciclado, pero no para obtener los elementos valiosos que contienen como las tierras raras y los fósforos que no se reciclan, sino para evitar que el mercurio que contienen contamine el entorno. El resultado es que los metales menores, pero valiosos, acaban o bien en vertederos o bien subciclados con otros metales como el acero y perdiendo por tanto su funcionalidad original.

Al contrario que los combustibles fósiles, los materiales no se pierden, pero se diluyen, se dispersan. Este hecho provoca que la energía necesaria para recuperar de nuevo el elemento puro de la dilución sea tan elevada, que sale más rentable desechar la mezcla. Esto no es más que una consecuencia del segundo principio de la termodinámica, que nos dice que mezclar es uno de los procesos más irreversibles que hay y volver al estado inicial es costosísimo en comparación con el proceso de mezcla. O sea que, en la práctica, cuando un teléfono móvil por ejemplo acaba en el vertedero, los más de 30 elementos distintos de los que está compuesto, incluyendo miligramos de oro, platino, indio, galio, cobalto, etc. acaban perdiéndose para siempre.

Afortunadamente las tasas de reciclado van en aumento y las tecnologías de reciclado, aunque todavía siguen en pañales, están desarrollándose. Pongamos el caso del aluminio. Desde el año 1950, las tasas de reciclado han aumentado a ritmo de un 0,25% anual. Esto ha provocado una reducción neta de producción primaria de aluminio (extracción de la corteza). A este ritmo, se necesitarán unos 250 años para alcanzar una supuesta eficiencia del 98%. Sin embargo, si la demanda de aluminio sigue aumentando cada año en un 2%,

³ UNEP (2011). Recycling Rates of Metals, A Status Report. United Nations Environmental Programme. www.resourcepanel.org/

haciendo un simple cálculo exponencial, nos daríamos cuenta de que la demanda se duplicaría cada 40 años y aunque alcanzásemos la cifra de reciclado del 98% (el 100% es imposible debido a restricciones físicas del segundo principio), la extracción seguiría duplicándose cada 35 años. Por tanto, mientras la demanda aumente año tras año, ni aun reciclando cerca del 100% de material, podríamos prescindir de la extracción.

Si analizamos globalmente la extracción de los distintos minerales a lo largo del último siglo, nos damos cuenta de que, como el aluminio, la tendencia general ha sido hacia un aumento exponencial (Figura 2).

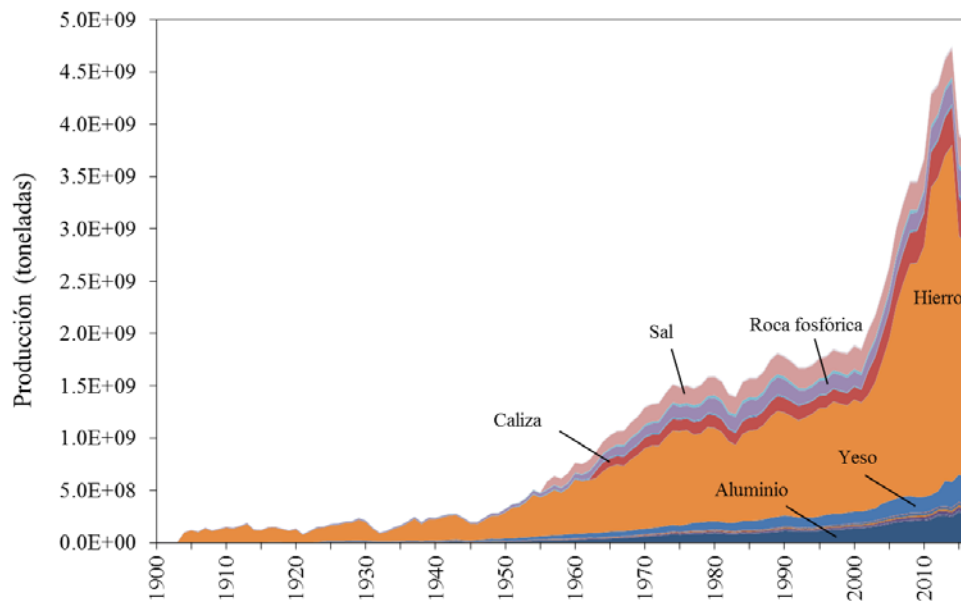


Figura 2. Producción acumulada mundial total de 48 minerales y elementos desde 1900 hasta 2016. En la figura solamente figuran los nombres de aquellos minerales que tienen un mayor peso. Fuente: elaboración propia.

Una consecuencia de ello es que las minas se agotan. Conociendo la cantidad de recursos disponibles del planeta y la evolución de la extracción, se puede estimar a través de las denominadas “curvas de Hubbert”, el año en que la demanda de minerales supere a la oferta (o el pico). Este modelo que se aplicó con éxito a los yacimientos de petróleo en el sur de EEUU por su creador Marion King Hubbert en los años 50, lo hemos aplicado nosotros a los minerales, tal y como muestran las Figuras 3 y 4. Aunque son modelos teóricos y aproximados, pueden servir para establecer tendencias y alertar de posibles escaseces si se continua con los ritmos de producción actuales. Como muestran las figuras, a este ritmo y considerando los recursos minerales publicados por el United States Geological Survey, el pico de muchos minerales se alcanzaría antes de que acabase este siglo.

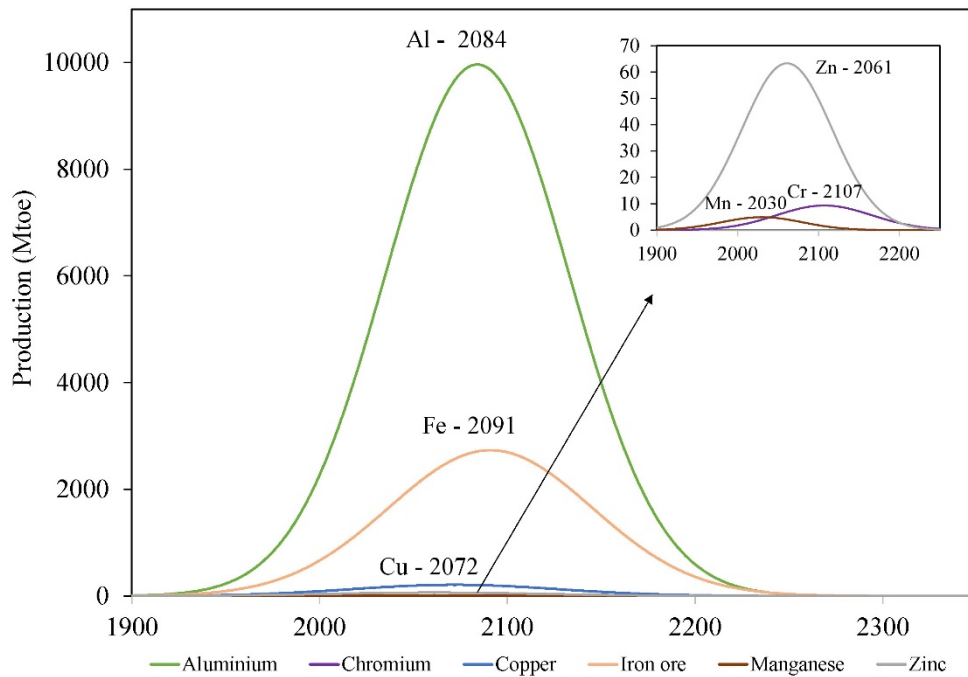


Figura 3. Picos máximos de producción para los seis minerales más producidos a nivel mundial. Fuente: Calvo, G.; Valero, A.; Valero, A. (2017) Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources. *Resources, Conservation and Recycling*, 125: 208-217.

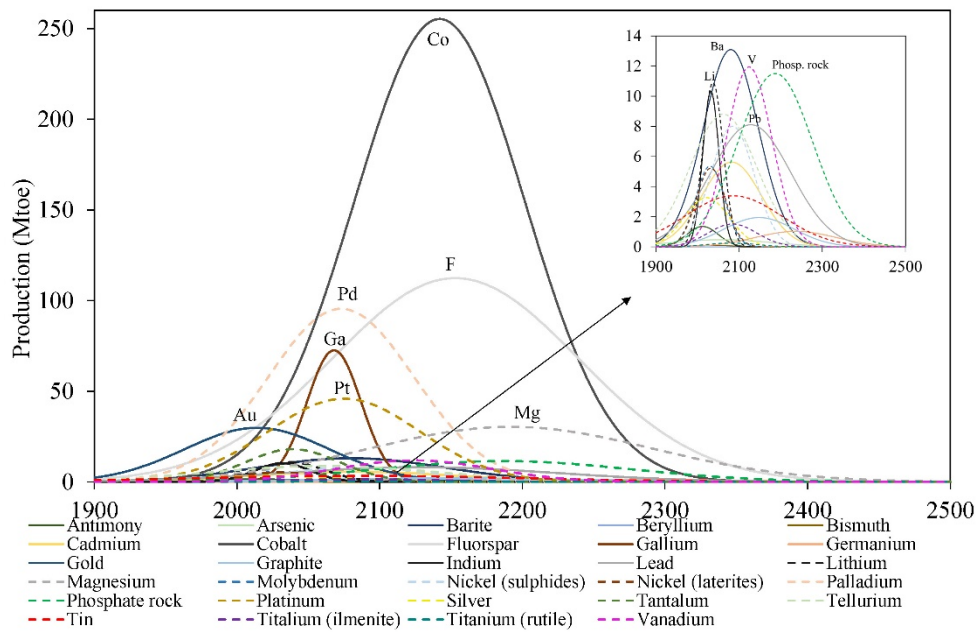


Figura 4. Picos máximos de producción para otros minerales. Fuente: Calvo, G.; Valero, A.; Valero, A. (2017) Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources. *Resources, Conservation and Recycling*, 125: 208-217.

Al agotamiento de las minas hay que añadirle otro factor importante. Si las menas más ricas se agotan, van quedando las menos concentradas para las que se necesita más energía por unidad de material extraído. En la figura 5 se muestra el aumento de energía consumida en función de la concentración de cobre en un centenar de minas de todo el mundo. Aquí de nuevo entra en juego el segundo principio de la termodinámica. A medida que las minas van agotándose, la energía de extracción aumenta exponencialmente. Como ocurre en el reciclado, cuanto más diluido está el metal, mayor es la energía de separación. Es cierto que, gracias a mejoras tecnológicas, somos capaces de extraer más eficientemente los recursos minerales de la tierra. Lamentablemente las mejoras tecnológicas deben ir a la par de las reducciones en leyes de mina y este no es el caso. Así que, con el aumento de energía, también hay asociado un aumento en el impacto ambiental. Además de los inmensos “agujeros” que se hacen en la corteza en la minería de cielo abierto, las emisiones de CO₂ se disparan, ya que gran parte de la energía empleada en la minería hoy en día es en forma de diésel para transportar los miles de toneladas de roca extraída. Si actualmente la minería es responsable según la Agencia Internacional de la Energía, de entre un 8 y un 10% del consumo de energía primario mundial y emisiones de CO₂, es probable que, en el futuro, esta tasa aumente considerablemente.

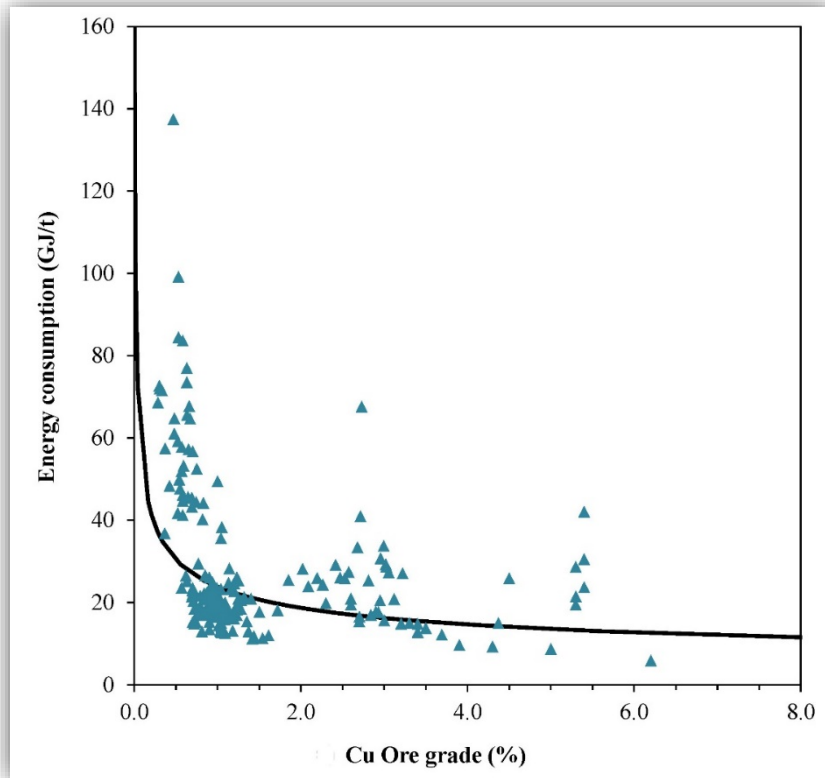


Figura 5. Consumo energético global de cobre frente a la concentración media en la mina. Fuente: Calvo, Mudd, Valero and Valero (2016). Resources 5(4), 36; <https://doi.org/10.3390/resources5040036>

Si analizamos ahora la demanda esperada de materiales hasta el 2050 necesarios para desarrollar la fotovoltaica, eólica, la solar de alta temperatura o el vehículo eléctrico, teniendo en cuenta las proyecciones realizadas por la Agencia Internacional de la Energía en su escenario 450 (que implica no superar los 2°C de aumento global de temperatura), podemos detectar posibles cuellos de botella que aparecerían para algunos elementos clave. Para ello, en un estudio realizado en colaboración con mis colegas en el Instituto CIRCE, establecimos tres tipos de riesgo: muy alto, alto y medio; correspondiendo la categoría “muy alto” a que la demanda acumulada superará los recursos disponibles, la categoría “alto” a que la demanda acumulada superará las reservas y la categoría “medio” a que la demanda anual sobrepasará la producción anual esperada calculada con el modelo de Hubbert. La diferencia entre recursos y reservas se encuentra en que los primeros son cantidades de minerales potencialmente valiosos, y por los cuales existen perspectivas razonables para una eventual extracción económica; las reservas en cambio representan a aquellas cantidades de minerales que son

valiosas y son legal, económica y técnicamente viables de extraer hoy en día. Entonces las reservas son dinámicas y suelen aumentar a medida que se encuentran nuevos depósitos minerales o el aumento de los precios hace que determinadas minas no rentables en el pasado, lo sean en el presente. Los recursos sin embargo son más estáticos y son considerablemente mayores a las reservas.

Considerando las “tecnologías limpias” analizadas (ver Tabla 1), los vehículos eléctricos son aquellos que más materiales críticos demandarán, estando las posibles limitaciones centradas en los elementos necesarios para las baterías (litio, cobalto, níquel). Además, podría haber otras limitaciones a la hora de fabricar aleaciones de acero que necesiten cromo o molibdeno, y también para la fabricación de algunos equipos electrónicos. Por elemento, aquellos que presentan un mayor riesgo de suministro en el futuro son: telurio, plata, cadmio, cobalto, cobre, galio, indio, litio, manganeso, níquel, estaño y zinc.

	Tipo de riesgo	Tecnología afectada			
		Eólica	Fotovoltaica	Termosolar	Vehículos
Ag	Medio alto		x	x	x
Cd	Alto		x		
Co	Medio alto				x
Cr	Alto			x	x
Cu	Alto	x	x	x	x
Dy	Medio	x			
Ga	Alto		x		x
In	Medio alto		x		x
Li	Medio alto				x
Mn	Medio alto			x	x
Mo	Medio		x	x	x
Nd	Medio	x			x
Ni	Medio alto	x	x	x	x
Se	Medio		x		
Sn	Medio alto		x		
Ta	Medio				x
Te	Muy alto		x		
Zn	Alto	x	x		

Tabla 2. Clasificación de elementos en función de su riesgo de suministro junto a la lista de sectores “verdes” en los que se emplea. Fuente: Valero, A., Valero, A., Calvo, G., & Ortego, A. (2018). Material bottlenecks in the future development of green technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 178–200.

¿Cómo evitar entonces estos problemas detectados en el suministro de materias primas clave? En el lado de la demanda, habrá que apostar fuertemente por la desmaterialización, la sustitución de materiales críticos por otros más abundantes y la reutilización y reciclado. Para ello, será imprescindible diseñar los productos pensando en su fin de vida, haciéndolos robustos, modulares y fácilmente desensamblables y así promover la denominada “economía circular”. Esto permitirá reducir drásticamente los residuos, reutilizar y reparar los productos dándoles una segunda, tercera, cuarta... vidas y recuperar los materiales valiosos para reintroducirlos en el sistema productivo. En este sentido, habrá que aprender de la naturaleza, que no produce residuos y vive y se regenera exclusivamente de la acción del sol. Dicho esto, y conociendo las limitaciones que nos impone el segundo principio de la termodinámica en cuanto a la imposibilidad de cerrar totalmente los ciclos, la principal medida a adoptar debe ser la reducción del consumo, abriendo paso a nuevos modelos económicos que fomenten el “uso” más que la “posesión”. Una economía de los servicios en donde las empresas no vendan el producto sino su función. De esta forma, los objetos serán más robustos y al final de su vida, los productores se encargarán de recuperar sus materiales valiosos y reintroducirlos en el sistema de forma más eficaz.

En el lado de la oferta, si la demanda sigue aumentando, no podremos prescindir nunca de la minería. Esto hará que nos enfrentemos a diversas contradicciones, como la del efecto “Nimby” (en sus siglas en inglés “Not in my backyard” – no en mi patio trasero). No deseamos actividad extractiva cerca debido a los impactos que genera y preferimos relegarla a terceros países, en muchos casos con bajos o nulos estándares ambientales y sociales. Pero no renunciamos a la renovación constante de objetos tecnológicos, que requieren de la actividad minera para su fabricación. Reducir la dependencia exterior, que es una prioridad de muchos gobiernos como la Unión Europea, implica apostar por extraer en el propio territorio y probablemente abrir o reabrir nuevos yacimientos que, con mucha seguridad, crearán o están creando rechazo social. En este sentido, la minería deberá ser sostenible ambiental y socialmente, en mi patio trasero y en el de los vecinos. Y el capital mineral, que es un patrimonio natural de los que viven hoy, pero también de los que nacerán, deberá valorarse de forma justa, no sólo considerando los costes de

extracción de hoy, sino los que deberán afrontar las futuras generaciones cuando se agoten los yacimientos. Sólo así se creará un verdadero sentido de la conservación.

En definitiva, evitar la dependencia de combustibles fósiles implicará aceptar la dependencia de materiales, algunos de ellos con importantes riesgos de suministro. Sin materiales no hay energía, ¡pero sin energía, tampoco hay materiales! Es necesario por lo tanto considerar el diálogo, o mejor triálogo energía – materiales – medioambiente, porque las soluciones no serán unidimensionales sino multidimensionales y complejas, especialmente cuando entran en juego los graves problemas sociales que acarrea la minería.