

Thanatia. Límites minerales de la transición energética

ALICIA VALERO, GUIOMAR CALVO Y ANTONIO VALERO

En el año 1999 José Manuel Naredo y Antonio Valero escribieron el libro *Desarrollo Económico y Deterioro Ecológico*. Este fue quizás el pistoletazo de salida para una nueva aplicación de la termodinámica, que más allá de emplearse para entender y optimizar el uso de la energía, fuese capaz de crear herramientas físicas para la valoración de la degradación planetaria.

Conceptos como el consumo de recursos, la gestión de la escasez, el coste, el precio y el valor pertenecen a la economía. Mientras que conceptos como la irreversibilidad, la destrucción de recursos, la optimización de los sistemas para minimizar las pérdidas, la energía, la entropía y la exergía son componentes esenciales de la termodinámica. Así pues, existen evidentes conexiones y coincidencias con palabras que divergen en su denominación. Esto es algo que quedó claro para Georgescu-Roegen (1971), quien proporcionó las bases para la interpretación (y la crítica) de la economía desde una perspectiva termodinámica en su gran obra *La Ley de la Entropía y el proceso Económico*.

Naredo y Valero (1999) mostraron que al unir las palabras coste y exergía en un único concepto llevaba implícito el mensaje de que economía y termodinámica podían caminar de la mano en una nueva rama del conocimiento. Esto se debe a que cada vez que la sociedad produce algo se genera simultáneamente un deterioro irreversible de un determinado recurso. Además, si la economía se utiliza para explicar la creación de valor, la termodinámica puede describir y cuantificar la destrucción de recursos que se produce en la creación de ese valor. Son, en definitiva, el ying y el yang.

Hoy en día, los gobiernos, las empresas e incluso las personas crean dinero a partir de la deuda. Esta deuda se supone que se pagará en el futuro con trabajos que inevitablemente utilizarán recursos naturales que, a su vez, deben ser extraídos. Por lo tanto, la termodinámica nos dice que la humanidad está nada menos que

hipotecando los recursos no renovables del planeta y conduciendo a su agotamiento. El desarrollo económico, con su perjudicial impacto ecológico tiene, por tanto, su lado oscuro de la Luna. En definitiva, las personas pagan a la gente, no a la naturaleza, mientras, la Tierra se deteriora.

Desgraciadamente, la termodinámica no es una ciencia fácil de entender y necesita más investigación en sus aplicaciones y conexiones con otras ciencias. Un buen puente conceptual es la exergía, ya que es una medida física de la distinción. La gente valora la distinción y le pone precio. Solo se percibe cuando se compara algo con su entorno. Por tanto, la distinción está profundamente relacionada con el valor económico y, a su vez, con la física. De hecho, la exergía mide con precisión, en términos energéticos, la distinción de la materia con respecto a un determinado entorno de referencia. De este modo, si se quiere valorar los recursos del planeta, es decir, aquellos objetos que pueden distinguirse de un entorno común, el concepto de exergía y un ambiente de referencia *ad hoc* serían las herramientas físicas para tal empeño.

Nuestro modelo nos permite determinar la velocidad a la cual nos aproximamos a Thanatia, el planeta comercialmente muerto

Y eso es precisamente Thanatia, un modelo conceptual de Tierra crepuscular agotada en recursos y una base de referencia que permite por comparación, el cálculo de la exergía de los recursos abióticos del planeta. Es más, nos permite determinar la velocidad a la cual nos aproximamos a Thanatia, el planeta comercialmente muerto, donde todos los yacimientos

de minerales han sido explotados y sus recursos dispersados por la corteza.

La teoría de Thanatia y los cálculos realizados hasta el momento, fueron publicados por Antonio y Alicia Valero en el libro en inglés *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources*.¹ Siete años después y animados por colegas como Jorge Riechmann o el propio José Manuel Naredo, por fin se publicó Thanatia en español. Junto con Adrián Almazán, se escribió una versión de Thanatia divulgativa con Icaria.² Mientras que, con Prensas Universitarias de Zaragoza se ha actualizado el libro original en inglés, aportando nuevos datos y metodologías desarrolladas con Guiomar Calvo.³

¹ Antonio Valero y Alicia Valero, *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources*, World Scientific Press, Singapur, 2014.

² Antonio Valero y Alicia Valero entrevistados por Adrián Almazán, *Thanatia, los límites minerales del planeta*, Icaria, Barcelona, 2021.

En los libros de Thanatia hemos puesto de manifiesto cómo el consumo exponencial de materias primas topará pronto con los límites geológicos del planeta. Lamentablemente, la crisis de las materias primas y de los componentes básicos para la industria tecnológica que se está viviendo en la actualidad, es ya una primera señal de que nuestros pronósticos se están cumpliendo.

A continuación, presentamos algunos de los resultados más reveladores de nuestros estudios.

Escasez de materias primas: ¿problema coyuntural o estructural?

Si la escasez de materias primas que se está viviendo desde finales de 2020 es un problema coyuntural o estructural es una de las preguntas más repetidas que nos hacen. De acuerdo con nuestros estudios, la respuesta es evidente: es un problema estructural, agravado por la pandemia, que sí ha sido coyuntural.

La globalización y las economías de escala han favorecido la hiper especialización y la deslocalización de la producción de componentes en unas pocas fábricas, casi siempre situadas en el continente asiático, que son las que suministran, por ejemplo, los microchips al resto del mundo. Los parones en la producción se pueden achacar inicialmente a los cierres de fábricas por la pandemia y a los enormes desajustes en el transporte marítimo internacional. Sin embargo, la raíz del problema radica en que la demanda ha aumentado de forma exponencial. El resultado es que las fábricas no dan abasto. Si extrapolamos esta tendencia a la gran fábrica, que es la naturaleza, tarde o temprano nos toparemos con sus límites.

Como hemos explicado en algún artículo, el crecimiento exponencial es extremadamente peligroso. El crecimiento es lento durante un tiempo relativamente largo, pero cuando se alcanza un punto de “reflexión”, frenarlo es muy complicado. Con la pandemia lo hemos experimentado en primera persona. El virus, que empezó infectando a unos pocos individuos en la lejana China, acabó penetrando en todo el mundo de una manera fulminante. Al igual que el coronavirus, los problemas que nos aguardan son de naturaleza exponencial, como los efectos del cambio climático, la deforestación de los trópicos, la contaminación de los mares con plás-

³ Alicia Valero Delgado, Antonio Valero Capilla y Guiomar Calvo Sevillano, *Thanatia, límites materiales de la transición energética*, Prensas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza, 2021.

ticos, residuos agrícolas e industriales, la pérdida de biodiversidad y por supuesto el consumo de combustibles fósiles y de minerales. La depredación de la naturaleza crece a un ritmo del 2,8% anual, lo que implicaría que, en una generación, los humanos consumiremos el doble que hoy y en 25 años habremos consumido tanto como en toda la historia de la humanidad.

La extracción de combustibles fósiles y recursos minerales ha crecido exponencialmente desde principios del siglo XX y, lejos de desacelerarse, se espera que aumente en las próximas décadas. En lo que llevamos de siglo XXI, se ha consumido tanto cobre como en todo el siglo XX y esta tendencia se repite para muchas otras materias primas que son esenciales para la economía.

Si la demanda es exponencial y los recursos son limitados y se conocen, es posible realizar estimaciones de cuándo se prevé que se alcancen los picos de los minerales, al igual que se ha realizado tradicionalmente con los picos de los combustibles fósiles, muchos de ellos ya alcanzados (por ejemplo, el del petróleo). En las siguientes figuras se muestran los resultados de nuestros estudios, considerando los recursos totales disponibles, es decir, las estimaciones más optimistas que existen y que incluyen no solo las reservas identificadas, sino también las no descubiertas. El pico se alcanza, al menos teóricamente, cuando la demanda es superior a la oferta. Alcanzar el pico no implica por tanto que se agoten los minerales, sino que se agotan los más accesibles y de mayor calidad. A partir de entonces, cabría esperar una reducción en la producción, con los consiguientes impactos económicos.

La Figura 1 contiene los picos (expresados en términos exergéticos para tener en cuenta la calidad de los recursos) de los elementos aluminio, cromo, cobre, hierro, manganeso y zinc, que son los que se extraen en mayor medida cada año. La Figura 2 muestra el resto de los elementos estudiados. La conclusión obtenida es que considerando las cifras más optimistas de recursos disponibles hoy en día y eventualmente en el futuro, el pico de la mayor parte de las materias primas se alcanza antes de que acabe este siglo.

Figura 1: Picos de Hubbert de los seis elementos más extraídos a nivel mundial considerando los recursos totales disponibles⁴

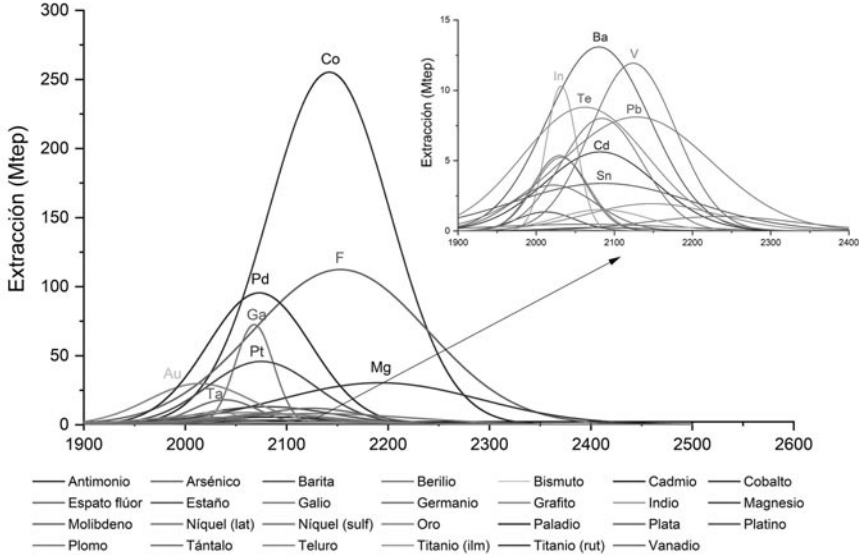
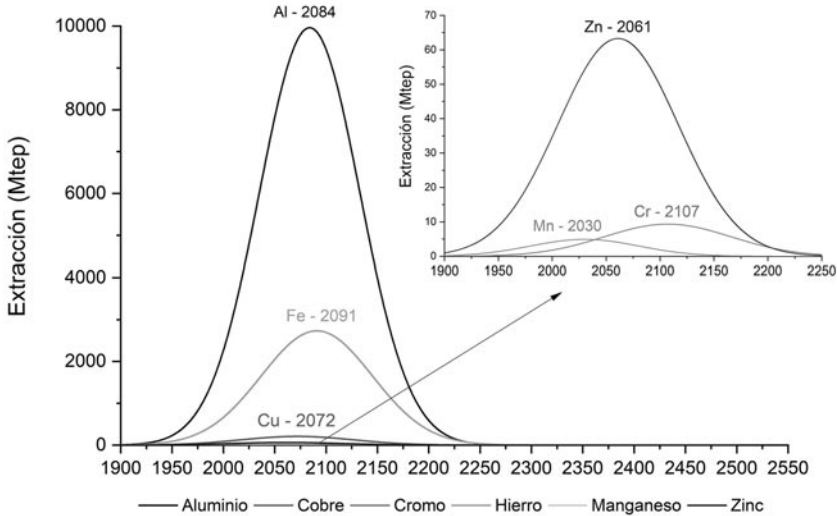


Figura 2: Picos de Hubbert para distintos elementos considerando los recursos totales disponibles⁵

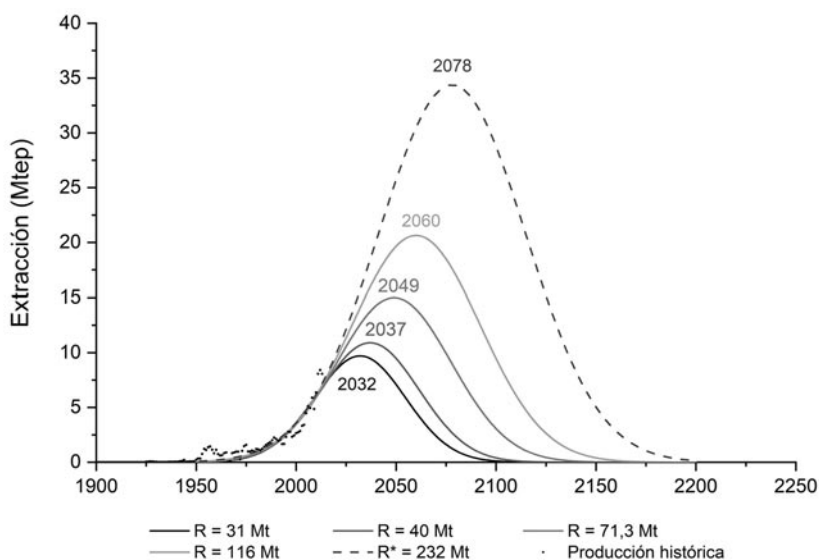


⁴ Guiomar Calvo, Alicia Valero y Antonio Valero, «Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources», *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 125, pp. 208-217.

⁵ Ibid.

Obviamente este es un ejercicio teórico sujeto a muchas incertidumbres, la primera de ellas, la fiabilidad de los datos sobre recursos. En efecto, las críticas más frecuentes a estos modelos están relacionadas con el hecho de que la tierra está todavía sin explorar y aún quedan muchos lugares del planeta susceptibles de ser extraídos. Precisamente para responder a estas críticas, el ejercicio anterior se ha realizado considerando los recursos y no las reservas identificadas. Las reservas hacen referencia a aquella parte de los depósitos minerales que puede ser recuperada, obteniendo un beneficio económico en el momento del análisis. Estas pueden aumentar si se encuentran nuevos yacimientos y si los precios de las materias primas o las mejoras tecnológicas permiten obtener beneficios de depósitos que anteriormente habían sido descartados.

Figura 3: Distintos valores para el pico de Hubbert del litio en función de diferentes datos de recursos⁶



La figura 3 muestra para el caso del litio, distintos valores de pico máximo de extracción considerando estimaciones de recursos desde más pesimistas hasta más optimistas. El pico varía entre 2032 y 2060. Incluso multiplicando por dos el valor de recursos más optimista, el pico se desplazaría solo 18 años. Como se observa, el factor limitante en este caso no es la cantidad de reservas disponibles, que cier-

⁶ Ibid.



tamente aumentará en el futuro para diversas materias primas, sino el consumo exponencial que literalmente devora los recursos en unos periodos de tiempo muy pequeños. ¿Estamos dispuestos a sacrificar los polos, el Amazonas o los océanos para retrasar unos pocos años el pico?

Materias primas: cuellos de botella de la transición ecológica

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), una de las organizaciones que elaboran informes de evaluación técnica sobre el cambio climático desde 1988, publicó una guía sobre cómo deberíamos limitar las emisiones de gases de efecto invernadero.⁷ El informe establece que, si las emisiones continúan al ritmo actual, sufriremos un aumento de 1,5 °C entre el 2030 y 2052. Otras agencias y organizaciones publican otros informes, con escenarios diferentes,⁸ pero aunque los resultados puedan ser ligeramente diferentes todos coinciden en que es necesario tomar medidas cuanto antes para evitar superar ese límite de aumento de 2 °C. La principal propuesta para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible, establecidas en la Conferencia del Clima de París en 2015, es la de reducirlas hasta un 80% respecto a los niveles de 1990.

La reducción lleva implícito un cambio rápido en las fuentes de energías usadas. Apostar rápidamente por sustituir las energías fósiles por las renovables. ¿Pero, cuáles son las implicaciones de este cambio?

Hemos pasado de una sociedad que dependía de materiales más simples y abundantes como la madera, el hierro o la piedra a otra que necesita casi todos los elementos presentes en la tabla periódica para cubrir sus necesidades básicas. Los ordenadores, los *smartphones*, el coche eléctrico, las energías renovables, los nuevos materiales y los aparatos electrónicos están renovando el optimismo por un futuro más brillante. Sin embargo, todos estos artefactos tecnológicos están profundamente relacionados con la dotación mineral de la Tierra. Elementos como indio, galio, germanio, tierras raras, tántalo, circonio, cobalto, estaño, metales pre-

⁷ IPCC, 2019. Global warming of 1.5°C. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

⁸ Agencia Internacional de la Energía, *Energy Technology Perspectives 2017. Catalyzing Energy Technology Transformations*, Agencia Internacional de la Energía, 2017; Sven Teske, Steve Sawyer, Oliver Schäfer, *Energy [R]evolution - A sustainable world energy outlook 2015*, Greenpeace International, 2015; Consejo Mundial de la Energía, *World Energy Scenario 2016*, World Energy Council (WEC), Londres, 2016.

ciosos y del grupo del platino, litio, telurio, fósforo, etc., se utilizan profusamente sin ser prácticamente reutilizados.

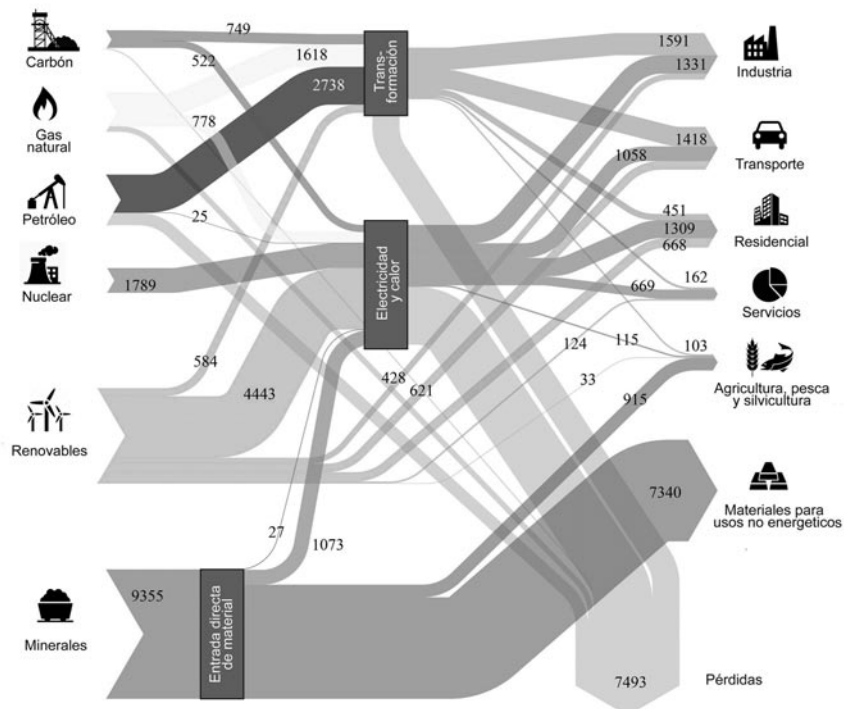
Las energías renovables o los vehículos eléctricos son un ejemplo muy claro de sectores en los que las materias primas son clave. Dependen estrechamente de ciertos elementos, algunos de ellos etiquetados como críticos, como el litio, el cobalto, las tierras raras o el telurio. Por ejemplo, se necesitan varios metales para fabricar aerogeneradores que aprovechen la energía generada naturalmente por el viento. Los primeros molinos de viento construidos por la humanidad, principalmente antes de la revolución industrial, solo necesitaban productos básicos como hierro, madera y piedra. En cambio, los actuales aerogeneradores requieren elementos mucho más complejos y escasos, entre ellos las tierras raras. Los metales mayores son el hierro y el cobre, utilizados en las torres (acero) y en todos los componentes eléctricos y electrónicos y el cableado necesario (cobre). Los elementos que son críticos en este caso son los que están presentes en cantidades mucho más pequeñas en comparación, a veces menos del 0,5% del peso total de un aerogenerador, y un claro ejemplo son las tierras raras. Las tierras raras son un conjunto de 17 elementos de la tabla periódica, entre los que se incluye el neodimio y el disprosio. Ambos se encuentran en los imanes permanentes que incorpora el alternador, situados en la góndola, y que son necesarios para transformar la energía mecánica de rotación de las palas en energía eléctrica.

Conociendo la composición media de las tecnologías renovables, es posible analizar las necesidades de recursos que implicará la transición ecológica. En un estudio realizado en el 2017, analizamos exergéticamente, la reducción en el uso de recursos implícita en dicha transición. La figura 4 muestra los resultados empleando el escenario 2DS de la Agencia Internacional de la Energía para el año 2050, incluyendo la parte de los recursos minerales que serán necesarios para la transición (Figura 4).

A simple vista se aprecia que las energías renovables van a tener mayor peso que los combustibles fósiles. En los procesos de transformación, la energía fósil seguirá teniendo un papel relevante, que irá destinado a la industria y el transporte, por ejemplo, el marítimo que será difícil de descarbonizar. Las energías renovables serán predominantes en la generación de electricidad y calor, aunque todavía se espera algo de dependencia de la energía nuclear y de los combustibles fósiles.

Figura 4: Flujo exergético basado en el escenario 2DS de la Agencia Internacional de la Energía para el año 2050, incluyendo la parte de recursos minerales.

Datos en Millones de toneladas equivalentes de petróleo⁹



Si nos fijamos en los materiales necesarios, se puede observar que el tamaño de la flecha (medido en términos exergéticos) es superior al de las energías renovables, lo que implica que los minerales adquieren un peso muy relevante en nuestra economía.

Si se compara la situación en el año 2025 y el 2050, existe una disminución considerable de la demanda de petróleo y gas natural, en favor de las renovables, que, según este escenario, aumentará en un 131%, pero también de la nuclear, que aumentaría en un 94%. En términos exergéticos, existe un aumento de la demanda de recursos minerales de un 35%, aunque desigual. La demanda de recursos minerales para la bioenergía, es decir, fósforo y potasio, aumenta en 172% nada menos. Por sectores, será el transporte (vehículos eléctricos e híbridos) el que mayor

⁹ Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo, Abel Ortego, Sonia Ascaso y José Luis Palacio, «Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways», *Energy Open Access*, vol. 159, pp. 1175 - 118415, septiembre de 2018.

incremento requiera de materiales. El siguiente sector en importancia será el de la agricultura y pesca, ya que será necesario cultivar más terrenos para alimentar la creciente población, a la vez que proporcionar la materia prima de la biotecnología.

Por materias primas, será el aluminio, hierro, cobre y potasio los que mayores incrementos sufrirán, ya que son los metales más empleados en todas las tecnologías. Para la bioenergía, nuestros estudios predicen que la demanda de potasio y fósforo se multiplicará previsiblemente por dos respecto del 2025. Otros seis elementos multiplicarán su demanda por seis en este periodo de tiempo: cobalto, litio, magnesio, titanio y zinc.

En definitiva, la transición energética implicará pasar de una sociedad dependiente de combustibles fósiles a otra altamente dependiente de minerales. Si se consideran otros escenarios más renovables (como los de Greenpeace), la dependencia en materias primas aumenta todavía más.

Considerando los picos de los que hemos hablado en la sección anterior y el aumento de demanda esperada, la pregunta inmediata es si existirán suficientes recursos para llevar a cabo dicha transición. La demanda, que aumenta constantemente con el paso del tiempo, podría provocar cuellos de botella en el suministro, y esta vez, no de forma coyuntural como ha ocurrido con la pandemia, sino definitivos y prolongados en el tiempo, lo que a su vez podría conducir a un aumento del consumo de energía y de los impactos medioambientales.¹⁰

La transición energética implicará pasar de una sociedad dependiente de combustibles fósiles a otra altamente dependiente de minerales

Este punto crítico en el que la escasez de elementos podría comprometer las estrategias presentes y futuras no solo afecta al sector de las energías renovables; también influye en muchos otros, como en la industria alimentaria, del papel, del vidrio o de la confección.¹¹

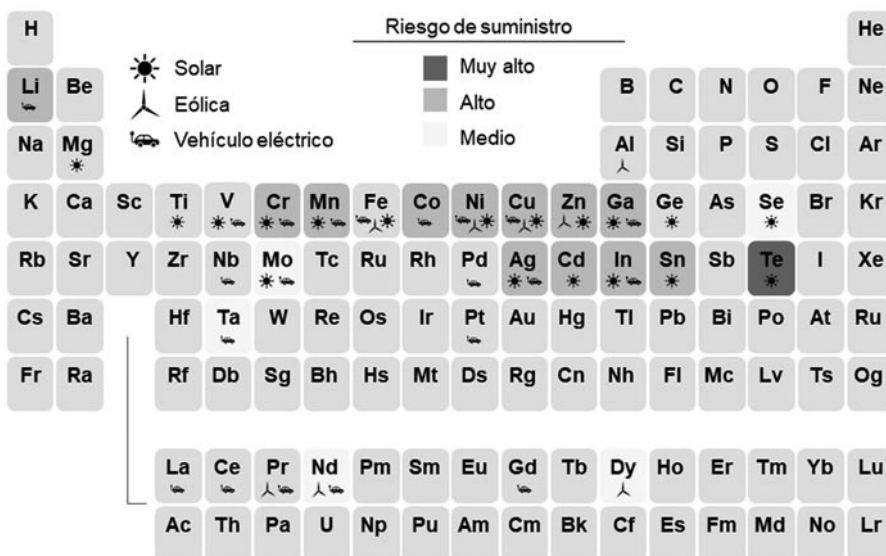
De acuerdo con nuestros estudios, trece elementos tienen un riesgo de suministro entre alto y muy alto: telurio, litio, cromo, manganeso, cobalto, níquel, cobre, cinc, galio, plata, cadmio, indio y estaño. Riesgo muy alto implicaría que la demanda

¹⁰ Valero, Valero y Almazán, 2021, *op. cit.*

¹¹ Antonio Valero y Alicia Valero, «Pensando más allá del primer ciclo: economía espiral», en: Economía Circular-Espiral: Transición Hacia Un Metabolismo Económico Cerrado, Ecobook, 2019, p. 343.

acumulada hasta el 2050 superase los recursos conocidos. Este es el caso del telurio que solo se produce en unas pocas toneladas al año por ser un subproducto de otros elementos mayores y que es fundamental en las tecnologías fotovoltaicas de telururo de cadmio. Riesgo alto implicaría que las reservas conocidas fuesen insuficientes a la demanda acumulada. Muchos elementos en riesgo alto son los que serán necesarios para las baterías de los coches eléctricos como el cobalto, litio, níquel o manganeso. Mientras que, si la demanda anual supera la extracción primaria anual esperada según los escenarios de Hubbert, el riesgo sería medio. Esto significaría que a pesar de que existan reservas, existiría un posible desacople entre demanda y extracción (Figura 5).

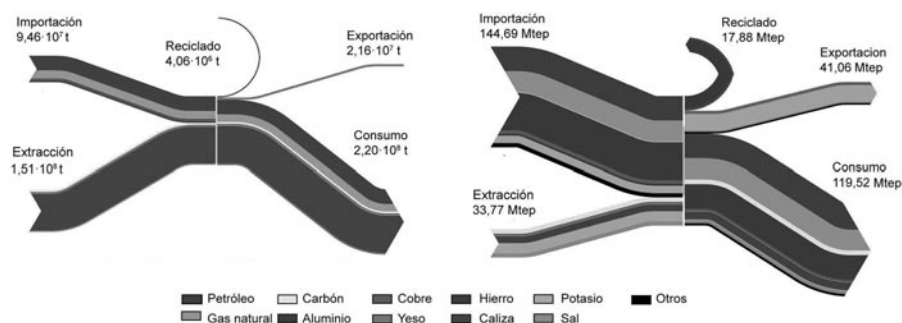
Figura 5: Resumen del tipo de riesgo que presenta cada elemento y en qué tecnología se emplea mayoritariamente.¹²



A los límites geológicos de los materiales hay que sumarle los problemas asociados a la desigual distribución de los recursos en el planeta. España y en general Europa son extremadamente dependientes de las materias primas que van a ser esenciales para la descarbonización y la transición digital. En la Figura 6 se muestra un diagrama de Sankey con flujos de entrada y salida para España en el año 2011. El diagrama de la izquierda muestra los datos en toneladas y el de la derecha en exergía, considerando la calidad de los recursos.

¹² Valero, Valero y Calvo, 2021, *op. cit.*

Figura 6: Diagrama Sankey con flujos de entrada y salida para España para el año 2011, datos en toneladas (izda) y costes exergéticos (derecha).¹³



La figura 6 muestra claramente que España es extremadamente dependiente de recursos de calidad (figura de la derecha), no solo de combustibles fósiles, y que serán necesarios para el desarrollo de las nuevas tecnologías. La misma tendencia se aprecia para Europa. Por ejemplo, China suministra más del 90% de las tierras raras antes mencionadas a Europa. Ya en el 2010 el “embargo” de las tierras raras por parte de China provocó que estas aumentasen en poco tiempo su precio desorbitadamente, lo que puso en evidencia la enorme vulnerabilidad de los países importadores, en muchos casos dependientes de los recursos que o bien extrae China, o bien controla o refina.

¿Soluciones?

Como hemos visto, evitar la dependencia de combustibles fósiles implicará aceptar la dependencia de materiales. Sin materiales no hay energía, especialmente de carácter renovable, pero sin energía tampoco hay materiales por las crecientes necesidades energéticas de la minería al agotarse cada vez más los yacimientos. Las soluciones serán multidimensionales y muy complejas, ya que entran en juego los tremendos problemas asociados a la minería, de los que no hemos hablado, pero que siempre están presentes. He aquí algunas propuestas para tratar de mitigar esos cuellos de botella mencionados anteriormente.

La solución probablemente más evidente es la de apostar por recuperar las materias primas de los productos. Ir hacia la llamada *Economía Circular*. Sin embargo,

¹³ Guiomar Calvo, Alicia Valero y Antonio Valero, Antonio (2015). «An exergoecological analysis of the mineral economy in Spain», *Energy*, Vol. 88, 2015, pp. 2-81.

hay que considerar que los materiales y las tecnologías poseen mejores prestaciones gracias a la enorme cantidad de distintos elementos que los componen.

La economía circular es un bonito mito, pero a lo máximo que podemos aspirar es a una economía espiral

Cuanto más elementos contengan los materiales y los productos, más difícil será su separación. De igual manera, recuperar elementos que están incorporados en los productos en cantidades de miligramos o nanogramos hacen prácticamente imposible su reciclaje. Esto es una consecuencia

del segundo principio de la termodinámica: cerrar completamente los ciclos es técnicamente imposible y las pérdidas aumentarán cuanto mayor sean las mezclas entrópicas creadas. La economía circular es un bonito mito, pero a lo máximo que podemos aspirar es a una *Economía Espiral*: todo proceso conlleva pérdidas de materiales.¹⁴

Para reducir dichas pérdidas, los productos deben estar diseñados pensando en su fin de vida. Deben ser robustos, modulares y fácilmente desensamblables. A su vez, se debe invertir en investigación y desarrollo de tecnologías de recuperación de elementos menores, pero extremadamente valiosos y escasos. Hoy en día nuestras tecnologías son capaces de recuperar unos pocos materiales como el cartón, vidrio, algunos plásticos, acero, aluminio o cobre. Pero, ¿qué hay del estaño, tántalo, plata, neodimio, indio, galio...? Estos acaban perdiéndose para siempre en vertederos o *subciclados* en metales mayores, perdiendo su funcionalidad original.

Sustituir materias primas críticas por otras más abundantes son estrategias que también se están llevando a cabo. Por ejemplo, en las baterías de los nuevos coches eléctricos, donde se busca reducir los contenidos de cobalto o litio. Sin embargo, si la demanda sigue aumentando exponencialmente, tarde o temprano todos los elementos serán críticos. Este aumento exponencial impediría prescindir de la minería aun si fuese posible recuperar todos los elementos al final de la vida útil de los productos, ya que cada año se demanda más que el anterior.

La solución más efectiva pasa irremediablemente por reducir drásticamente el consumo. Para ello, habrá que repensar el modelo de economía que tenemos, eliminando la cultura del usar y tirar, favorecer usos compartidos de los productos,

¹⁴ Valero y Valero, 2019, *op. cit.*

promover el consumo (o uso) de recursos locales, e ir hacia modelos de servitización (se compra el servicio, no el producto, y además neutraliza la obsolescencia programada). Para ello, será fundamental valorar adecuadamente las materias primas. Los recursos que nos da la naturaleza gratis, siguen siendo extremadamente baratos por no considerarse el “yang” de la economía, o sea, las externalidades asociadas a la degradación de la naturaleza que comportan. En este sentido, las leyes de la termodinámica, con su concepto de exergía, pueden ayudar.

Alicia Valero Delgado, Guiomar Calvo Sevillano y Antonio Valero Capilla son miembros del Instituto CIRCE de la Universidad de Zaragoza

