

## Transición a energías renovables y demanda de minerales

Iñigo Capellán Pérez\* y Carlos de Castro

Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid  
(<http://www.geeds.es>)

\*[inigo.capellan@uva.es](mailto:inigo.capellan@uva.es)

Capítulo aparecido en el libro: “[Minería y Extractivismos: Diálogo entre la academia y los movimientos sociales](#)”. Eds: Luis Sánchez Vázquez, Chiara Olivieri, Helios Escalante Moreno y Mariela Velázquez Pérez. Editorial Universidad de Granada. Colección Periferias. 2022. ISBN 9788433869258.

## Contenido

1. La necesaria y urgente transición a las energías renovables .....	1
2. Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética .....	5
3. Requerimientos de minerales para eólica terrestre, solar fotovoltaica y solar de concentración.....	6
4. Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial .....	10
5. Conclusiones.....	16

## 1. La necesaria y urgente transición a las energías renovables

La actual crisis de sostenibilidad es un problema muy complejo que requiere medidas de control urgentes y radicales a nivel mundial (Anderson and Bows, 2012; Brondizio et al., 2019; IPCC, 2018, 2014; MEA, 2005; Steffen et al., 2015b, 2015a). Al acelerar la pérdida de biodiversidad, alterar significativamente los ciclos naturales del carbono (cambio climático), el nitrógeno o el fósforo, degradar los ecosistemas, etc., las sociedades humanas estamos degradando los sistemas y procesos naturales que sustentan la vida y de los que dependemos para sostener nuestra propia existencia. Investigaciones recientes indican que algunos puntos de inflexión climáticos, que se refieren al umbral crítico en el que una pequeña perturbación puede alterar cualitativamente el estado o desarrollo de un componente del sistema del clima de la Tierra, pueden ser traspasados en las próximas décadas, lo que implicaría impactos a gran escala peligrosos e incluso catastróficos para los sistemas humanos y ecológicos (Lenton et al., 2008). En consecuencia, estamos arriesgando la continuidad de nuestras sociedades tal y como las conocemos (Daily, 1997; Levin et al., 2009; MEA, 2005; Schneider and Morton, 1981). Por otro lado, hoy en día no existe ningún país que satisfaga las necesidades básicas de sus ciudadanos a un nivel globalmente sostenible de uso de los recursos naturales (O’Neill et al., 2018), y se mantienen enormes diferencias de riqueza y consumo de recursos tanto entre personas de países diferentes como dentro de ellos. Por lo tanto, la transición hacia la sostenibilidad es un reto no sólo técnico, sino también y esencialmente un reto de naturaleza global y política.

En este contexto, la implementación rápida y efectiva de políticas de transición a las energías renovables se dirige principalmente a los problemas de cambio climático generados por la emisión de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono (76%), aunque también metano (16%) y dióxido de nitrógeno (6%) (IPCC, 2014)) y agotamiento de los combustibles fósiles (Capellán-Pérez et al., 2014; Wang et al., 2017). De hecho, se estima que más de 2/3 de las emisiones de efecto invernadero mundiales proceden de la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2014), fuentes de energía de las que el mundo depende de forma masiva con variaciones regionales y/o nacionales según disponibilidad de recursos renovables locales (como puede ser el caso de la hidroeléctrica) o según el tipo de metabolismo social dominante (Krausmann et al., 2008).

A pesar de sus impactos ambientales nocivos, los combustibles fósiles están caracterizados por unas propiedades físico-químicas muy favorables (alta densidad energética, almacenables, inertes a condiciones ambientales, etc.) que permiten el flujo de grandes cantidades de energía útil a demanda hacia las sociedades humanas (Carbajales-Dale et al., 2014; Hall et al., 2014). Las fuentes de energía renovable, por su parte, están habitualmente caracterizadas por menores niveles de densidad energética (ver Figura 1a), su uso compite con otros procesos de la biosfera y aquellas con mayor potencial, como la eólica o la solar, están considerablemente afectadas por su variabilidad e intermitencia (ver Figura 1b) (de Castro et al., 2013; Hall and Klitgaard, 2012; Miller and Keith, 2018; Smil, 2015, 2015, 2008; Trainer, 2017, 2012, 2010; Van de Ven et al., 2021).

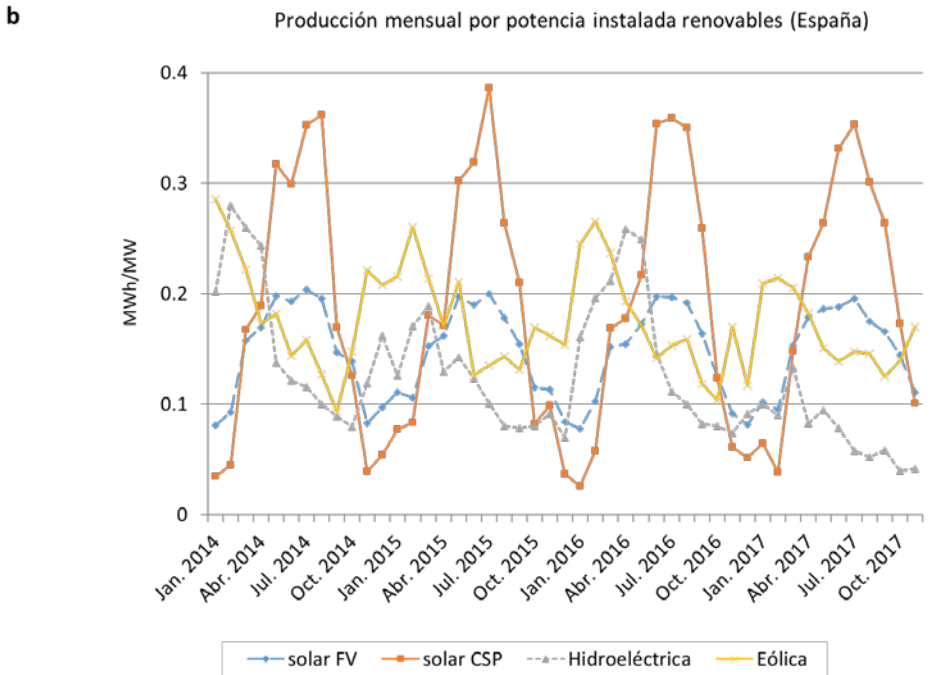
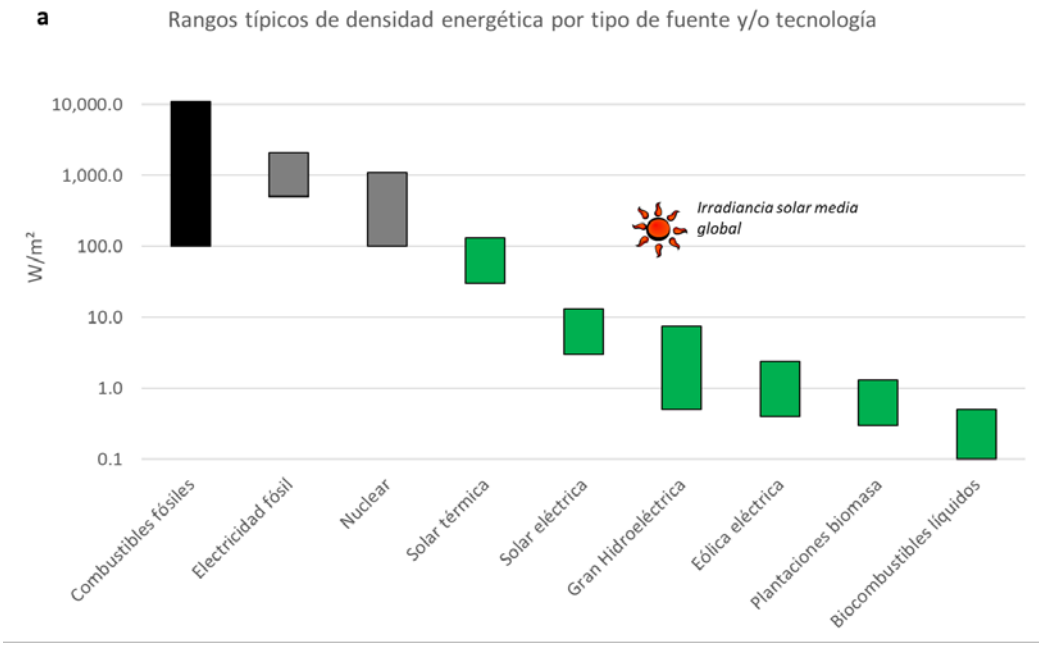


Figura 1: Características biofísicas de las energías renovables: (a) densidad energética neta ( $W_e/m^2$ ) por fuente energética y/o tecnología (fuente datos: revisión de literatura en (Smil, 2015)). Como comparación se representa la irradiancia solar media global ( $168 W/m^2$ ), obviamente las leyes de la termodinámica impiden un aprovechamiento directo del flujo solar superior a esta cifra, de hecho las cifras de aprovechamiento técnicamente posibles para producción de electricidad están claramente por debajo de esta magnitud (actualmente los paneles solares tiene una eficiencia media de 16-18% pero hay que tener en cuenta que es necesario dejar separación entre módulos por sombras y para dejar paso para operación y mantenimiento). (b) Intermitencia: generación de electricidad mensual en relación a la capacidad total instalada (MWh/MW) por tecnología renovable en España en los años 2014 al 2017 (fuente: datos de REE compilados en (de Castro and Capellán-Pérez, 2018)).

Además, las plantas de generación de energías renovable dependen para su funcionamiento, paradójicamente, de materiales que son recursos no renovables. Y aunque en principio

muchos estos, principalmente minerales, puedan ser reciclados, en la práctica, aspectos como la falta de cultura e incentivos apropiados, así como el diseño centrado en optimizar el rendimiento de los equipos en vez de en el reciclado de sus numerosos minerales valiosos, hace que las tasas de reciclado de numerosos minerales de las tecnologías electrónicas y energéticas modernas sean terriblemente bajas. Éste es el caso por ejemplo del litio, del que se estima que se recicla actualmente a tasas de reciclado (en contenido de los inputs) de entorno del 15% (de Blas et al., 2020; Melin, 2019). Así, la transición a energías renovables en sistemas energéticos que dependen generalmente en la actualidad en más de un 80-90% de energías fósiles, requerirá grandes cantidades de minerales para instalar, fabricar y mantener todas las nuevas plantas y componentes asociados de generación de energías renovables, minerales que en grandes proporciones no se encuentran actualmente dentro de la economía y que por lo tanto a la fuerza deberán de ser extraídos de las entrañas de la tierra. La combinación de una menor densidad energética (es decir, para un mismo nivel de generación de energía es necesario ocupar más superficie) e intermitencia hace que los sistemas renovables requieran muchos más materiales que las fósiles, tanto en cantidad (entre dos veces y un orden de magnitud más) como en diversidad, para la misma generación de energía (de Koning et al., 2018; Kis et al., 2018; Kleijn et al., 2011; Tokimatsu et al., 2017).

La demanda esperada de minerales para ejecutar la transición energética plantea interrogantes en dos grandes campos:

(1) ¿Hasta qué punto la demanda de minerales para sistemas renovables incrementará la demanda de minerales respecto del total de toda la economía? ¿Podría, y en qué casos y bajo qué circunstancias, disparar la demanda de forma que en el futuro se produjera un problema de disponibilidad de minerales, bien por escasez geológica o porque la resistencia social a su extracción redujera las reservas efectivas?

(2) ¿Qué implicaciones socio-ambientales tendría la extracción de mayor cantidad de minerales en un mundo en el que la minería ya es un grave problema (UNEP, 2013)? ¿De dónde se extraerán, qué poblaciones se beneficiarán y cuáles sufrirán sus impactos? ¿Podrían reproducirse esquemas de desigualdad y dominación Norte-Sur cómo los ya existentes actualmente?

El análisis de los requerimientos minerales de la transición energética es un campo incipiente pero que ya está indicando que podría incrementar sustancialmente la extracción de minerales y en algunos casos enfrentarse a restricciones de disponibilidad (de Koning et al., 2018; EC, 2010; Elshkaki and Graedel, 2013; García-Olivares et al., 2012; Kleijn et al., 2011; Prior et al., 2012; Tokimatsu et al., 2017; Valero et al., 2018). Incluso la OECD se ha interesado recientemente por esta temática, con un informe específico detallado en el que también prevén el incremento de la extracción masiva de materiales tanto metálicos como no metálicos en las próximas décadas (OECD, 2019). Estos estudios se realizan desde un enfoque ingenieril en el que habitualmente queda fuera la temática de análisis de potenciales impactos socio-ambientales locales. Sin embargo, es claro que los resultados de los primeros serán la base de futuros trabajos en el segundo área.

El presente capítulo se enmarca dentro de la primera categoría de estudios. Contribuimos al debate reportando resultados de un análisis realizado con un modelo de simulación energía-economía-medio ambiente a nivel mundial (MEDEAS-World) (Capellán-Pérez et al., 2017a,

2020),<sup>1</sup> un modelo que representa las relaciones principales entre demanda de bienes y servicios, energía, minerales, emisiones de efecto invernadero y cambio climático aplicado con el objetivo de estudiar las consecuencias de aplicar diferentes políticas. En este caso, se estudió qué ocurriría con la demanda de minerales a nivel mundial en el caso de que el mundo decidiera globalmente transitar hacia un sistema de 100% renovables en el sector eléctrico para el año 2060 siguiendo un escenario de “Crecimiento Verde”, que es el escenario de transición propuesto típicamente por las instituciones y agencias internacionales como la Comisión Europea, la ONU, la OECD o el Banco Mundial (European Commission, 2011; OECD, 2011, 2018; UNEP, 2011a; World Bank, 2012). Los detalles de la metodología y los resultados se pueden consultar en Capellán-Pérez et al., (2019).

## 2. Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética

La Figura 2 representa cómo se computa la demanda primaria de minerales (a extraer de la mina) en el modelo MEDEAS-World: el crecimiento económico per cápita y el nivel de población determinan la demanda de bienes y servicios, que a su vez determinan la demanda de energía y de minerales. Por otro lado, el incremento de la capacidad de energías renovables instalada también contribuye al aumento de la demanda de minerales. Dependiendo de la tasa de reciclado de cada uno de ellos, se puede entonces computar la demanda primaria de cada mineral.

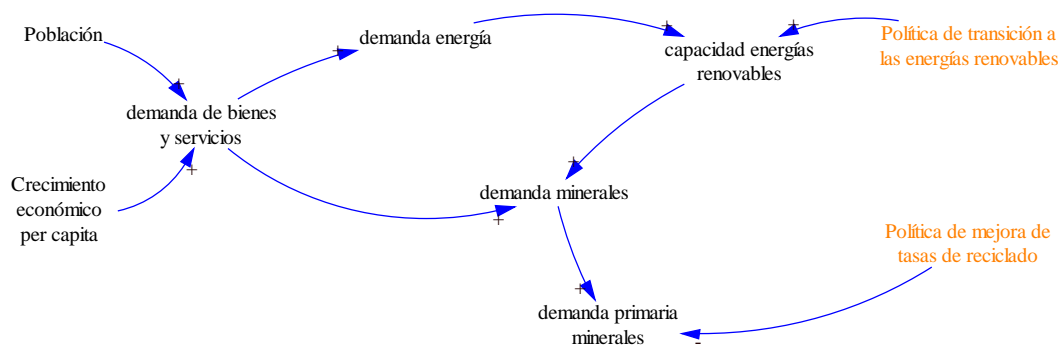


Figura 2: Diagrama que representa cómo se computa la demanda primaria de minerales en el modelo MEDEAS-World. En naranja se muestran las variables afectadas por políticas, y los símbolos (+) y (-) representan una relación positiva y negativa, respectivamente, entre variables.

Los requerimientos minerales asociados a las renovables se estiman a partir de una revisión detallada de la literatura para las tecnologías que tienen un mayor potencial tecno-sostenible (IPCC, 2011; Smil, 2010): solar fotovoltaica (FV), solar de concentración (CSP), eólica terrestre y eólica marina. Para la CSP y eólicas se considera una tecnología representativa, es decir, una tecnología actualmente dominante en el mercado y que se estima seguirá siéndolo en el futuro por sus buenas prestaciones técnicas. Para la FV, dada la diversidad de subtecnologías existentes en el mercado, se prorratan las demandas de minerales teniendo en cuenta la proporción de subtecnologías actual. Adicionalmente, se estiman también los requerimientos minerales de las baterías de almacenamiento de energía eléctrica de litio (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) para

<sup>1</sup> Disponible libremente en: <https://www.medeas.eu/model/medeas-model>.

movilidad eléctrica (coches, motos, autobuses tanto puramente eléctricos como híbridos), así como para líneas de alta tensión adicionales para transportar la electricidad. El modelo incluye datos en términos de kg/MW para 19 minerales: aluminio, cadmio, cromo, cobre, galio, indio, hierro/acero, plomo, litio, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, telurio, estaño, titanio, vanadio y zinc.

Por otro lado, dadas las incertidumbres y carencia de datos a nivel mundial, se asume que la demanda de minerales del resto de la economía depende del PIB per cápita (cf. metodología aplicada en (Capellán-Pérez et al., 2019)).

Las tasas de reciclado consideradas se corresponden con la proporción de mineral reciclado a la entrada de los procesos (“recycled content”), considerando como nivel actual mundial la media del rango dado por la UNEP (UNEP, 2011b) (excepto para el litio como arriba enunciado). Es decir, una tasa de reciclado RC de un mineral del 25% significa que de cada 100 kg que se demandan de este mineral, 75 son extraídos de las minas y 25 provienen de mineral reciclado. Esta hipótesis es optimista desde el punto de vista que se asume que los minerales a reciclar ya se encuentran en las cantidades demandadas dentro de la economía, lo que no tiene por qué ser siempre el caso, y aún menos para aquellos minerales para los que está previsto aumentar mucho su demanda respecto del pasado. Asumimos también por simplicidad una sustitución 1 a 1 de producción primaria por material reciclado, lo que también es optimista ya que en realidad en los procesos de reciclado se producen pérdidas materiales y además, no siempre el proceso de reciclado consigue obtener minerales de una pureza tan alta como es posible a partir de minerales vírgenes.

Tanto el modelo MEDEAS-World como todos los datos están libremente disponibles online.<sup>2</sup>

En la siguiente sección, veremos en más detalle los minerales requeridos por tres plantas hipotéticas de 100 MW para eólica terrestre, solar FV y solar de concentración.

### 3. Requerimientos de minerales para eólica terrestre, solar fotovoltaica y solar de concentración

La Tabla 1 muestra los requerimientos de minerales en toneladas estimados en este trabajo para unas centrales de generación eléctrica representativas del mix actual para solar FV y eólica terrestre (la eólica marina requiere de aún más inputs por su peor accesibilidad y mayor desgaste por la corrosión marina).

Las turbinas eólicas están caracterizadas por los siguientes elementos: torre, aspas unidas solidariamente al rotor, regulación de velocidad y orientación, y habitualmente un tren de potencia. Así, se utilizan los siguientes minerales: aluminio y cobre para el cableado interno y el rotor; hierro, níquel y cromo para el acero inoxidable; así como las tierras raras disprosio y neodimio para los imanes permanentes. Por simplicidad, en este análisis hemos asumido que las eólicas offshore usan motor de imanes permanentes y máquina asíncrona doblemente alimentada para wind onshore. La diferencia es que la primera usa grandes cantidades de tierras raras para alcanzar mejor eficiencia.

---

<sup>2</sup> Datos disponibles también libremente en la pestaña “Minerals” del archivo inputs\_w.xlsx al descargar el modelo MEDEAS: <https://www.medeas.eu/model/medeas-model>.

Un parque fotovoltaico está compuesto básicamente de módulos fotovoltaicos (que consisten en semiconductores que son capaces de convertir energía solar en electricidad), estructuras de soporte, y cableado tanto interno como de conexión a la red. Existen diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos. Hoy en día, la mayor parte (>90%) de las células FVs son fabricadas mediante silicio (principalmente mono y multicristalino), que requieren de plata, cadmio, cobre, galio, indio, magnesio, níquel, plomo, selenio, estaño, telurio y por supuesto silicio. También existen otras tecnologías que permiten aligerar sustancialmente el peso de los módulos que consisten en una delgada capa semiconductor como la FV de telururo de cadmio (CdTe) o los CIGS (*Copper Indium Gallium Selenide*), que sin embargo no alcanzan en conjunto el 10% (ISE, 2019). Estas tecnologías de capa fina han aumentado significativamente los requerimientos de minerales como el cobre, indio, galio, selenio, cadmio, molibdeno y telurio. Además, se requiere aluminio para las estructuras, para los marcos de los paneles, para los inversores y transformadores; hierro, níquel y cromo para los aceros inoxidable; magnesio y zinc para otras aleaciones; cobre para el cableado interno, inversores y transformadores.

Las plantas termosolares de concentración se llaman así porque mediante espejos concentran los rayos de sol en un área pequeña, donde ese calor es usado para evaporar agua que se turbinan para obtener electricidad. Su gran ventaja respecto de otras tecnologías renovables es que cuando se acopla un sistema de almacenamiento térmico son capaces de mantener una producción constante entre el día y la noche. No obstante, como muestra la Figura 1b la variabilidad estacional es incluso mayor que para el resto de renovables. Existen diferentes tecnologías: cilíndrico parabólico, discos Stirling, reflector fresnel lineal compacto y torre de energía solar. En este trabajo hemos tomado como referencia para estimar los requerimientos materiales la tecnología cilíndrico parabólica (ver Figura 5). De nuevo, en cuanto a requerimientos minerales, son necesarios acero/hierro aleado para las estructuras, aluminio para los reflectores, etc.

Además de los requerimientos minerales, es importante tener en cuenta que hay otros importantes inputs materiales en forma de cemento, plásticos (en los dispositivos electrónicos, cableados y otras estructuras), petróleo para el transporte de piezas, aceites para lubricantes de elementos móviles como rotores eólicos y seguidores solares, etc.

La Tabla 1 muestra los requerimientos totales en toneladas de minerales para 3 plantas hipotéticas de 100 MW: un parque eólico terrestre (compuesto por unos 50 molinos de 2 MW cada uno), una planta solar fotovoltaica sobre suelo, y una planta termosolar de concentración.

*Tabla 1: Requerimientos de materiales (toneladas) para la construcción y operación y mantenimiento a lo largo de su vida útil (20 años) de 3 plantas de 100MW de potencia instalada: una planta solar fotovoltaica representativa del mix tecnológico actual (principalmente silicio, paneles casi todos fijos) y de un parque eólico terrestre representativo del mix tecnológico actual y una planta termosolar de concentración cilíndrico parabólica. Fuente: (de Castro and Capellán-Pérez, 2020).*

	<b>Solar fotovoltaica (FV)</b>	<b>Eólica terrestre</b>	<b>Termosolar de concentración (CSP)</b>
	toneladas de una planta de 100 MW	toneladas de un parque de 100 MW	toneladas de un parque de 100 MW
Hierro (Fe)	16250.00	2200.0	65000.00
Aluminio	1600.00	224.6	1634.00
Cobre (Cu)	220.00	281.6	320.00
Acero	200.00	12610.0	24000.00

	<b>Solar fotovoltaica (FV)</b>	<b>Eólica terrestre</b>	<b>Termosolar de concentración (CSP)</b>
Cromo (Cr)	55.00		220.00
Manganeso (Mn)	50.00		6600.00
Estaño (Sn)	46.30		
Níquel (Ni)	23.50	11.1	94.00
Zinc (Zn)	16.25		65.00
Magnesio (Mg)	5.35		300.00
Molibdeno (Mo)	5.00		20.00
Plata (Ag)	4.75		29.30
Plomo (Pb)	2.12		
Titanio (Ti)	0.63		2.50
Cadmio (Cd)	0.61		
Teluro (Te)	0.47		
Indio (In)	0.45		
Vanadio (V)	0.05		0.19
Galio (Ga)	0.03		
Neodimio (Nd)		6.1	
Disprosidio (Dy)		0.5	

Se puede observar que para la eólica, el acero y hierro suponen la mayor cantidad de minerales para construir las estructuras (ver Figura 3), con requerimientos del orden de decenas miles de toneladas, seguidos del cobre y el aluminio del orden de centenares de toneladas y finalmente se necesitan minerales en menor cantidad como es el caso del níquel, neodimio y disprosidio.





Figura 3: Construcción de las bases de molinos eólicos en Ostende (Bélgica). Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windmill\\_bases\\_\(Oostende\\_-\\_from\\_northwest\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windmill_bases_(Oostende_-_from_northwest).jpg)

Para ambas tecnologías solares, la primera observación a la vista de la Tabla 1 es que estas plantas y sobre todo las fotovoltaicas requieren de una mayor diversidad de minerales que la eólica, habiendo identificado el uso de hasta 18 diferentes (sin contar con el acero que es una aleación entre el hierro y otros minerales). La segunda observación es que en términos relativos por MW instalado, en general, la solar de concentración es más intensiva que las otras dos (de hecho, la densidad de materiales de la CSP ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) es entorno al doble que la de la FV), y la fotovoltaica es igual o más intensiva que la eólica, siendo éste último el caso para el hierro/acero, aluminio o níquel. Así, una planta típica solar fotovoltaica de 100 MW (similar a la mostrada en la Figura 4 que es de 84MW) de un tamaño similar a las que se están planteando construir actualmente por toda nuestra geografía, requeriría del orden de decenas de miles de toneladas de hierro, miles de toneladas de aluminio, centenares de toneladas de cobre y acero, decenas de toneladas de cromo, manganeso, estaño, níquel y zinc, así como otros numerosos minerales en menores cantidades.



Figura 4: Parque fotovoltaico (FV) en Eggebek (Alemania) de 84 MW. Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarparkEggebek.jpg>



Figura 5: Central termosolar de concentración (CSP) cilíndrico parabólica Andasol (Granada, España). Su situación se escogió por sus buenas condiciones: altiplano elevado con alta radiación solar directa, próxima a una línea de alta tensión de 400 kV, la disponibilidad de aguas de refrigeración provenientes de la falda norte de Sierra Nevada, la proximidad de infraestructuras de carretera y ferrocarril y la disposición de terreno llano sin protección medioambiental. Fuente figura izqda:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Andasol\\_Solar\\_Power\\_Station#/media/File:12-05-08\\_AS1.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Andasol_Solar_Power_Station#/media/File:12-05-08_AS1.JPG).

Fuente figura derecha: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diss.jpg>.

#### 4. Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

Una vez vistos los requerimientos de las plantas individuales, surge la pregunta de cuál sería el requerimiento total de minerales para alcanzar un sistema 100% renovable. Y esto es precisamente lo que investigamos en un trabajo más amplio (ver (Capellán-Pérez et al., 2019)),

enfocado específicamente a analizar los requerimientos minerales de la transición a 100% renovables en el sistema eléctrico mundial en el contexto de un escenario de “Crecimiento Verde” caracterizado por la continuación del crecimiento económico, una mejora sustancial de la eficiencia y tasas de reciclado, electrificación del transporte, etc. En suma, un escenario como el habitualmente propuesto por las instituciones como solución a la crisis ambiental (European Commission, 2011; OECD, 2018, 2011; UNEP, 2011a; World Bank, 2012).

Existen gran incertidumbre en relación a la futura disponibilidad de minerales; las estimaciones de reservas y recursos de minerales son aún más problemáticas que las de los combustibles fósiles (Capellán-Pérez et al., 2016). Estimaciones que se puedan considerar relativamente robustas se encuentran limitadas a algunos minerales concretos que se han estudiado con más profundidad (e.g. (Mohr et al., 2012; Northey et al., 2014; Sverdrup and Ragnarsdottir, 2014)). De hecho, aunque el concepto de “pico de petróleo” y otros combustibles fósiles se ha explorado y debatido en la literatura de forma extensa (Kerschner and Capellán-Pérez, 2017), ha habido en comparación mucha menos investigación centrada en el concepto de los picos de los minerales (Bardi, 2014; Bardi and Pagani, 2007; Valero and Valero, 2010). Por estas razones, la disponibilidad de minerales no restringe el desarrollo económico en los modelos MEDEAS, al contrario del caso de los combustibles fósiles (Capellán-Pérez et al., 2020).

Para poder identificar potenciales escaseces futuras, en este trabajo comparamos la extracción primaria acumulada durante el periodo estudiado con los niveles de reservas y recursos estimados actualmente. Generalmente el término “recursos” representa la cantidad de mineral (probado o geológicamente posible), que se supone se encuentran bajo tierra pero que no puede ser extraídos hoy en día por restricciones tecnológicas o económicas pero que sí podrían serlo quizá en el futuro. “Reservas” se refiere a la fracción de los “recursos” que se estima son recuperables con la tecnología y precios actuales. Como referencia se usan los datos de la USGS (USGS, 2017), complementados con otras fuentes (Emsley, 2001; Frenzel et al., 2016, 2014; Sverdrup and Ragnarsdottir, 2014; USGS, 2015) (ver Tabla 1 en MEDEAS (2016)).

La Figura 6 muestra la extracción acumulada de minerales para alcanzar un sistema eléctrico 100% renovable a nivel mundial para las tecnologías alternativas durante el periodo 2015-2060 vs las reservas y recursos estimadas actuales. La extracción acumulada superaría las reservas para 5 minerales (telurio, indio, estaño, plata y galio), mientras que para 4 minerales más se necesitarían al menos  $\frac{1}{4}$  de las reservas (litio, manganeso, plomo y cobre). En cuanto a la comparación con los recursos, 2 minerales todavía verían agotados sus recursos (telurio e indio) y 2 más requerirían  $\frac{1}{4}$  de ellos (plata y manganeso).

Extracción acumulada de minerales para tecnologías alternativas vs disponibilidad (año 2060)

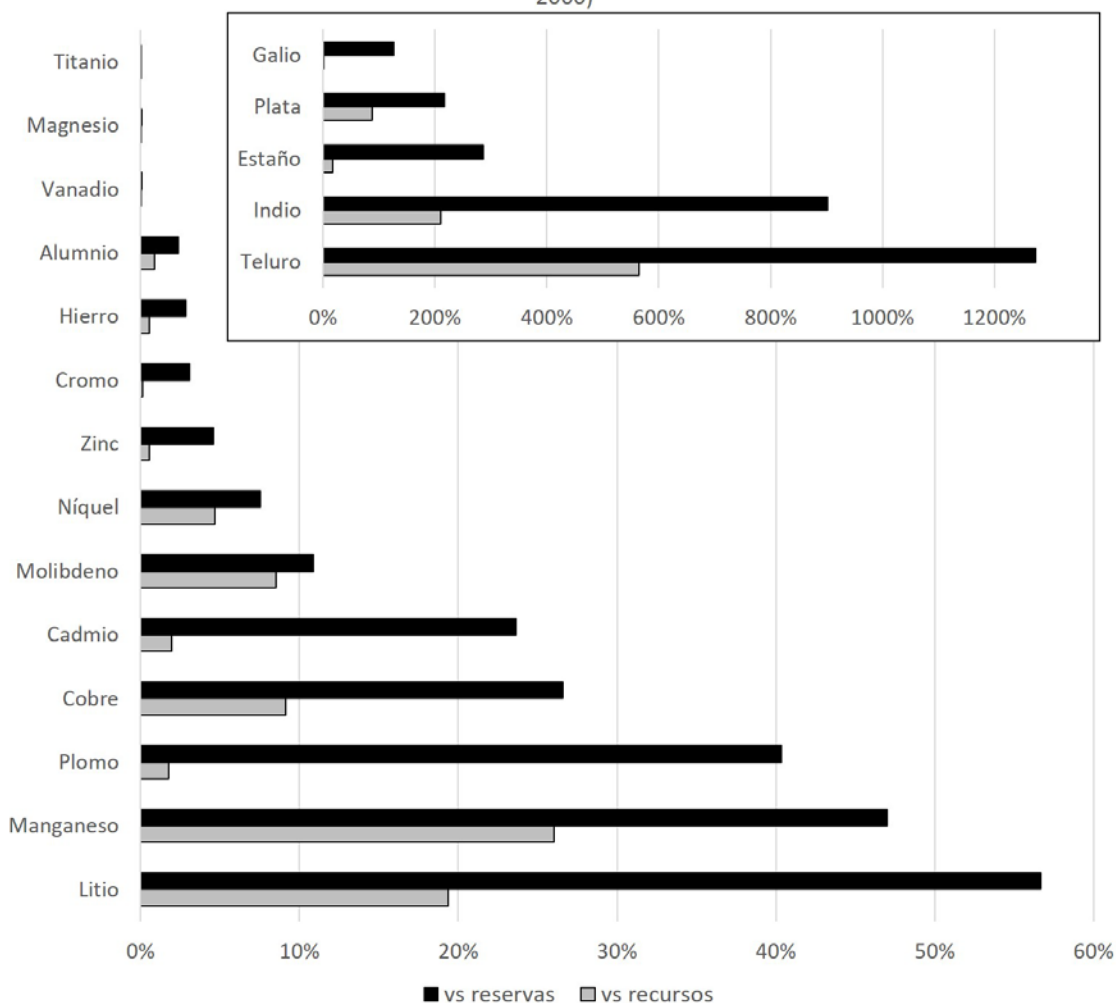


Figura 6: Extracción acumulada para alcanzar un sistema eléctrico 100% renovable a nivel mundial (2015-2060) de minerales para tecnologías alternativas vs disponibilidad: reservas (negro) y recursos (gris) en el año 2060.

Las tecnologías más afectadas por esta situación de eventual escasez serían la solar fotovoltaica (telurio, indio, plata y manganeso), la solar CSP (plata y manganeso) y las baterías de litio (litio, manganeso). A priori parecería que las tecnologías eólicas se verán menos afectadas. En particular, galio e indio están en la lista de 14 minerales críticos identificados por la UE (EC, 2010). Por otro lado, los resultados obtenidos muestran que la transición a las tecnologías renovables intensificará particularmente la demanda de cobre, la base de la infraestructura de comunicaciones en las sociedades modernas, requiriendo entorno al 25% de las actuales reservas y 10% de los recursos globales. Sin embargo, nuestro análisis no ha considerado el total de los requerimientos de materiales para nuevas redes eléctricas; su consideración habría aumentado esos ratios. Por ejemplo, García-Olivares et al., (2012) encontraron considerando este efecto que se podrían necesitar entorno al 60-70% de las actuales reservas.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la demanda para tecnologías alternativas será una parte del total de la economía. La Figura 7 muestra los resultados de la demanda acumulada

total en el periodo 2015-2060 para nuestra lista de minerales comparado con los niveles de reservas y recursos.

Al computar la demanda estimada de estos minerales por el resto de la economía, los resultados empeoran ostensiblemente, aunque lo hacen de forma diferente dependiendo de cada mineral. Mientras que para algunos minerales la demanda acumulada se incrementa ligeramente (cromo, hierro, magnesio, titanio, vanadio y zinc; < 10%), para otros se dispara por encima del 100%, como es el caso del aluminio, cadmio, cobre, galio, indio, litio, plata y estaño. Los minerales cuya demanda primaria acumulada supera el nivel actual de reservas incluyen además de los antes mencionados al plomo, zinc, manganeso, níquel, cobre, molibdeno y cadmio (Figura 7). 3 minerales más requerirían al menos  $\frac{1}{4}$  de las reservas actuales: cromo, litio y vanadio. La plata se sumaría al grupo de minerales que vería agotado también sus recursos. 6 minerales más requerirían al menos  $\frac{1}{4}$  de las actuales reservas: manganeso, molibdeno, níquel, cobre, estaño y zinc. Pero no estamos hablando sólo del futuro. Por ejemplo, un estudio reciente concluyó que existe una relación estadísticamente significativa entre la expansión de los parques fotovoltaicos por todo el mundo en los últimos años y el incremento del precio de la plata (Apergis and Apergis, 2019). De hecho, nuestros resultados indican que aproximadamente un 18% de la demanda global de plata en 2016 fue para fotovoltaica.

Extracción acumulada total de minerales vs disponibilidad (año 2060)

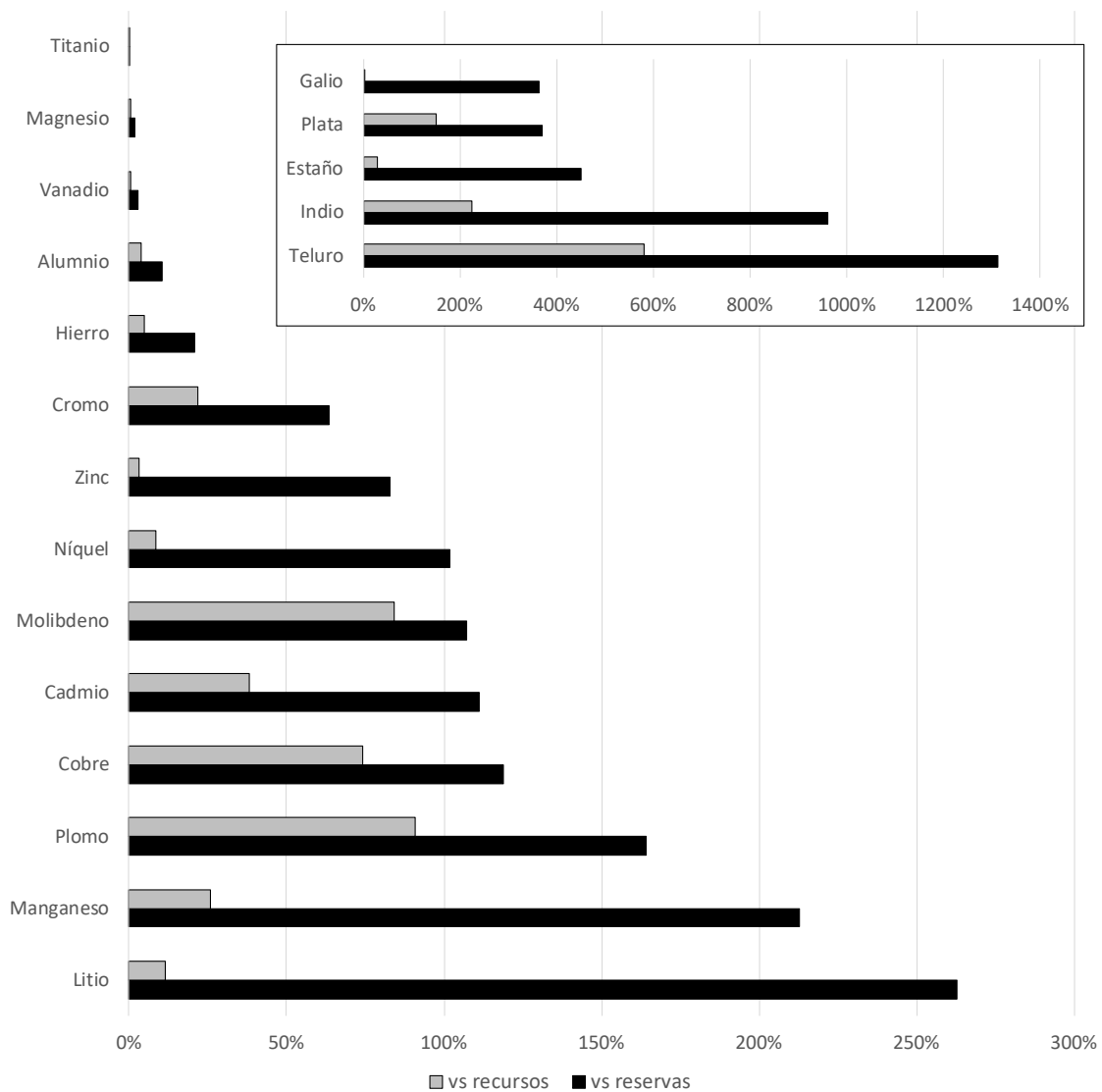


Figura 7: Extracción acumulada para alcanzar un sistema eléctrico 100% renovable a nivel mundial (2015-2060) de minerales para toda la economía vs disponibilidad: reservas (negro) y recursos (gris) en el año 2060.

Un análisis posterior profundizó en las implicaciones para la escasez de minerales de las diferentes tecnologías de baterías eléctricas que existen (Pulido Sanchez et al., 2021), incorporando además de la LMO estudiada en la versión estándar de MEDEAS, baterías tipo NCA, LFP y NMC, lo que añade minerales como el cobre o el cobalto a la lista de materiales arriba enunciados.

## 5. ¿Qué podemos esperar de las futuras mejoras tecnológicas?

No hay duda de que en las últimas tres décadas la mayoría de tecnologías renovables, y sobre todo aquellas con más potencial tecno-sostenible como las solares y eólicas, han pasado de ser opciones no competitivas de alto coste y relativa baja eficiencia, a sistemas de costes competitivos en un proceso de continua mejora de eficiencia y reducciones de las intensidades materiales para muchos de los materiales críticos. Ante esta situación, cabe preguntarse en qué medida efectos dinámicos no considerados en las simulaciones presentadas en las secciones anteriores podrían cambiar o no los ratios de demanda y disponibilidad.



Quizá convendría empezar por matizar que las recientes reducciones de costes de las tecnologías renovables modernas no se deben exclusivamente a cuestiones de mejora tecnológica, y que el papel de efectos económicos y financieros coyunturales (por ejemplo, periodo histórico de bajas tasas de interés que facilitan las inversiones intensivas en capital como son las de las renovables, economías de escala al aumentar la producción, subcontratación a países con legislación laboral y ambiental menos estricta, etc.). Adicionalmente, el precio de las materias primas está sujeto a múltiples influencias (marco institucional, estructura oligopólica del mercado, etc.) (Lawn, 2004; Norgaard, 1990; Reynolds, 1999) lo que hace errática su evolución a largo plazo. Por ejemplo, para el caso de la energía solar fotovoltaica, se ha encontrado que la reducción en el costo promedio de producción y el precio de los paneles solares ha sido impulsada principalmente por factores como la reducción en el precio del polisilicio, la creciente penetración de mercado de empresas de menores costes de China, el tamaño cada vez mayor de las instalaciones y los aumentos en la inversión de la industria, además de la mejora tecnológica principalmente en la forma de la reducción en el uso de polisilicio y la mejora de la eficiencia de los paneles principalmente (Nemet, 2006; Pillai, 2015).

Aunque existe cierta interacción entre el tamaño de la demanda futura y la magnitud del recurso subterráneo que se puede esperar que sea extraíble vía efectos de precios, que pueden incentivar la exploración de nuevos yacimientos así como la demanda dispuesta a pagar un precio mayor, generalmente se entiende que las restricciones geológicas dominan la disponibilidad de minerales a mediano plazo (cf. (Calvo et al., 2017; Henckens et al., 2016)). Los efectos de los precios pueden tener una influencia limitada por el hecho de que la mayoría de los metales se obtienen de hecho como co-productos en procesos de producción múltiple (Nuss and Eckelman, 2014). Además, la sustitución de metal por metal a gran escala solo es posible con un metal que se produce en cantidades mayores que el que se pretende reemplazar, como, por ejemplo, Sverdrup y Olafsdottir (Sverdrup and Olafsdottir, 2019) ilustran para la sustitución de Ni por Co, Mo, Ta o Va en la fabricación de acero inoxidable. Además, si el material de sustitución es escaso en su propia oferta, una sustitución sustancial puede agravar aún más la escasez. La sustitución de tecnología por tecnología tiene un umbral de implementación más grande que las sustituciones de componente por componente o metal por metal, porque tales sustituciones a menudo requieren un conjunto diferente de conocimientos y procesos de fabricación y, por lo tanto, generalmente toman más tiempo para implementar, como muestra (Curtius, 2018) para el caso de la energía FV integrada en edificios. Hay que tener en cuenta que las sustituciones de metal por metal dirigidas a utilizar materiales más abundantes tienden a reducir el rendimiento de los sistemas de energía, por ejemplo, la sustitución de Ag por Al en CSP reduciría la reflectividad del espejo del 97% a menos del 88% (de Castro and Capellán-Pérez, 2018); Te en películas delgadas (de Castro et al., 2013); Nd en imanes permanentes (Pavel et al., 2017); de manera similar, reemplazar Ag con Cu como elementos conductores en células solares de silicio cristalino tendería a reducir su eficiencia (Moreau et al., 2019). Por tanto, esto tendería a producir un efecto rebote de la demanda total de minerales para lograr la misma producción.

Por otro lado, es necesario también tener presente que a medida que la capacidad instalada de las energías renovables siga creciendo a alto ritmo y alcancen una participación sustancial en el mix energético, habrá algunos factores muy relevantes que tenderán a contrarrestar las posibles mejoras técnicas y que tampoco se han tenido en cuenta en las simulaciones mostradas anteriormente:

- Inversiones energéticas adicionales y pérdidas relacionadas con la gestión de la intermitencia de las renovables variables como la capacidad de almacenamiento (PHS, baterías eléctricas, hidrógeno, etc.), power-to-X y redes de transporte adicionales (el análisis actual tan sólo considera los cortes a la generación de electricidad por exceso de producción en periodos de menor demanda que redundan en reducciones del factor de planta (horas funcionamiento/horas que podrían estar en funcionamiento)).
- El efecto de los rendimientos decrecientes en el potencial de las energías renovables, es decir, después de que se ocupan los mejores lugares, es necesario trasladarse a sitios con menor rentabilidad económica (por ejemplo menores vientos o radiación solar) (Dale et al., 2011; Dupont et al., 2020, 2018), fenómenos que pueden empeorar en algunos casos por las limitaciones de disponibilidad de la tierra (Capellán-Pérez et al., 2017b; Van de Ven et al., 2021),
- El aumento en los requisitos de energía para el procesamiento de minerales relacionado con la disminución de la ley de los minerales debido al aumento de la extracción acumulada (Calvo et al., 2016; Fizaine and Court, 2015; Harmsen et al., 2013; Mudd, 2010),
- Límites a las tasas de reciclaje (que no sean termodinámicos): la mayoría de los procesos de mecanizado requieren algún material virgen o puro porque la chatarra reciclada no se puede reutilizar por completo (Dahmus and Gutowski, 2004).
- Límites termodinámicos desde el lado de la generación, como por ejemplo el hecho de que existen límites absolutos a la altura de los rotores para el viento o la ley de Benz (las grandes turbinas eólicas modernas ya alcanzan coeficientes de rendimiento máximos en el rango de 45-50% que están bastante cerca del límite del 59,26% (Dupont et al., 2018)), o los límites en la conversión de la luz solar en electricidad, como el límite de Schokley-Queisser para células solares de unión única. Aunque este último límite podría superarse con tecnologías multi-junction, la pregunta general clave es qué tan realista es considerando que las tecnologías más sofisticadas -también relacionadas con el punto anterior- son realmente escalables a un nivel significativo en comparación con la demanda total de energía, o si en el futuro seguirán siendo marginales.

Por todo lo anterior, es difícil anticipar con claridad si las futuras mejoras tecnológicas serán capaces de compensar todos los efectos arriba mencionados.

## 6. Conclusiones

Dada la actual situación de crisis ambiental multidimensional, la transición a las energías renovables es una condición necesaria, aunque no suficiente, para alcanzar sociedades sostenibles. Las plantas de generación de energías renovables dependen, paradójicamente, de recursos no renovables para su funcionamiento. La cuestión de la abundancia o escasez de minerales es siempre relativa a la demanda que hagamos de ellos y la disponibilidad que haya en la corteza terrestre y cómo de accesible sea extraerlos con la tecnología y el contexto económico dados. Como se demuestra con los cálculos mostrados en este artículo, en un escenario de “Crecimiento Verde” a nivel mundial, muchos de estos minerales dispararían su demanda extraordinariamente para suministrar minerales para la construcción de nuevas infraestructuras de captación de energías renovables y almacenamiento eléctrico. Para algunos de estos minerales podrían incluso no satisfacerse su demanda esperada mundial en las próximas décadas, lo que concuerda en general con resultados de otros trabajos (de Koning et al., 2018; EC, 2010; Elshkaki and Graedel, 2013; García-Olivares et al., 2012; Kleijn et al.,



2011; Prior et al., 2012; Tokimatsu et al., 2017; Valero et al., 2018). Así, estos resultados arrojan dudas sobre la viabilidad a la transición a las energías renovables tal y como se plantea actualmente desde las instituciones nacionales e internacionales principales.

De hecho, desde el punto de vista de la visión hegemónica del “Crecimiento Verde” se pone el énfasis en la promoción de la “Economía Circular” para resolver futuras potenciales escaseces minerales, es decir, cerrar los ciclos y aumentar todo lo posible las tasas de reciclado. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que existe una incompatibilidad entre una transición muy rápida y la mejora de las tasas de reciclado puesto que es necesario cambios profundos en los procesos de diseño y productivos además de los culturales y sistémicos (fomentando por ejemplo diseños que permitan la recuperación de minerales en vez de mejores prestaciones técnicas o menor coste). Además, en este análisis por simplicidad hemos asumido que los minerales a reciclar ya se encuentran en las cantidades demandadas dentro de la economía, lo que no tiene por qué ser siempre el caso, y aún menos para aquellos minerales para los que está previsto aumentar mucho su demanda respecto del pasado. Por otro lado, la eventual sustitución por otros minerales de menor rendimiento y más abundantes implicaría aumentar el número de instalaciones, lo que a su vez empeoraría otros problemas potenciales como son la ocupación de suelo para tecnologías como la solar (Capellán-Pérez et al., 2017b).

Los resultados presentados en este trabajo tienen dos lecturas principales: por un lado, la transición a las energías renovables en un contexto de “Crecimiento Verde” incrementará la presión para la extracción de recursos mineros a lo largo y ancho del planeta, con todos los graves problemas que el extractivismo acarrea en las poblaciones locales como la contaminación por metales pesados de agua y suelo agrícola, afectación a la salud de los trabajadores y las comunidades vecinas, etc. (UNEP, 2013). Por otro lado, la insuficiencia de las actuales reservas conocidas para cubrir la futura demanda de algunos de los minerales actualmente empleados incrementará las presiones para hacer avanzar la frontera extractiva a otras zonas (Conde, 2017), como está de hecho ocurriendo recientemente en la UE y España (Grupo Minería EeA, 2017; Solís, 2017). Sin embargo, este área de investigación permanece prácticamente inexplorada, y debería ser el objeto de futuros trabajos: ¿dónde es más probable que se abran las futuras minas, en qué condiciones, y qué aspectos ambientales y sociales se verían más afectados? ¿quién se beneficiará de los minerales extraídos, tanto desde la perspectiva del “usuario final”, como de las comunidades locales en las que se realiza la extracción?

La experiencia indica que en caso de realizarse la transición a las energías renovables sin un cambio profundo en las estructuras económicas y sociales globales que rigen actualmente el comercio y economía globales, ésta podría ser un factor más que viniera a agravar las condiciones de vida de numerosas personas del Sur global y destruir sus ecosistemas, como ya ocurre hoy en día con los biocombustibles exportados a los países ricos desde áreas tropicales, o muchos minerales el coltán, del que el tantalio se usa como condensadores en los equipos electrónicos (Ayres, 2012; UNEP, 2013). Esta necesidad de cambio de modelo es reforzada por el hecho de que, al menos hasta la fecha, los certificados que tratan de asegurar una “minería responsable” (en analogía a los productos de comercio justo), se han mostrado muy insuficientes (Childs, 2014; Hilson, 2014; Spiegel, 2015).

Es necesario además complementar la dimensión social de los impactos de la transición a las energías renovables con la dimensión geopolítica, pues muchos de los territorios de mayor potencial de fuentes de energía renovable (como los desiertos cálidos) están alejados de los principales centros de consumo. Dado que al ser más dispersas y requerir líneas de transmisión

más amplias, ¿hasta qué punto son más frágiles ante ataques, guerras, revueltas, etc. que los centros de extracción y producción fósiles, que al estar más concentrados son más fáciles de defender?

En conclusión, las plantas de generación de energías renovables son capaces de generar electricidad y calor con menores niveles de emisiones de efecto invernadero en comparación con las fósiles, pero no están libres de impactos ambientales ni consideraciones geopolíticas y siguen sujetas a los límites biofísicos del planeta. Así, tener en cuenta la dimensión material aporta otro argumento más para que la transición energética se produzca en un escenario de decrecimiento material y energético, incluyendo cambios radicales en el modo en el que las materias primas llegan hasta los consumidores actualmente. Así, el diseño de políticas de transición energética debería de tener como un objetivo básico asegurar el bienestar de la población minimizando el consumo de energía.

## Referencias

- Anderson, K., Bows, A., 2012. A new paradigm for climate change. *Nature Clim. Change* 2, 639–640. <https://doi.org/10.1038/nclimate1646>
- Apergis, I., Apergis, N., 2019. Silver prices and solar energy production. *Environ Sci Pollut Res* 26, 8525–8532. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04357-1>
- Ayres, C.J., 2012. The international trade in conflict minerals: coltan. *Critical perspectives on international business* 8, 178–193. <https://doi.org/10.1108/17422041211230730>
- Bardi, U., 2014. *Extracted: How the Quest for Mineral Wealth Is Plundering the Planet*. Chelsea Green Publishing, White River Junction, Vermont.
- Bardi, U., Pagani, M., 2007. Peak minerals. *The Oil Drum* 15.
- Brondizio, E., Settele, J., Díaz, S., Ngo, H., 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat.
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, Alicia, Valero, Antonio, 2016. Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources* 5, 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>
- Calvo, G., Valero, Alicia, Valero, Antonio, 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. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.009>
- Capellán-Pérez, I., Arto, I., Polanco-Martínez, J.M., González-Eguino, M., Neumann, M.B., 2016. Likelihood of climate change pathways under uncertainty on fossil fuel resource availability. *Energy Environ. Sci* 9, 2482–2496. <https://doi.org/10.1039/C6EE01008C>
- Capellán-Pérez, I., Blas, I. de, Nieto, J., Castro, C. de, Miguel, L.J., Carpintero, Ó., Mediavilla, M., Lobejón, L.F., Ferreras-Alonso, N., Rodrigo, P., Frechoso, F., Álvarez-Antelo, D., 2020. MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. *Energy Environ. Sci.* 13, 986–1017. <https://doi.org/10.1039/C9EE02627D>
- Capellán-Pérez, I., de Blas, I., Nieto, J., De Castro, C., Miguel, L.J., Mediavilla, M., Carpintero, Ó., Rodrigo, P., Frechoso, F., Cáceres, S., 2017a. D4.1 MEDEAS Model and IOA implementation at global geographical level (Deliverable MEDEAS project, <http://www.medeas.eu/deliverables> No. D4.1). MEDEAS project, Barcelona, Spain.
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Arto, I., 2017b. Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, 760–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.137>

- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Miguel González, L.J., 2019. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews* 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Capellán-Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Carpintero, Ó., Miguel, L.J., 2014. Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach. *Energy* 77, 641–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.063>
- Carbajales-Dale, M., Barnhart, C.J., Brandt, A.R., Benson, S.M., 2014. A better currency for investing in a sustainable future. *Nature Clim. Change* 4, 524–527. <https://doi.org/10.1038/nclimate2285>
- Childs, J., 2014. From ‘criminals of the earth’ to ‘stewards of the environment’: The social and environmental justice of Fair Trade gold. *Geoforum* 57, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.08.016>
- Conde, M., 2017. Resistance to Mining. A Review. *Ecological Economics* 132, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025>
- Curtius, H.C., 2018. The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. *Renewable Energy* 126, 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.001>
- Dahmus, J.B., Gutowski, T.G., 2004. An environmental analysis of machining, in: ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, pp. 643–652.
- Daily, G., 1997. *Nature’s services: societal dependence on natural ecosystems*, Island Press. ed. Island Press, Washington DC (USA).
- Dale, M., Krumdieck, S., Bodger, P., 2011. A Dynamic Function for Energy Return on Investment. *Sustainability* 3, 1972–1985. <https://doi.org/10.3390/su3101972>
- de Blas, I., Mediavilla, M., Capellán-Pérez, I., Duce, C., 2020. The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm. *Energy Strategy Reviews* 32, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100543>
- de Castro, C., Capellán-Pérez, I., 2020. Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energies* 13, 3036. <https://doi.org/10.3390/en13123036>
- de Castro, C., Capellán-Pérez, I., 2018. Concentrated Solar Power: Actual Performance and Foreseeable Future in High Penetration Scenarios of Renewable Energies. *Biophys Econ Resour Qual* 3, 14. <https://doi.org/10.1007/s41247-018-0043-6>
- de Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L.J., Frechoso, F., 2013. Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 824–835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.040>
- de Koning, A., Kleijn, R., Huppes, G., Sprecher, B., van Engelen, G., Tukker, A., 2018. Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resources, Conservation and Recycling* 129, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040>
- Dupont, E., Koppelaar, R., Jeanmart, H., 2020. Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy* 257, 113968. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>
- Dupont, E., Koppelaar, R., Jeanmart, H., 2018. Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy* 209, 322–338. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- EC, 2010. *Critical raw materials for the UE. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*. European Commission.
- Elshkaki, A., Graedel, T.E., 2013. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production* 59, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.003>

- Emsley, J., 2001. *Nature's Building Blocks: An A–Z Guide to the Elements*. Oxford, England, UK: Oxford University Press.
- European Commission, 2011. *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, Brussels.
- Fizaine, F., Court, V., 2015. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI. *Ecological Economics* 110, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.12.001>
- Frenzel, M., Kertris, M.P., Gutzmer, J., 2014. On the geological availability of germanium. *Mineralium deposita* 49, 471–486.
- Frenzel, M., Ketris, M.P., Seifert, T., Gutzmer, J., 2016. On the current and future availability of gallium. *Resources Policy* 47, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.11.005>
- García-Olivares, A., Ballabrera-Poy, J., García-Ladona, E., Turiel, A., 2012. A global renewable mix with proven technologies and common materials. *Energy Policy* 41, 561–574. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.018>
- Grupo Minería EeA, 2017. El 'boom' de la minería en España. *El Ecologista* 94.
- Hall, C.A.S., Klitgaard, K.A., 2012. *Energy and the Wealth of Nations: Understanding the Biophysical Economy*. Springer New York, New York, NY.
- Hall, C.A.S., Lambert, J.G., Balogh, S.B., 2014. EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy* 64, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Harmsen, J.H.M., Roes, A.L., Patel, M.K., 2013. The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. *Energy* 50, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.006>
- Henckens, M.L.C.M., van Ierland, E.C., Driessen, P.P.J., Worrell, E., 2016. Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy* 49, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.012>
- Hilson, G., 2014. 'Constructing' Ethical Mineral Supply Chains in Sub-Saharan Africa: The Case of Malawian Fair Trade Rubies. *Development and Change* 45, 53–78. <https://doi.org/10.1111/dech.12069>
- IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5 °C (IPCC Special Report)*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. ed. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- IPCC, 2011. *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York (USA).
- ISE, 2019. *Photovoltaics Report*. Fraunhofer ISE, Freiburg.
- Kerschner, C., Capellán-Pérez, I., 2017. Peak-Oil and Ecological Economics, in: Spash, C.L. (Ed.), *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and Society*. Abingdon, pp. 425–435.
- Kis, Z., Pandya, N., Koppelaar, R.H.E.M., 2018. Electricity generation technologies: Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO2 emissions reduction. *Energy Policy* 120, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.033>
- Kleijn, R., van der Voet, E., Kramer, G.J., van Oers, L., van der Giesen, C., 2011. Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy* 36, 5640–5648. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.003>
- Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M., Schandl, H., Eisenmenger, N., 2008. The Global Sociometabolic Transition. *Journal of Industrial Ecology* 12, 637–656. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00065.x>

- Lawn, P., 2004. How well are resource prices likely to serve as indicators of natural resource scarcity? *International Journal of Sustainable Development* 7, 369–397.  
<https://doi.org/10.1504/IJSD.2004.006416>
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS* 105, 1786–1793.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>
- Levin, S.A., Carpenter, S.R., Godfray, H.C.J., Kinzig, A.P., Loreau, M., Losos, J.B., Walker, B., Wilcove, D.S., 2009. *The Princeton guide to ecology*. Princeton University Press, Princeton, N.J. (USA).
- MEA, 2005. *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Scenarios, Global Assessment Reports*. Island Press, Washington DC (USA).
- MEDEAS, 2016. Deliverable D2.2 (Deliverable MEDEAS project). CIRCE, BSERC, MU, UVa, IIASA, ICM-CSIC & AEA.
- Melin, H.E., 2019. State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review. *Circular Energy Storage*. Commissioned by The Swedish Energy Agency 57.
- Miller, L.M., Keith, D.W., 2018. Climatic Impacts of Wind Power. *Joule* 2, 2618–2632.  
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.009>
- Mohr, S.H., Mudd, Gavin M., Giurco, D., 2012. Lithium Resources and Production: Critical Assessment and Global Projections. *Minerals* 2, 65–84.  
<https://doi.org/10.3390/min2010065>
- Moreau, V., Dos Reis, P.C., Vuille, F., 2019. Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System. *Resources* 8, 29.  
<https://doi.org/10.3390/resources8010029>
- Mudd, G.M., 2010. The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. *Resources Policy* 35, 98–115.  
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.12.001>
- Nemet, G.F., 2006. Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. *Energy Policy* 34, 3218–3232.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.020>
- Norgaard, R.B., 1990. Economic indicators of resource scarcity: A critical essay. *Journal of Environmental Economics and Management* 19, 19–25. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(90\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0095-0696(90)90057-6)
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G., Weng, Z., Giurco, D., 2014. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling* 83, 190–201.
- Nuss, P., Eckelman, M.J., 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLOS ONE* 9, e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>
- OECD, 2019. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD Publishing, Paris (France).
- OECD, 2018. *OECD work on green growth*. OECD, <http://www.oecd.org/greengrowth/oecdworkongreengrowth.htm> (Retrieved 12-3-2018).
- OECD, 2011. *Towards green growth*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- O'Neill, D.W., Fanning, A.L., Lamb, W.F., Steinberger, J.K., 2018. A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability* 1, 88. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>
- Pavel, C.C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., Blagoeva, D., 2017. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy* 52, 349–357.  
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>

- Pillai, U., 2015. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. *Energy Economics* 50, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.015>
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., Behrisch, J., 2012. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change, Global transformations, social metabolism and the dynamics of socio-environmental conflicts* 22, 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009>
- Pulido Sanchez, D.P., Capellán-Pérez, I.C., Mediavilla Pascual, M., de Castro Carranza, C., Frechoso Escudero, F.A., 2021. Analysis of the material requirements of global electrical mobility. *DYNA* 96, 207–213. <https://doi.org/10.6036/9893>
- Reynolds, D.B., 1999. The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity. *Ecological Economics* 31, 155–166. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00098-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00098-1)
- Schneider, S.H., Morton, L., 1981. *The Primordial Bond Exploring Connections Between Man and Nature Through the Humanities and Sciences*. Plenum Press, New York.
- Smil, V., 2015. *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Smil, V., 2010. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Praeger, Santa Barbara, California, USA.
- Smil, V., 2008. *Energy in nature and society: general energetics of complex systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Solís, E., 2017. Euroextractivismo, o cómo la Comisión Europea impulsa los proyectos mineros. *El Ecologista* 94.
- Spiegel, S.J., 2015. Contested Diamond Certification: Reconfiguring Global and National Interests in Zimbabwe’s Marange Fields, in: Grynberg, R., Mbayi, L. (Eds.), *The Global Diamond Industry: Economics and Development Volume II*. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 153–180. [https://doi.org/10.1057/9781137537614\\_7](https://doi.org/10.1057/9781137537614_7)
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., Ludwig, C., 2015a. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* 2, 81–98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W. de, Wit, C.A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015b. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Sverdrup, H.U., Olafsdottir, A.H., 2019. Assessing the Long-Term Global Sustainability of the Production and Supply for Stainless Steel. *Biophys Econ Resour Qual* 4, 8. <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0056-9>
- Sverdrup, H.U., Ragnarsdottir, K.V., 2014. Natural resources in a planetary perspective. *Geochemical Perspectives*, volume 3, number 2.
- Tokimatsu, K., Wachtmeister, H., McLellan, B., Davidsson, S., Murakami, S., Höök, M., Yasuoka, R., Nishio, M., 2017. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2°C target. *Applied Energy, Transformative Innovations for a Sustainable Future – Part II* 207, 494–509. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.151>
- Trainer, T., 2017. Some problems in storing renewable energy. *Energy Policy* 110, 386–393. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.061>
- Trainer, T., 2012. A critique of Jacobson and Delucchi’s proposals for a world renewable energy supply. *Energy Policy* 44, 476–481. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.037>
- Trainer, T., 2010. Can renewables etc. solve the greenhouse problem? The negative case. *Energy Policy* 38, 4107–4114. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.037>

- UNEP, 2013. Environmental risks and Challenges of anthropogenic metals flows and cycles. International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- UNEP, 2011a. Towards a Green Economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- UNEP, 2011b. Recycling rates of metals. A status report. International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- USGS, 2017. Mineral Commodity Summaries 2017. United States Geological Survey, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- USGS, 2015. Mineral Commodity Summaries 2015. United States Geological Service.
- Valero, Alicia, Valero, Antonio, 2010. Physical geonomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1074–1083. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.010>
- Valero, Alicia, Valero, Antonio, Calvo, G., Ortego, A., 2018. Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 178–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>
- Van de Ven, D.-J., Capellán-Pérez, I., Arto, I., Cazcarro, I., De Castro, C., Patel, P., González-Eguino, M., 2021. The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports* 11, 2907. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>
- Wang, J., Feng, L., Tang, X., Bentley, Y., Höök, M., 2017. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: A supply-side analysis. *Futures* 86, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.04.007>
- World Bank, 2012. Inclusive green growth: the pathway to sustainable development. World Bank Publications, Washington DC (USA).