

## ENERGÍA, SOSTENIBILIDAD Y TRANSICIÓN: NUEVOS DESAFÍOS Y PROBLEMAS PENDIENTES

## ENERGY, SUSTAINABILITY AND TRANSITION: NEW CHALLENGES AND UNRESOLVED ISSUES

**Óscar Carpintero**

Departamento de Economía Aplicada y Grupo de Energía,  
Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS)  
Universidad de Valladolid  
<https://orcid.org/0000-0001-9142-8931>  
carpin@uva.es

**Fernando A. Frechoso**

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Grupo de Energía,  
Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS)  
Universidad de Valladolid  
<https://orcid.org/0000-0002-1119-9217>  
ffrechoso@uva.es

**Cómo citar este artículo/Citation:** Carpintero, Óscar; Frechoso, Fernando A. (2023). Energía, sostenibilidad y transición: nuevos desafíos y problemas pendientes. *Arbor*, 199(807): a687. <https://doi.org/10.3989/arbor.2023.807001>

**Copyright:** © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución *Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)*.

### 1. INTRODUCCIÓN

«La energía es la única moneda de cambio universal: sin transformación de energía no hay nada –nada de nada; *niet*». Así de taxativo se muestra Vaclav Smil (2021a, p. 11) en el comienzo de su reciente *tour de force* sobre el papel de la energía en la historia de la humanidad. En efecto, la energía y sus implicaciones han sido materia de análisis, discusión y preocupación histórica no sólo entre científicos naturales, sino también entre científicos sociales interesados por las relaciones entre el uso de la energía y las diferentes formas de organización económica y social. Ahí están las reflexiones sobre el metabolismo energético y material de los sistemas económicos por parte de los pioneros de la economía ecológica como Sergei Podolinski, Patrick Geddes o Frederic Soddy, que abarcan la segunda mitad del siglo XIX y los primeros decenios del siglo XX (Martínez Alier y Schlüpmann, 1991, Martínez Alier, 1995). O ya, más recientemente, a partir de la segunda mitad del siglo XX, las reflexiones de sociólogos como Fred Cottrell y su clásico *Energía y sociedad* (1955)<sup>1</sup>, donde, por ejemplo, se intenta sistematizar el papel de las distintas fuentes energéticas en los diferentes modelos de sociedad y se aporta, de manera novedosa, la noción de «excedente energético» (*surplus energy*), definido como la diferencia entre la energía obtenida de un proceso y aquella invertida en ponerlo en marcha (un antecedente de la moderna Tasa de Retorno Energético, o EROI, por sus siglas en inglés. Véase: Hall, 2017). Cottrell (1955) mostró cómo la revolución industrial y su recurso a los combustibles fósiles, supuso un giro radical en la obtención de estos *excedentes energéticos*, sobre todo cuando se los comparaba con las formas

1 Véase, en este número, el texto que recoge el capítulo VII del libro de Cottrell (1955) y la presentación realizada por Ernest García.

tradicionales de energía basadas en la biomasa renovable. Y también que este uso masivo de los combustibles fósiles acabó convirtiendo en *no renovables* actividades productivas como la agricultura, que pasaron de articularse sobre el flujo renovable derivado del sol a convertirse en deudoras del uso de hidrocarburos fósiles (fertilizantes, maquinaria, etc.) que, por definición, tienen un carácter agotable.

En ese contexto en el que, con carácter general, el desarrollo de un país se asociaba al incremento en el consumo energético de su población, ya desde finales de la década de los años 60 e inicios de los 70 del siglo XX se comenzó a problematizar esta relación. La incipiente conciencia sobre los problemas ambientales a nivel global (Cumbre de Estocolmo sobre el Medio Humano de 1972), las reflexiones sobre los límites del crecimiento (Meadows *et al.*, 1972), textos como el *Manifiesto por la supervivencia* (Goldsmith, 1972), o las contribuciones de autores como Boulding (1966), Commoner (1971), Georgescu-Roegen (1971, 1972), o Daly (1973), llamaron la atención sobre el deterioro ecológico y la contaminación que el modelo de producción y consumo estaba provocando a todas las escalas (global, nacional o local), y del que el uso de combustibles fósiles era un rasgo fundamental.

Como es sabido, el debate entre los partidarios de continuar con el crecimiento económico y los conservacionistas preocupados por la progresiva intensidad de las amenazas ambientales se saldó con el compromiso de lograr un «desarrollo sostenible», tal y como se comenzó a acuñar en la década de los 80 con el *Informe Brundtland* (Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, CMMAD, 1988). Aparte del reconocimiento implícito de que el desarrollo logrado hasta ese momento era insostenible, la forma de hacer operativa la conocida aspiración a «satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades» (CMMAD, 1988, p. 67) dio lugar intensos debates sobre cómo medirla. En el caso de los recursos energéticos, desde la economía ecológica se propuso que su uso sostenible implicaba la utilización de fuentes renovables a escala humana y, en el caso de los combustibles fósiles (que son agotables), el mantenimiento de la capacidad energética que deberíamos legar a las generaciones futuras implicaba que la tasa de agotamiento de esos combustibles fósiles debiera ser menor o igual a la tasa de sustitución por fuentes renovables (Daly, 1990). Este criterio de sostenibilidad, como sabemos, no se ha cumplido más de tres décadas después, ya que el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO<sub>2</sub> no han dejado de aumentar a un ritmo muy superior.

En aquel contexto de emergencia del desarrollo sostenible, también la conciencia de que las sociedades capitalistas de la década de los 80 utilizaban la energía con un grado importante de despilfarro (mientras que una parte relevante de la población mundial apenas accedía a lo necesario) comenzaba a ser un dato avalado por varias investigaciones académicas. Trabajos como el de Goldemberg *et al.*, (1985) ponían de relieve que se podían satisfacer las necesidades energéticas de la población mundial con unos niveles de consumo equivalentes al 20% de los consumidos en 1980, destacando así las grandes posibilidades de ahorro y eficiencia energética para lograr la equidad. Posteriormente han sido varios los trabajos que han mostrado la existencia de un «punto de saturación» decreciente a partir del cual, un incremento en el consumo de energía primaria o final, no conlleva una mayor esperanza de vida o índice de desarrollo humano (Martínez y Ebenhack, 2008; Arto *et al.*, 2016; Rao *et al.*, 2019; Millward-Hopkins *et al.*, 2020. Véase, también, el artículo de Lina Brand-Correa en este monográfico). Y ese punto de saturación muestra que, en muchos casos, a partir de consumos medios equivalentes al 35-40% de los consumos energéticos actuales, las ganancias en términos de bienestar y desarrollo humano son muy pequeñas y, en cambio, los costes ambientales, el deterioro ecológico y el empeoramiento de las condiciones de vida globales son muy considerables. Todo lo cual obliga a buscar la forma de lograr una vida buena dentro de los límites del planeta, un asunto al que apuntan ya varias investigaciones recientes y prometedoras (O'Neill *et al.*, 2018).

Esta constatación tiene mucha relevancia ya que ni la cantidad de recursos es infinita, ni las consecuencias de su utilización son inocuas. Y no sólo por el agravamiento derivado del cambio climático, sino por el deterioro acumulado en términos de pérdida de biodiversidad, contaminación a todos los niveles, o la modificación de los ciclos biogeoquímicos fundamentales. Por tanto, y tal y como apuntaron los esposos Meadows y sus colaboradores, parece claro que en la actualidad estamos en un contexto donde afloran con fuerza los límites físicos y de recursos naturales, y las situaciones de exlimitación (*overshoot*) en relación con la expansión del modelo de producción y consumo hegemónico (Meadows *et al.*, 2002; Randers, 2012; WWF, 2020; Duarte, 2009; Heinberg, 2011). No por casualidad, la revista *Nature* recogía un importante estudio ya en 2009 (Rockström *et al.*, 2009)

donde se identificaban nueve umbrales críticos o *límites planetarios* de los que ya se habrían sobrepasado tres: a) el cambio climático, con la superación de la concentración de 350 ppm de CO<sub>2</sub>; b) el ritmo de extinción de la biodiversidad (más de 100 especies desaparecidas por millón y año respecto del límite de 10) y, c) el ciclo del nitrógeno para uso humano, con la extracción de 121 millones de toneladas que supera ampliamente el límite de 35. No en vano, el cambio climático es la manifestación de que, precisamente, hemos rebasado los límites de absorción de CO<sub>2</sub> por parte del Planeta sin incrementar su temperatura media.

Así las cosas, y visto con perspectiva, se puede llegar fácilmente a la conclusión de que, ecológicamente hablando, estamos ahora bastante peor que hace medio siglo. Pero a la vez que se ha producido esta tendencia hacia el deterioro ecológico y climático, también conocemos más y mejor las causas que lo han provocado y los impactos generados. Si juntáramos ambos extremos podríamos concluir que *cuanto más sabemos sobre estos problemas, menos hacemos para solucionarlos*<sup>2</sup>. Sólo así cabe entender que haya sido en los últimos tres decenios (desde 1990), cuando han tenido lugar varias cumbres de la Tierra, la adopción de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático, se hayan publicado los seis informes del IPCC, hayan tenido lugar 27 Conferencias de las Partes (COP), firmado el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París (2015), y, a la vez, este haya sido el período en el que se ha emitido a la atmósfera la mitad de todo el CO<sub>2</sub> vertido históricamente por la humanidad y con las tasas de crecimiento más importantes. Todo lo cual lleva a pensar que el grueso de lo que ha dado en llamarse *negociaciones climáticas globales* tiene un importante componente *ritual* que reduce drásticamente su efectividad.

## 2. CÉNIT DEL PETRÓLEO Y CAMBIO CLIMÁTICO: UN DOBLE DESAFÍO PARA LA SOSTENIBILIDAD

Lo anterior muestra que, en el ámbito concreto de la energía, las cinco últimas décadas han proporcionado argumentos sobre el doble carácter de la crisis energética a la que nos enfrentamos, con límites tanto por el lado de los recursos como por el lado de los residuos. Ambos representan un claro desafío para la sostenibilidad ambiental de nuestro sistema económico. Por un lado, la aparición del cénit de extracción del petróleo convencional (*peak oil*) pronosticado desde finales de la década de los 90 del siglo XX (Campbell, 1997; Bermejo, 2007; Turiel, 2012 y 2020), es un hecho ya reconocido incluso por organismos internacionales (International Energy Agency, IEA, 2010). Dicha constatación no quiere decir que el petróleo convencional vaya a agotarse en breve, sino que ya hemos sobrepasado el punto de la tasa máxima de extracción (que suele coincidir con haber extraído ya aproximadamente la mitad del recurso), lo que supone el inicio de la fase descendente en las extracciones de crudo a nivel mundial. Muchos países extractores han pasado ya por su propio *peak oil* planteando dificultades sociales y económicas internas a la hora de tomar decisiones sobre cómo debería asignarse cada nuevo barril de petróleo extraído (para consumo interno o para exportación). Por desgracia, ya no es posible resolver ese conflicto ampliando la extracción de crudo (y por tanto el consumo y las exportaciones simultáneamente) habida cuenta la tendencia decreciente en las tasas de extracción derivadas del propio cénit del petróleo. Esta circunstancia pone a las sociedades ante el espejo de la escasez energética futura y viene a refrendar el principio del fin de una era económica caracterizada por el acceso a energía abundante y barata.

En todo caso, si imagináramos que no existieran límites a la extracción de combustibles fósiles y tuviéramos acceso a unos recursos infinitos, ¿podríamos aún seguir quemando el petróleo, el carbón y el gas natural al ritmo al que lo estamos haciendo? La respuesta obvia es que no, pues nos enfrentamos a la extralimitación asociada a la aparición del cambio climático inducido por un funcionamiento socioeconómico que se apoya básicamente en la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2018 y 2021) (UNEP, 2019). Esta circunstancia se ha convertido en una grave amenaza y un límite que hemos traspasado al superar el umbral de la atmósfera para absorber emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sin incrementar la temperatura media del planeta.

A este respecto, las conclusiones del sexto informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, IPCC (2021) han empeorado las ya graves previsiones de informes anteriores y pronostica que, de seguir con la trayectoria de emisiones de GEI actual, se estima como muy probable un aumento de entre 2,8 y 4,6°C para 2100 (en

2 Algunos incluso sabían más que los organismos internacionales, como así ha demostrado la aportación que ha sacado a la luz las pioneras investigaciones que los científicos e ingenieros de ExxonMobil estaban llevando a cabo desde los años 70 del siglo XX sobre las consecuencias de las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles sobre el incremento de la temperatura del Planeta (Supran, Rahmstorf y Oreskes, 2023).

comparación con la era preindustrial). Este incremento de la temperatura y los impactos ambientales y costes sociales del agravamiento y frecuencia de fenómenos climatológicos extremos serán (están siendo ya) de gran relevancia para la especie humana y están poniendo en grave riesgo y peligro los sistemas de abastecimiento básicos de la humanidad en términos agrarios y alimentarios. La reducción progresiva de su productividad y viabilidad en un contexto de temperaturas crecientes ponen en compromiso nuestra propia alimentación y, por tanto, nuestra vida en el planeta. Esto explica la necesidad de acometer importantes reducciones anuales en las emisiones de GEI durante las próximas décadas (algo que ha mostrado con insistencia la investigación científica en los últimos años, por ejemplo, Hansen *et al.*, 2013), y avala, a su vez, la urgencia de acometer reducciones en el consumo energético sin tener que plantear siquiera problemas futuros con el acceso a los combustibles fósiles.

¿Pero cuánta debería ser esa reducción? Con bastante elocuencia, en su informe de 2018 relativo a las condiciones para el cumplimiento del Acuerdo de París (IPCC, 2018), el IPCC mostraba la abrupta caída en las emisiones de GEI que debería llevarse a cabo en el horizonte de 2050 para alcanzar unas emisiones netas nulas y, con ello, evitar que la temperatura media del planeta se incrementara en más de 1,5°C. El problema con el Acuerdo de París es que pocos se percataron de que los objetivos y compromisos en términos de políticas que cada país aportó (las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, o DNC por sus siglas en inglés) para lograr la meta marcada en el Acuerdo generaban unas emisiones de GEI que no eran compatibles con dicho objetivo. En efecto, tal y como hemos mostrado hace un tiempo (Nieto, Carpintero y Miguel, 2018), el énfasis de algunos países en objetivos nacionales de reducción relativa de las emisiones (con respecto al PIB) en vez de en términos absolutos, y otras consideraciones sobre políticas energéticas, llevaban a un resultado paradójico: de llevarse a cabo dichos planes, las emisiones en 2050, lejos de reducirse, se incrementarían un 19,3%, provocando un aumento de temperatura de 3-4°C. Por desgracia, este resultado fue avalado posteriormente por Naciones Unidas cuando, al calor de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre cambio climático, COP 26 en 2021, puso de relieve que, si no se tomaban medidas drásticas, la evolución experimentada hasta ese momento llevaría a incrementos del 16% en las emisiones en 2030 en comparación con los niveles de 2010 (UNCC, 2021). Algo que también era coherente con otro de los resultados que, por las mismas fechas, había alcanzado un informe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) dedicado a mostrar la brecha de emisiones que es preciso cerrar para alcanzar el objetivo de no incrementar la temperatura más de 1,5°C (UNEP, 2021). En este caso, se informaba que los planes y proyecciones de los gobiernos a escala mundial implicarán un aumento de la producción de combustibles fósiles de un 110% en 2030, lo que, en términos desagregados, supondría un aumento del 240% del carbón, del 57% del petróleo y del 71% del gas. Todo ello, claro está, resultaría totalmente incompatible con el objetivo del Acuerdo de París.

Estas proyecciones dificultan aún más las estimaciones y análisis realizados en torno al aprovechamiento racional de lo que ha dado en llamarse el «presupuesto de emisiones de carbono» con el que contaríamos hasta 2050 para mantener el incremento de la temperatura por debajo de los 1,5-2°C, esto es: la cantidad de combustibles fósiles que podríamos extraer de la corteza terrestre para quemarlos y no violar el objetivo del Acuerdo de París. Una investigación reciente (Welsby *et al.*, 2021) ha puesto números a esa cantidad llegando a la conclusión de que deberíamos *dejar bajo tierra sin extraer (y por tanto sin quemar y emitir) el 60% de las reservas de gas y petróleo y el 90% de las reservas de carbón*. Sin embargo, en el Acuerdo de París no se discutió sobre este asunto y el carácter voluntario del Acuerdo acabó alimentando la función *ritual* de las cumbres climáticas durante los últimos tres decenios. Tomárselo en serio hubiera supuesto ponerse manos a la obra en diseñar cambios importantes y urgentes en la forma en que producimos bienes y servicios para satisfacer las necesidades, pero teniendo en cuenta que las disponibilidades de recursos son decrecientes (Carpintero y Nieto, 2021), lo que afectaría a las estrategias desarrolladas por las transnacionales de los combustibles fósiles (sobre estas estrategias véase el artículo de Rafael Fernández en este número). Un gran desafío para el que de momento parece que no estamos a la altura.

### 3. LÍMITES Y TRANSICIONES ENERGÉTICAS

La forma en que el grueso de los países y las políticas convencionales han enfrentado este desafío se ha basado en potenciar las estrategias de transición ecológica, transición energética y descarbonización de las economías. Desde hace más de una década, y con el amparo de varios organismos internacionales, uno de los rasgos que

comparten el grueso de estas estrategias es la necesidad de un nuevo tipo de crecimiento, un crecimiento verde (*green growth*) que promete mantener la expansión de la producción de bienes y servicios (PIB), pero utilizando fuentes energéticas renovables y, gracias al desarrollo tecnológico, reducir el uso de recursos naturales y la contaminación (OECD, 2011; UNEP, 2011; World Bank, 2012). Más recientemente, estos planteamientos han alimentado la elaboración de varios pactos verdes como el *Green New Deal* (Estados Unidos) que ahora se está incorporando, pero descafeinado, a la Administración Biden; el *Green Deal* (Unión Europea) que está aprobado e implementándose, o la propuesta de un *Green New Deal* global (Rifkin, 2019).

La investigación académica reciente ha subrayado la dificultad de lograr ese crecimiento verde que exige, a su vez, alcanzar la desmaterialización absoluta de la producción de bienes y servicios (que aumente la producción y, simultáneamente, disminuya el uso de recursos y la contaminación), algo que no se ha cumplido debido a la gran dependencia de los recursos naturales por parte del sistema económico (Hickel y Kallis, 2020; Schröder y Storm, 2020; Haberl *et al.*, 2020). Un sistema económico que ha triplicado, a escala global, la extracción de recursos naturales desde 1970 (Haberl *et al.*, 2020; Schandl *et al.*, 2018) y que, según algunas estimaciones, espera doblar su uso de energía y materiales para 2060 (OECD, 2019). En muchas ocasiones, esta transición ecológica y energética se suele acompañar de la denominada transición digital, sin tener presente que, en términos ecológicos, la digitalización de los procesos de producción y consumo no suele reducir el impacto ambiental o la dependencia de los recursos naturales, sino que suele incrementarlos gracias, entre otros, a mecanismos como el efecto rebote, tal y como se viene comprobando desde hace más de dos décadas (Carpintero, 2003; Polimeni *et al.*, 2008).

En los últimos años estamos asistiendo a un fenómeno singular. Mientras que, por un lado, arrecian los planes de transición energética a varios niveles -acompañados de importantes dotaciones económicas para llevarlos a cabo-, por otro lado, en una fracción creciente de la sociedad aumenta la sensación de que llegamos tarde. En parte porque se constata que muchas de las políticas y estrategias energéticas y sociales que están por debajo de estos procesos de transición son propuestas interesantes que fueron planteadas ya desde hace más de tres décadas por científicos, investigadores y movimientos sociales y que, como se ha recordado recientemente, eran excelentes ideas para ponerlas en práctica cuando existía tiempo y margen para llevar a cabo esa transición (en los años 70, 80 o, incluso, hasta comienzos de los 90 del siglo XX) (Riechmann, 2019; y el artículo de Almazán y Riechmann en este número). Sin embargo, es fácil darse cuenta de lo improbable que puede resultar ahora acometer un cambio socioeconómico de tanta envergadura, que exige de varios decenios para poder llevarse a cabo, cuando es precisamente ese tiempo el que la mayoría de los análisis sugiere que no tenemos, y el que la urgencia del cambio climático y el deterioro ecológico global nos ha robado. Vaya por delante que la opción de sustituir el uso de petróleo, carbón y gas natural por energía eólica o solar es algo completamente acertado. Sin embargo, además del estrecho horizonte temporal mencionado anteriormente, el problema actual tiene que ver con dos asuntos: 1) la aspiración a mantener el mismo nivel de consumo energético (pero ahora apoyado en fuentes renovables) sin tener en cuenta los límites físicos de esa estrategia; y 2) los costes ambientales a los que se enfrenta la generalización de las tecnologías renovables y la electrificación basada en ellas. Esto se puede ejemplificar claramente con el caso del transporte.

Como es sabido, una de las grandes esperanzas puestas en juego para resolver el problema de la movilidad motorizada es el coche eléctrico. Ahora bien, conviene no olvidar que el coche eléctrico sigue siendo tributario del uso de petróleo, gas y carbón, dado que el grueso de la electricidad se genera a través de estos combustibles. Pero también es deudor de la utilización de otros recursos no renovables, pues la exigencia de seis veces más inputs materiales y minerales para su fabricación que las que requiere un coche convencional así lo atestigua (IEA, 2021). Combinando ambos aspectos, se comprende que, realizando un análisis de ciclo de vida completo, se llegue a la conclusión de que el coche eléctrico utiliza un 67% más energía que la fabricación de un coche convencional (Prieto, 2019). A estas cifras habría que añadir también las servidumbres que para el sistema eléctrico supondría la generalización del vehículo eléctrico en términos de recarga si habláramos de mantener el mismo número de vehículos convencionales que en la actualidad (Turriel, 2020). Estos resultados de consumos energéticos y de materiales ayudan a explicar algunos resultados paradójicos, donde la sustitución global de la flota de vehículos convencional por eléctricos se está demorando y, en vez de ayudar a consolidar los procesos de descarbonización y lucha contra el cambio climático, puede tender a veces a agravarlos fruto del efecto rebote (De Blas, Mediavilla, Capellán-Pérez, Duce, 2020).

Si las dificultades afloran cuando se plantea la electrificación masiva del transporte privado sin cambiar el número de vehículos y desplazamientos, lo que no tiene alternativa eléctrica es el transporte pesado y de mercancías por carretera (camiones) o por barco (que representa el grueso del comercio internacional de mercancías). Dada la densidad volumétrica y gravimétrica de las actuales baterías de litio, que como nos recuerda Vaclav Smil (2021b) son de alrededor de 260 Wh/Kg y 730 Wh/l, si queremos tener una autonomía acorde a un vehículo de transporte de larga distancia, las baterías por sí solas casi agotarían el margen de carga que se podría transportar y reducirían una fracción significativa del espacio disponible del vehículo. Lo que para un coche puede ser suficiente, en el caso del transporte marítimo y por carretera exigiría, al menos, aumentar un orden de magnitud la densidad de las baterías. Es decir: el transporte pesado de aquellas mercancías que se precisan para el funcionamiento del sistema económico no tienen alternativa eléctrica (ni renovable) con facilidad, más allá del tren eléctrico (por tierra) que, sin embargo, viene experimentado un declive continuado en el tonelaje de mercancías transportadas.

Un elemento añadido que conviene no olvidar es que, la construcción de las propias tecnologías renovables (eólica y solar) es también tributaria del consumo de combustibles fósiles. Si a este dato añadimos la existencia del fenómeno del *peak-oil* -que implica unas disponibilidades futuras de combustibles fósiles decrecientes-, se comprenderá bien la gravedad de lo que se ha denominado la «trampa de la energía» a la que nos enfrentamos (Zencey, 2013), es decir: el despliegue de las fuentes e infraestructuras renovables requiere de un uso masivo de combustibles fósiles (mayor cuanto más rápido se quiera plantear el proceso de transición) y, a la vez, eso supondrá, durante los primeros años, mayores emisiones de GEI que agravarán el problema de cambio climático en un escenario donde también el tiempo es escaso y donde, además, con vidas útiles de las instalaciones de 20-30 años, en tres décadas estaríamos abocados a procesos de renovación de una intensidad energética similar (y para los que habría dificultades en encontrar recursos fósiles disponibles).

Por último, uno de los problemas es que –como muestra el artículo de Carlos de Castro en este monográfico- la mayoría de las estrategias de transición energética suelen hacer abstracción del limitado potencial (por razones termodinámicas) que poseen realmente las tecnologías renovables y que impiden sustituir al 100% los niveles de consumo energético que se realizan con cargo a los combustibles fósiles. Eso es lo que se detectó ya hace tiempo al ver que las estimaciones usuales del potencial renovable con energía eólica y solar no solían tener presentes principios termodinámicos básicos (conservación de la energía) o la limitada densidad energética fotovoltaica y la competencia que su generalización supone para otros usos de la tierra y de los minerales (De Castro *et al.*, 2011 y 2013). Estas circunstancias llevan a pensar que, en el mejor de los escenarios tecno-sostenibles, apenas la mitad de la energía total consumida actualmente podría ser satisfecha con fuentes renovables, lo que introduce la necesidad imperiosa de acometer políticas conscientes y planificadas de decrecimiento y reducción del consumo para acoplarse a esas limitaciones (véase el artículo de Carlos de Castro en este volumen). Hacerlo así sería reconocer una de las novedades históricas a las que nos enfrentamos en términos civilizatorios. Mientras que las demás transiciones de régimen económico y socioecológico (de la sociedad de cazadores recolectores, a las sociedades agrarias y, finalmente, a las sociedades industriales) ha conllevado siempre, en cada fase, un incremento de la energía y los materiales totales y per cápita, en esta ocasión la perspectiva es precisamente la contraria (Krausmann *et al.*, 2008; Carpintero y Riechmann, 2013). Debido a todo lo mencionado anteriormente, las previsiones de disponibilidades de recursos naturales (energía y materiales) para realizar la siguiente transición energética y ecológica van a ser, pues, menos y no más.

#### 4. NO SÓLO LA ENERGÍA: LOS MATERIALES TAMBIÉN IMPORTAN

En esta reflexión hay, de todos modos, algún elemento adicional que resulta también clave. Conviene recordar que, hace ya más de cuatro décadas, y en el contexto de la crisis energética de los años 70 del siglo XX, el economista ecológico Nicholas Georgescu-Roegen se quejaba a menudo de que la energía se había convertido durante esa época en el tema estrella de reflexión entre los científicos, mientras que los materiales recibían casi siempre escasa atención por parte de los termodinámicos (Georgescu-Roegen, 1977; 2021). La inquietud de los científicos naturales parecía tener más que ver con las disponibilidades de fuentes energéticas, que con la escasez o inaccesibilidad de ciertas sustancias materiales. Esta mezcla de preocupación práctica por la energía e inhibición teórica por la cuestión de los materiales dieron lugar a la aparición de lo que el economista rumano denominaba el «dog-

ma energético», a saber: que los materiales no son ya un problema pues siempre podrían reciclarse por completo por mucho que se disipasen. Únicamente haría falta obtener la energía necesaria para poder concentrarlos<sup>3</sup>.

La crítica de Georgescu-Roegen al dogma energético y su olvido de la importancia de los materiales («matter matters too», solía recordar), le llevaron, de manera temprana, a llamar la atención sobre las limitaciones de algunas tecnologías energéticas (como las renovables) que, tanto antes como ahora, en su fabricación eran tributarias de otros combustibles fósiles y también de numerosos metales y minerales necesarios para su puesta en funcionamiento. Es decir, se trataría de tecnologías que, en sus propias palabras, continuaban siendo un «parásito de otras energías». Esto no quiere decir que Georgescu-Roegen estuviera en contra de la energía solar o la eólica. Solamente subrayaba una temprana precaución frente al diseño acrítico de futuros renovables sin cambiar los niveles de consumo y que ahora, más que nunca, parece muy pertinente. Para argumentar su postura, Georgescu-Roegen distinguió entre recetas factibles y tecnologías viables: «Extraer roca de la luna es, por ejemplo, una receta factible. Pero todavía no forma parte de ninguna tecnología viable. La tecnología basada en los combustibles fósiles es viable porque puede producir y mantener sus propios cimientos (mientras los recursos naturales necesarios estén accesibles)» (Georgescu-Roegen, 1979. Cfr. Georgescu-Roegen, 2021, p. 146). Para que las energías renovables fueran una tecnología viable en estos términos, los paneles solares y aerogeneradores deberían de automantenerse. Pero actualmente sabemos, no sólo que ninguna empresa está produciendo paneles solares o aerogeneradores solamente con la energía producida por esos dispositivos, sino que tiene que recurrir sistemáticamente al uso de combustibles fósiles y de numerosos metales y minerales no renovables que, en muchos casos, tienen una naturaleza crítica.

Esta circunstancia ha sido puesta de relieve por varios trabajos académicos, incluidos algunos de la IEA y del Banco Mundial (IEA, 2021; World Bank, 2017 y 2020; Valero *et al.*, 2018 y 2021), que muestran los requerimientos materiales tan intensos que exigen las transiciones energéticas basadas en la generalización de las tecnologías renovables (solar y eólica, fundamentalmente). Por ejemplo, ya mencionamos anteriormente que un coche eléctrico tiene unos requerimientos de minerales seis veces superiores a un coche convencional (litio, níquel, tierras raras, etc.) debido fundamentalmente a la batería, lo mismo que una planta eólica requiere nueve veces más minerales por MW de potencia instalada que una central de gas natural (IEA, 2021, p. 5). La propia IEA estima que el cumplimiento del Acuerdo de París (2015) con tecnologías renovables exigiría durante las próximas dos décadas un aumento de la demanda de cobre y tierras raras en un 40%, de níquel y cobalto en un 70% y de litio en un 90% (IEA, 2021, p. 5). El Banco Mundial (World Bank, 2020) sugiere que alcanzar un escenario de no superación de los 2º C de temperatura por encima de los niveles preindustriales, elevaría un 450% en 2050 la extracción de grafito, litio y cobalto para satisfacer la demanda de las tecnologías de almacenamiento de energía. Se comprende entonces que estas tendencias, analizadas bajo diferentes escenarios, puedan dar lugar a la aparición de futuras escaseces y cuellos de botella, donde la demanda superaría los recursos y reservas probadas, y que dificultarían la consecución de los objetivos de transición y descarbonización. El riesgo sería alto para un buen número de sustancias, entre las que estarían diecisiete minerales necesarios para las tecnologías renovables y los vehículos eléctricos como el telurio, la plata, el cadmio, el cobalto, el indio, el litio, etc. (Valero *et al.*, 2018 y 2021). Por ejemplo, dados los requerimientos mencionados del coche eléctrico, sólo la electrificación generalizada del transporte privado a escala mundial generaría una demanda tan alta que llevaría, según estimaciones para diferentes escenarios, al agotamiento de las reservas disponibles de aluminio, cobre, cobalto, litio, manganeso y níquel, no dejando apenas recursos disponibles para otros usos industriales (Pulido *et al.*, 2021).

La necesidad de aumentar la producción de materiales en tales colosales proporciones se encuentra condicionada gravemente por la necesidad de aumentar el consumo de energía doblemente, por el necesario aumento de la producción y por el descenso progresivo de la ley del material contenido en el mineral que se explota (Meadows *et al.*, 1992; Valero *et al.*, 2021). Paradigmático es el caso del cobre, metal fundamental para la transición energética y cuya minería se enfrenta a retos que impiden su crecimiento. En Chile, su mayor productor,

3 Este dogma tuvo una doble manifestación en el mundo académico y científico desde los años setenta del siglo XX. Por un lado, a través de lo que algunos denominaron teoría de los recursos infinitos y, de otra parte, en las llamadas teorías energéticas del valor. Para la crítica de Georgescu-Roegen al dogma energético puede consultarse Georgescu-Roegen (1983), y una contextualización de la aportación del economista rumano en Carpintero (2006).

en los quince años que van de 2005 a 2020 la ley media del cobre contenido en el mineral extraído ha caído en torno al 30%, siendo esta una de las principales razones que ha disparado el consumo energético de la minería del cobre en un 140% cuando la producción permaneció más o menos constante en esos años. Un tercio de la electricidad y una quinta parte del diésel consumido en Chile, lo son ya, a día de hoy, por la industria del cobre. Quiere esto decir que la minería y la energía no son sectores estancos, y que la escasez, a escala mundial, de diésel pondrá a nuestras sociedades en la tesitura de priorizar qué sectores económicos tendrán un suministro preferente, con posibles consecuencias en la minería de todo tipo de materiales y, por tanto, en el devenir de los planes de descarbonización, tan dependientes de un suministro abundante y barato de energía.

Por otro lado, si queremos tomarnos en serio el reciclado de los materiales, para que, como se dijo en el punto 3, en 20-30 años tengamos energía suficiente para acometer los procesos de renovación de la infraestructura de captación de energías renovables con garantías, deberíamos diseñar los dispositivos recolectores de energías renovables atendiendo, no a su rendimiento económico como se hace ahora, sino a su rendimiento energético a lo largo de su vida útil incluido el reciclado del total (o casi) de los materiales usados en su construcción. La reducción del número y cantidad de los materiales usados en estos dispositivos sería su consecuencia lógica.

Conviene no olvidar, por último, los impactos sobre otros territorios que las estrategias de transición energética –propuestas mayoritariamente por países de la OECD– pueden acabar imponiendo. Dadas las limitaciones de Europa y otros países ricos en términos de dotaciones de sustancias minerales críticas, el despliegue masivo de las energías renovables y la movilidad electrificada supone el incremento del fenómeno *extractivista* en América Latina, África y Asia con el preocupante e insostenible deterioro ecológico y social asociado (Environmental Justice Atlas; Pérez, 2021, p. 54-83).

## 5. SOBRE LAS CONTRIBUCIONES DE ESTE NÚMERO

Las páginas precedentes han puesto de relieve las complejas relaciones entre energía y sostenibilidad. Precisamente, los artículos presentados en este monográfico amplían y abundan en buena parte de esas relaciones.

En el trabajo de Lina Brand Correa, se pone de manifiesto la ambivalencia social de la propia energía donde, por un lado, esta se ha convertido en un aspecto indispensable para el funcionamiento de las sociedades y, al mismo tiempo, su consumo exacerbado ha generado la mayor parte de las emisiones de gases efecto invernadero desde por lo menos la segunda mitad del siglo veinte. Esta ambivalencia se refleja, por tanto, en la historia de los estudios de las relaciones energía y bienestar planteados desde tres enfoques (más centrados en la cantidad, en las comparaciones internacionales o en el bienestar), y el artículo de Brand Correa enmarca la reflexión en el contexto de una imprescindible transición energética donde las reducciones en la demanda de energía son un aspecto clave. Los tres enfoques coinciden en que el problema de la satisfacción de las necesidades humanas no es la falta de recursos, incluyendo recursos energéticos, sino la justa redistribución de los recursos disponibles, pues la existencia de puntos de saturación en la relación entre energía y bienestar hace que las crecientes desigualdades en el uso de la energía, las emisiones y el ingreso estén directamente relacionadas tanto con las posibilidades de mitigación del cambio climático como con la consecución de bienestar a nivel global dentro de los límites del planeta. En este sentido, se enfatiza la urgencia de poner las necesidades en el centro (y no tanto las proyecciones futuras de demanda) y de entender qué tipo de sistemas de provisión y qué tipo de servicios energéticos son los que contribuyen al bienestar, de manera que las políticas públicas puedan contribuir a mejorar o mantener el bienestar humano de manera justa y dentro de los límites medioambientales.

Por su parte, Adrián Almazán y Jorge Riechamn abundan en las dimensiones políticas de un aspecto crucial de las relaciones energía-sostenibilidad como son las transiciones energéticas. En su texto, ponen de relieve que, lejos de ser un asunto éticamente poco problemático y de naturaleza puramente ingenieril, tiene implicaciones mucho más profundas. En su artículo se nos presentan las múltiples dimensiones éticas, o más bien ético-políticas, del uso de la energía, que van desde la extralimitación ecológica de nuestras sociedades, el problema de convivencia entre el *Homo sapiens* y el resto de las especies, y también con las generaciones futuras; hasta la tensión entre las poblaciones humanas por los recursos naturales cada vez más escasos que tienen mucho que ver con la creciente pobreza y las desigualdades en el uso de la energía. Como destacan los autores, a ello tampoco es ajeno el proceso de militarización y su impacto sobre la organización social y los derechos humanos



y animales en un contexto de descenso energético. Máxime cuando el contexto tecnológico y su vínculo con el desarrollo económico muestra unas sociedades *petrodependientes* muy deudoras de un capitalismo que tiene entre sus rasgos básicos un profundo carácter fosilista. En este contexto, los autores alertan de un doble peligro: la aparición de rasgos tiránicos en las sociedades donde la competencia por los recursos escasos dé lugar a una militarización y autoritarismo generalizados, o bien que la continuación de las políticas convencionales de promoción del crecimiento económico tenga como consecuencia la aparición de una biosfera devastada. Esquivar ambos escenarios exigiría, para los autores, acometer una difícil e improbable revolución poliética que transformara los imaginarios y la concepción del mundo con experiencias vitales alternativas, la redimensión de las prioridades con la aplicación de técnicas más humildes en marcos que ellos denominan de ecofeminismo de subsistencia o ecosocialismo descalzo.

En el trabajo de Carlos de Castro, se analiza el importante asunto de los límites y los potenciales tecnológicamente sostenibles de las diferentes formas de energía, realizando una estimación del porcentaje del gasto energético mundial actual que podría satisfacerse, en un futuro, con energías renovables. Como recordábamos anteriormente, este texto recuerda que la literatura académica previa ha restado importancia e infraestimado las limitaciones tecnológicas y puesto el acento en que los impedimentos básicos para el despliegue de la transición hacia las renovables son de naturaleza fundamentalmente política y económica. Por el contrario, las estimaciones realizadas por Carlos de Castro en este trabajo muestran que, sin embargo, el potencial tecno-sostenible de energía final neta en escenarios optimistas se encuentra en una horquilla que es del 26-56% de la energía consumida en la actualidad según sea el escenario de futuro considerado. Un escenario en el que hay que tener en cuenta la trampa de la energía y las emisiones que, a corto y medio plazo, provoca el despliegue masivo de las renovables. A partir de aquí, si tal y como sugiere Naciones Unidas, nos situamos con una población por encima de los 9.000 millones de personas y asumimos el extremo inferior del intervalo anterior (26% del consumo actual), ello conllevaría el uso de 300 W per cápita de energía 100% renovable, lo que con un planteamiento equitativo, llevaría a que los habitantes estadounidenses vieran reducido su consumo neto a menos del 4% de su nivel actual. Una cifra que apunta la dimensión del fuerte decrecimiento energético y material que deberemos gestionar.

Por su parte, el artículo de Rafael Fernández pone el foco en uno de los actores principales del mercado energético como son las empresas transnacionales petroleras y sus diferentes estrategias para enfrentarse a la transición energética. Como se subraya en el artículo, dichas estrategias tratan de dar respuesta simultáneamente a dos retos como son la reducción de las emisiones y, por otro lado, el posible escenario de descenso en la demanda y los precios del petróleo. El texto muestra las diferentes estrategias seguidas por las transnacionales europeas y estadounidenses, pues mientras que las primeras, obligadas por la reducción previsible en la demanda energética industrial y de transporte, están llevando a cabo operaciones de diversificación del negocio petrolero incorporando otras actividades y fuentes energéticas (convirtiéndolas paulatinamente en empresas multienergéticas); la estrategia seguida por las transnacionales estadounidenses ha sido la de continuar especializadas en su negocio de hidrocarburos. Esta diferente estrategia parece llevar a que las transnacionales europeas consideren conveniente para el negocio incorporar la reducción futura de emisiones como uno de sus objetivos estratégicos, lo que se podría consolidar si el contexto general de lucha contra el cambio climático gana fuerza y se aborda seriamente. Este incipiente cambio de actitud en las empresas europeas contrasta, sin embargo, con el desinterés manifestado por las empresas estadounidenses en la diversificación que, como es sabido, no se han visto espoleadas ni por la presión ambiental internacional en términos de disminución de las emisiones, ni por la más estricta regulación nacional en esta materia.

Finalmente, el artículo de Sergio Tirado analiza un importante aspecto que conecta el consumo energético con la realidad social a través del fenómeno de la pobreza energética y su conexión con la precariedad en el acceso a la vivienda. El texto subraya que tanto la energía como la vivienda aparecen como fundamentos básicos de una vida digna, pero la satisfacción de ambos choca a veces con su forma de provisión mercantil, lo que dificulta el acceso a ellos con independencia de la capacidad adquisitiva que se tenga. Un elemento novedoso de este trabajo es que pone en relación dos tipos de realidades que a menudo aparecen desconectadas en los análisis socioeconómicos. La forma en que se realiza este vínculo es a través de la reintegración del factor vivienda en el marco de la justicia y pobreza energética atendiendo para ello a tres ejes fundamentales: las dimensiones materiales y temporales, las dimensiones políticas y las dimensiones éticas y legales. En el texto se pone de relieve la

relevancia de la vivienda como elemento material crucial que ayuda a explicar buena parte de las desigualdades en el acceso a los servicios energéticos domésticos. Esta circunstancia, como recuerda el autor, permite ayudar a contemplar de forma integral los complejos estados de privación material referidos tanto a la vivienda como a la energía, sin perder de vista además otras necesidades esenciales como la alimentación, el transporte, la atención sanitaria o la educación. El texto utiliza como ejemplos de aproximación a esta problemática los casos de dos movimientos sociales surgidos en Barcelona que trabajan con una perspectiva de derecho a la vivienda y a la energía: la Plataforma de Afectados por la Hipoteca (PAH) y la Alianza contra la Pobreza Energética (APE).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Arto, Iñaki; Capellán-Pérez, Íñigo; Lago, Rosa; Bueno, Gorka; y Bermejo, Roberto (2016). The energy requirements of a developed world. *Energy for Sustainable Development*, 33, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.001>
- Bermejo, Roberto (2007). *Un futuro sin petróleo*. Madrid: Los Libros de la Catarata, Fuhem-Ecosocial.
- Boulding, Kenneth (1966). The Economics of the Coming Spaceship Earth. En Jarrett, H., Ed., *Environmental Quality in a Growing Economy*. Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, Baltimore, 3-14.
- Campbell, Collin (1997). *The Coming Oil Crisis*. Essex: Petroconsultants and Multi-Science Publishing.
- Carpintero, Óscar (2003). Los costes ambientales del sector servicios y la nueva economía: Entre la “desmaterialización y el “efecto rebote”, *Economía Industrial*, 352, 59-76.
- Carpintero, Óscar (2006). *La Bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Barcelona: Montesinos.
- Carpintero, Óscar; y Riechmann, Jorge (2013). Pensar la transición: enseñanzas y estrategias económico-ecológicas. *Revista de Economía Crítica*, 16, 45-107.
- Carpintero, Óscar; Nieto, Jaime (2021/2022). Transición energética y escenarios postcrecimiento. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, 156, 93-106.
- CMMAD (1988). *Nuestro futuro común*. Madrid: Alianza Editorial.
- Commoner, Barry (1971). *The closing circle*. New York: Knopf.
- Cottrell, Fred (1955). *Energy and society*. New York: McGraw-Hill.
- Daly, Herman E (1990). Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*, 2(1), 1-6. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(90\)90010-r](https://doi.org/10.1016/0921-8009(90)90010-r)
- Daly, Herman E., (ed.) (1973). *Toward a Steady-State Economy*. San Francisco: W.H. Freeman.
- De Blas, Ignacio; Mediavilla, Margarita; Capellán-Pérez, Íñigo; Duce, Carmen (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, Carlos; Mediavilla, Margarita; Miguel, Luis J; Frechoso, Fernando (2011): Global wind power potential: Physical and technological limits. *Energy Policy* 39, 6677-6682. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.027>
- De Castro, Carlos; Mediavilla, Margarita; Miguel, Luis J; Frechoso, Fernando (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>
- Duarte, Carlos (coord.) (2009). *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: CSIC-Los Libros de la Catarata.
- Environmental Justice Atlas (s.f.). *EJAtlas. Global Atlas of Environmental Justice*. [www.ejatl.org](http://www.ejatl.org).
- Georgescu-Roegen, Nicholas (1971). *The entropy law and the economic process*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen, Nicholas (1972). *Energy and economic myths*. New York: Pergamon Press.
- Georgescu-Roegen, Nicholas (1979). Mitos sobre la energía y la materia. En: *Ensayos bioeconómicos*, pp. 127-149.
- Georgescu-Roegen, Nicholas (1983). La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular. *El Trimestre Económico*, 198, 829-860.
- Georgescu-Roegen, Nicholas (2021): *Ensayos bioeconómicos*. (Edición de Óscar Carpintero). Madrid: Los libros de la Catarata.
- Goldemberg, José; Johansson, Thomas B.; Reddy, Amulya K.N.; Williams, Robert H. (1985). Basic Needs and Much More With One Kilowatt Per Capita. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 14, 190-200. <http://eprints.iisc.ac.in/20236/>
- Goldsmith, Edward (1972). *A Blueprint for Survival*. Adfo Books.
- Haberl, Helmut; Wiedenhofer, Dominik; Virág, Doris; Kalt, Gerald et al., (2020). A Systematic Review of the Evidence on Decoupling of GDP, Resource Use and GHG Emissions, Part II: Synthesizing the Insights. *Environmental Research Letters*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab842a>
- Hall, Charles A (2017). *Energy return on investment: a unifying principle for biology, economics, and sustainability* (Vol. 36). Switzerland: Springer.
- Hansen, James; Kharecha, Pushker; Sato, Makiko; Masson-Delmotte, Valerie; Ackerman, Frank et al., (2013). Assessing “dangerous climate change”: Required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature. *PLoS ONE*, 8, e81648. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081648>
- Heinberg, Richard (2011). *The End of Growth*. New York: New Society Publishers.
- Hickel, Jason; y Kallis, Giorgos (2020). Is Green Growth Possible? *New Political Economy* 25 (4), 469-486. <https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1598964>

- IEA (2010). *World Energy Outlook*, Paris: IEA.
- IEA (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris: IEA.
- IPCC (2018). *Global warming of 1.5°*. Geneva.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Krausmann, Fridolin; Fischer-Kowalski, Marina; Schandl, Heinz; Eisenmenger, Nina (2008). The Global Sociometabolic Transition. Past and Present Metabolic Profiles and Their Future Trajectories. *Journal of Industrial Ecology*, 12, 637-656. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00065.x>
- Martínez Alier, Joan (ed.). (1995). *Los pioneros de la economía ecológica*. Madrid: Visor Distribuidores.
- Martínez Alier, Joan; Schlüppmann, Klaus (1991). *La economía y la ecología*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Martínez, Daniel M.; y Ebenhack, Ben W. (2008). Understanding the role of energy consumption in human development through the use of saturation phenomena. *Energy Policy*, 36(4), 1430-1435. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.12.016>
- Meadows, Donella H.; Meadows, Dennis L.; Randers, Jørgen; Behrens III, William W. (1972). *The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.
- Meadows, Donella H., y Randers, Jorgen (1992). *Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future* (First Printing). Chelsea Green Pub Co.
- Meadows, Donella H.; Meadows, Dennis M.; Randers, Jorgen (2002). *Los límites del crecimiento 30 años después*. Madrid: Galaxia Gutenberg-Círculo de Lectores.
- Millward-Hopkins, Joel; Steinberger, Julia; Rao, Narishima D.; y Oswald, Yannick (2020). Providing decent living with minimum energy: A global scenario. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 65, 102168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102168>
- O'Neill, Daniel W.; Fanning, Andrew L.; Lamb, William F., y Steinberger, Julia (2018). A good life for all within planetary boundaries. *Nature sustainability*, 1(2), 88-95. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>
- OECD (2011). *Towards green growth*. Paris: OECD.
- OECD (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. Paris: OECD.
- Pérez, Alfons (2021). *Pactos verdes en tiempos de pandemias*. Barcelona: Observatori del Deute en la Globalització/Libros en Acció/Icaria Editorial.
- Polimeni, John M.; Mayumi, Kojo; Giampietro, Mario; Alcott, Blake (2008). *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements*. London: Earthscan.
- Prieto, Pedro (2019): *Consideraciones sobre la electrificación de los vehículos privados en España*. Revista 15-15-15. <https://www.15-15-15.org/webzine/download/consideraciones-sobre-la-electricacion-de-los-vehiculos-privados-en-espana/>
- Pulido Sánchez, Daniel; Capellán-Pérez, Íñigo; Mediavilla, Margarita; De Castro, Carlos; Frechoso, Fernando (2021): Analysis of the material requirements of global electrical mobility. *DYNA*, 96, 207 – 213. <https://doi.org/10.6036/9893>
- Randers, Jorgen (2012). *2054-A Global Forecast for the Next Forty Years*. Chelsea Green Publishing.
- Rao, Narishima. D., Min, Jihoon; y Mastrucci, Alessio (2019). Energy requirements for decent living in India, Brazil and South Africa. *Nature Energy*, 4(12), 1025-1032. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0497-9>
- Riechmann, Jorge (2019): *Otro fin del mundo es posible, decían los compañeros*. Madrid: mra ediciones.
- Rifkin, Jeremy (2019): *El Green New Deal Global*. Madrid: Paidós.
- Rockström, Johan; Steffen, Will; Noone, Kevin; Persson, Asa; Chapin III, F. Stuart; Lambin, Eric F.; et al., (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, pp. 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Schandl, Heinz; Fischer-Kowalski, Marina; West, James; Giljum, Stefan; Dittrich, Monika., et al., (2018). Global Material Flows and Resource Productivity: Forty Years of Evidence. *Journal of Industrial Ecology* 22.4, 827–838. <https://doi.org/10.1111/jiec.12626>
- Schröder, Enno; y Storm, Servaas (2020). Economic Growth and Carbon Emissions: The Road to “Hothouse Earth” is Paved with Good Intentions. *International Journal of Political Economy*, 49(2), 153-173. <https://doi.org/10.1080/08911916.2020.1778866>
- Smil, Vaclav (2021a). *Energía y civilización. Una historia*. Barcelona: Arpa.
- Smil, Vaclav (2021b). “Vivimos en un sistema irracional y la Tierra no puede soportarlo. Entrevista”. *El Correo* (27 de agosto de 2021). <https://www.elcorreo.com/>
- Supran, Geoffrey; Rahmstorf, Stefan; y Oreskes, Naomi (2023). Assessing ExxonMobil's global warming projections. *Science*, 379(6628). 10.1126/science.abk0063
- Turiel, Antonio (2012): El declive energético. *mientras tanto*, 117, 11-26.
- Turiel, Antonio (2020): *Petrocalipsis*. Madrid: Alfabeto.
- UNCC (2021) <https://news.un.org/es/story/2021/10/1499162>
- UNEP (2011): *Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication – a synthesis for policy makers*. Nairobi: UNEP.
- UNEP (2019): *Global Environmental Outlook 6*. Cambridge: Cambridge University Press.
- UNEP (2021). *Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*. Nairobi: UNEP.
- Valero, Alicia; Valero, Antonio; Calvo, Guiomar; y Ortego, Abel (2018). Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 93, 178-200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>
- Valero, Alicia; Valero, Antonio; Calvo, Guiomar (2021). *Thanatia. Límites materiales de la transición energética*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.



a687

Welsby, Daniel; Price, James; Pye, Steve; y Ekins, Paul (2021). Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. *Nature*, 597, 230–234. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8>

World Bank (2012). *Inclusive green growth: the Pathway to sustainable development*. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. Washington, DC: World Bank Publications.

World Bank (2020). *The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. Washington, DC: World Bank Publications.

WWF (2020). *Living Planet Report*. Switzerland: Gland.

Zencey, Eric (2013). La energía, el recurso maestro. En: Worldwatch Institute, *La situación del mundo 2013*. Barcelona: Icaria-FUHEM-Ecosocial, 125-140.