

LÍMITES Y POTENCIALES TECNOSOSTENIBLES DE LA ENERGÍA: UNA MIRADA HETERODOXA Y SISTÉMICA

LIMITS AND TECHNO- SUSTAINABLE POTENTIAL OF ENERGY: A HETERODOX AND SYSTEMIC VIEW

Carlos de Castro

Departamento de Física Aplicada
Universidad de Valladolid
<https://orcid.org/0000-0002-9760-3363>
ccastro@termo.uva.es

Cómo citar este artículo/Citation: de Castro, Carlos (2023). Límites y potenciales tecnosostenibles de la energía: una mirada heterodoxa y sistémica. *Arbor*, 199(807): a690. <https://doi.org/10.3989/arbor.2023.807004>

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)*.

Recibido: 22 julio 2022. Aceptado: 12 diciembre 2022.
Publicado: 28 abril 2023.

RESUMEN: Las fuentes de energía no renovables (fósiles y nucleares) están doblemente limitadas, tanto por su finitud como por los perjuicios ecológicos y sociales que causan. Las fuentes de energía renovable tienen flujos en la biosfera muy grandes, sin embargo, los sistemas tecnológicos que las captan no son renovables y por tanto tienen limitaciones tecnológicas, ecológicas y sociales también. Aunque una buena parte de la literatura científica ha venido estimando que estos factores limitantes son pequeños frente a los políticos y económicos, aquí se muestra que esta literatura ha venido sobreestimando la capacidad tecno-sostenible obtenible a lo largo del presente siglo, en buena medida por un tecno-optimismo implícito y una falta de pensamiento sistémico. Este potencial podría ser del orden de entre la mitad y la cuarta parte del uso actual de energía, lo que apunta, dada la necesaria transición hacia fuentes renovables por problemas ambientales, a un fuerte decrecimiento de la matriz energética que sostiene nuestras sociedades a escala global.

ABSTRACT: Non-renewable energy sources (fossil and nuclear) are limited, both because of their finiteness and because of the ecological and social harm they cause. Renewable energy sources have very large flows in the biosphere. Nevertheless, the technological systems that capture them are not renewable and thus also have technological, ecological and social limitations. Although a good part of the scientific literature estimates that these limiting factors are small compared to the political and economic ones, it is shown here that this literature has been overestimating the techno-sustainable capacity obtainable throughout this century, largely due to an implicit techno-optimism and a lack of systemic thinking. This potential could be on the order of between half and a quarter of current energy use, which given the necessary transition to renewable sources due to environmental problems points to a strong decrease in the energy matrix that sustains our societies on a global scale.

PALABRAS CLAVE: cambio climático; energías renovables; límites minerales; potencial tecnológico; energía neta; TRE.

KEYWORDS: Climatic change; renewable energies; mineral limits, technological potential; net energy; EROI.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX, y lo que llevamos del presente siglo, el sistema energético global ha estado basado abrumadoramente en fuentes no renovables de energía (principalmente combustibles fósiles y secundariamente uranio) (International Energy Agency, IEA 2022; Smil, 2008). Las fuentes primarias de energía son materia que tiene una elevada energía potencial convertible en flujos energéticos finales aprovechables.

Las fuentes no renovables vienen caracterizadas por tres rasgos relacionados entre sí: tienen alta densidad energética por unidad de masa, se pueden transportar con relativa facilidad y se pueden almacenar durante largos periodos.

Para utilizarlas en grandes cantidades necesitan cierto desarrollo tecnológico porque requieren largas cadenas de transporte, ya que su extracción está asociada a lugares con altas concentraciones (minas, pozos) geográficamente repartidas de forma dispersa. Además, no usamos casi nunca directamente petróleo, por ejemplo, sino gasolina o diesel, altamente procesados, y puede haber decenas, si no centenas o miles de kilómetros entre los puntos de extracción, procesamiento y consumo. Además, son utilizadas también por sus características materiales, en el caso de los combustibles fósiles, principalmente en la petroquímica (plásticos, fertilizantes, asfaltos y un largo etcétera), y en el caso del uranio y otros materiales por su capacidad radiactiva (bombas atómicas, radiodiagnóstico).

Las fuentes renovables primarias de energía son aquellas caracterizadas más que por un stock finito, por un flujo promedio continuo a escala global mucho mayor que el flujo que los sistemas humanos pueden o prevén captar. Estas fuentes pueden verse también asociadas a materia con energía potencial –fácilmente almacenables o no- de las que podemos extraer un flujo útil energético. Hay dos fuentes últimas, el flujo de radiación solar y el flujo de calor geotérmico. El flujo de radiación solar puede aprovecharse directamente como tal o bien indirectamente a través del *metabolismo* de la biosfera, que lo transforma en otras formas de energía, como cinética (olas, viento, ríos), gravitatoria potencial (agua de lluvia), o a través de la fotosíntesis de las plantas e indirectamente de los animales (biomasa).

Así, la biomasa, aunque puede considerarse un stock y su cantidad total es finita, se considera renovable porque ésta puede crecer y mantener un flujo apreciable sin intervención humana, siendo históricamente la fuente energética principal a lo largo de la historia hasta bien entrada la Revolución Industrial (Smil, 2008; Fernández-Durán y González-Reyes, 2014). La energía potencial gravitatoria del agua o cinética del viento, los fotones del Sol y el calor de las rocas y estructuras geológicas, mantienen un flujo a escala planetaria que podemos utilizar como fuentes energéticas. Estas fuentes renovables y su conversión a vectores energéticos utilizables vienen caracterizadas en relación a las fósiles por ser de menor densidad energética (un par de órdenes de magnitud menos que las fósiles, Smil, 2008) y en general de más difícil o imposible almacenamiento (no podemos almacenar el viento) y transporte (podemos transportar lejos la electricidad, pero con pérdidas; al ser menos densas como la leña frente al carbón, requieren más volumen de carga, etc.).

Llamaremos tecnologías renovables o RES a los sistemas materiales humanos que son capaces de captar y transformar para usos finales aquellas fuentes de energía renovable. Podemos distinguir de forma gruesa dos tipos de RES, aquellas de usos tradicionales y las de usos modernos, estando las primeras caracterizadas por un procesamiento relativamente sencillo y la posibilidad de usar *in situ* o requerir un transporte corto (animales de tiro, biomasa para calor, molinos de agua o viento para usos mecánicos, radiación del sol para calor, secado o cocinado), mientras que las fuentes modernas de renovables mayoritariamente se transforman en el vector electricidad que se puede transportar incluso a miles de kilómetros de distancia y tiene una elevada capacidad de trabajo (exergía). Se considera que las RES que más potencial tienen son la producción eléctrica a partir de molinos eólicos y de la captación directa de la radiación solar (fotovoltaica principalmente) (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático, IPCC, 2011), con la contraprestación de que sus fuentes son altamente intermitentes (a escala horaria, estacional y anual). Por otro lado, la hidroelectricidad sigue siendo a día de hoy la forma más explotada y productiva como fuente renovable de energía eléctrica (IEA, 2022), si bien no está exenta

de problemas por competencia con otros usos de agua para consumo doméstico, industrial y agro-ganadero, por la intermitencia de los regímenes de lluvia y por las grandes inundaciones de territorio que su almacenamiento provocan (con impactos ambientales y sociales no despreciables). Otras fuentes renovables tienen menor potencial, especialmente para producir electricidad, si bien pueden ser menos intermitentes (geotérmica, biomasa) y más versátiles en cuanto a que se utilizan también como fuentes no eléctricas.

2. FACTORES LIMITANTES DE LOS RECURSOS NO RENOVABLES FÓSILES

Si bien los combustibles fósiles permitieron la Revolución Industrial y la Gran Aceleración de la segunda mitad del siglo XX (Smil, 2008; Fernández-Durán y González-Reyes, 2014; Gallero y Riechmann, 2018), entendemos que están fuertemente limitados en las próximas décadas por varias razones:

1. Su uso genera residuos que causan daños en los ecosistemas naturales y humanos. En el caso de las energías fósiles (mayoritarias en el mix global), hablamos de contaminación, acidificación del agua y, especialmente, cambio climático asociado a los gases de efecto invernadero producto de su combustión. Para muchos de sus usos no existen tecnologías desarrolladas que impidan las emisiones, y en el caso de existir como la captura de carbono en centrales eléctricas, implican elevados costes de inversión económica, material y energética, hasta el extremo de que posiblemente la captura de carbono es negativa (terminan emitiendo más) si se toma en cuenta todo el ciclo de vida de los recursos y pérdidas en que se incurre (Sekera y Lichtenberger, 2020). Así pues, la consideración del cambio climático implica, desde un punto de vista de factor limitante por sostenibilidad, la necesidad del abandono de los combustibles fósiles muy rápido en términos históricos: no debemos extraer todas las reservas de combustibles fósiles porque sobrepasaríamos con creces el aumento de 1.5-2°C que científica y políticamente se considera un límite a no traspasar por las consecuencias muy negativas, incluso catastróficas, sobre los ecosistemas naturales y humanos (Capellán-Pérez *et al.*, 2016; Kerschner y Capellán-Pérez, 2017; Nieto *et al.*, 2020; Capellán-Pérez *et al.*, 2020), más cuando los modelos e informes del IPCC (2022), ya suficientemente dramáticos, probablemente tiende a errar por el lado menos dramático y la situación real es peor de la esperada (Puig Vilar, 2022).
2. Además, tanto la contaminación como el cambio climático suponen fuente de conflictos sociales locales e interregionales (presión migratoria). Y el propio cambio climático puede cambiar la geografía de las fuentes, por un lado, porque abra nuevas zonas de explotación (por ejemplo, el deshielo de los polos facilitaría la explotación de sus reservas) y por otro lado los efectos sobre el clima dificultan su explotación y uso (huracanes en plataformas petrolíferas y gasísticas, destrucción de infraestructuras y redes de transporte energéticas por incendios, inundaciones, etc.) (IPCC 2022). El cambio climático es un hecho presente que se va a recrudecer en el futuro (más cuanto más tardemos en prescindir de los combustibles fósiles), y, por tanto, como mínimo es un factor limitante de todas las infraestructuras necesarias para la captación de cualquier forma energética, sea renovable o no. En su extremo, la contaminación (por plásticos, y otros contaminantes) y/o un cambio climático catastrófico podría hacer colapsar o hacer decrecer fuertemente la economía y población humanas (Meadows *et al.*, 1972; Capellán-Pérez *et al.*, 2020), por lo que podría convertirse en el factor limitante principal de la adquisición de energía. En tal escenario, al no poderse mantener las estructuras de alta tecnología energética, se añadiría el posible descontrol de las centrales nucleares y los residuos nucleares de alta actividad, empeorando gravemente la situación (que sería de exterminio total si los conflictos armados derivados por la escasez de energía y/o el caos climático terminan en guerra atómica masiva). Estos factores deberían hacer ya décadas haber generado un cambio de la matriz energética de forma voluntaria y planificada y, dado que el problema y los riesgos van aumentando, la velocidad de decrecimiento y abandono de estas fuentes no renovables deberá ser cada vez mayor, hasta el punto no solo de abandonarlas en pocas décadas sino de planificar que habrá que desviar energía final de la sociedad para corregir los efectos indeseados y acumulativos de deterioro. Por ejemplo, en los escenarios del IPCC que buscan no sobrepasar los 1.5 y 2°C terminan exigiendo absorber netamente gases de efecto invernadero de la atmósfera en la segunda mitad del siglo XXI (IPCC, 2022), lo que implica necesidad de energía para esa tarea.
3. La localización geográfica concentrada en ciertas regiones y países de los combustibles fósiles y nucleares ha sido, es y será fuente de conflictos geopolíticos (Fernández-Durán y González-Reyes, 2014; Turiel, 2020).

Esto es un factor limitante porque esos conflictos han escalado en guerras o amenazas donde, como mínimo, se han tenido que mover ejércitos y se han destruido infraestructuras, detrayendo una energía neta a las sociedades que podrían teóricamente haber dispuesto de más energía como conjunto. En los conflictos armados se han venido destruyendo y quemando pozos y depósitos, perdiéndose directamente su capacidad energética. Guerras como la de Ucrania de 2022 han generado tensiones energéticas y se ha dicho que el mercado de los combustibles fósiles se ha utilizado como arma. Muchos países y regiones, en especial los importadores netos de estas fuentes, ven como política estratégica limitar o abandonar el uso de combustibles fósiles precisamente por esta dependencia externa, aduciendo la búsqueda de la autosuficiencia energética (de las fuentes), en general mirando hacia las fuentes renovables y sus tecnologías asociadas, puesto que éstas a priori son más diversas y están menos concentradas geográficamente que las fósiles (EU, 2021 y la réplica en di Felice *et al.*, 2021).

4. Aunque los stocks de los combustibles fósiles son suficientes para generar un caos climático, está en entredicho que sean tan elevados como para poder seguir las trayectorias más elevadas proyectadas en los BAU (business as usual) o seguir las tendencias del pasado, del IPCC (de Castro 2009; de Castro *et al.*, 2009; Kerschner y Capellán-Pérez, 2017; Nieto *et al.*, 2020; Capellán-Pérez *et al.*, 2020). Aún más importante es que la explotación de los combustibles fósiles, en especial los fluidos (gas y petróleo), técnicamente no siguen un patrón que mantenga el flujo hasta la última gota del recurso en el pozo, sino que para mantener un flujo dado, llega un momento en que se necesita incrementar la tecnología y el gasto energético invertido, para, finalmente, que sea inevitable que el flujo empiece a ir disminuyendo hasta que bruscamente se cierre la explotación por no resultar económica y/o energéticamente rentable. Si para extraer y procesar el recurso energético se termina gastando casi tanta energía como la que te puede proporcionar (tasa de retorno energético –TRE– aproximándose igual a uno), este esquema de trabajo sólo se puede mantener si otras fuentes energéticas compensan esa disminución de la TRE y, o bien el sistema económico y político está introduciendo una distorsión ineficaz (ya que son sumideros energéticos lo que se espera que sean fuentes), o en realidad se precisa alguna particularidad especial del vector energético final, aunque se haya convertido la fuente en un sumidero energético, por ejemplo, para obtener líquidos energéticos para el transporte, de no fácil sustitución y alta dependencia actual. La teoría del *peak oil*, ampliamente comprobada experimentalmente y con buenas bases geofísicas teóricas (Campbell y Laherrere, 1998; de Castro 2009; de Castro *et al.*, 2009), nos explica que el flujo máximo de un combustible fósil o mineral termina siendo menor que si se supone que puede mantenerse hasta la última gota del pozo. El flujo máximo de energía neta, a partir del cual geofísicamente es inevitable que empiece a bajar, es un fuerte factor limitante a considerar, ya que puede generar una tasa de decrecimiento importante, más importante de hecho que muchos escenarios que no contemplan esta posibilidad, aunque contemplen políticas de abandono de los combustibles fósiles. El pico del petróleo llamado convencional es cosa del pasado (Kerschner y Capellán-Pérez, 2017; Turiel, 2020), y los líquidos sustitutos tienen fuertes factores limitantes, en especial porque suelen tener peor TRE, por lo que la energía neta que llega a la sociedad baja o bajará más rápido de lo esperado (Hall *et al.*, 2014). Es decir, aunque no lo hagamos voluntariamente, los fósiles nos irán abandonando en las próximas décadas; y aunque ese abandono no impida malos escenarios de cambio climático (de Castro, 2009; Capellán-Pérez *et al.*, 2020), puede generar cuellos de botella importantes en la matriz energética –con fortísimas consecuencias económicas– en estas próximas décadas dado su ritmo esperado de descenso (Turiel, 2020).

3. LOS LÍMITES TECNO-SOSTENIBLES DE LAS FUENTES RENOVABLES

El flujo (energía por unidad de tiempo o potencia) de uso final comercial de energía de la población humana es de unos 420 EJ/año, mientras que el flujo del viento en toda la atmósfera es del orden de 30,000 EJ/año y el solar que llega a la superficie dos órdenes de magnitud mayor que el del viento (Hermann, 2006). Es por ello que las fuentes pueden parecernos ilimitadas en relación a la demanda humana esperable en este siglo.

A las RES se las considera fundamentales para la rápida transición energética que ha de sustituir el uso de combustibles fósiles (IPCC 2011 y 2022; Capellán-Pérez *et al.*, 2020). Sin embargo, la transición de sistema energético tiene un contexto que genera barreras y factores limitantes por intereses políticos, económicos, los cambios que supone

en la matriz social o las desigualdades humanas en todas las escalas geográficas. Además de este contexto, existen factores tecnológicos y de sostenibilidad ambiental que también limitan su desarrollo efectivo a lo largo del siglo.

Apoyándonos en la revisión de la literatura y las definiciones del IPCC (2011 y su Anexo I), definimos «potencial tecnológico» de un sistema de captación de una fuente energética renovable como la energía final asequible y obtenible cuando se consideran tecnologías al uso demostradas de forma comercial o cuasi-comercial (más allá de la fase de laboratorio o planta piloto) y sus restricciones prácticas por geografía, termodinámica, etc. Más restrictivo, el «potencial tecno-sostenible» vendrá más limitado cuando se añaden criterios de accesibilidad a los recursos materiales y energéticos que requieren los sistemas de captación y transformación (energía neta, finitud de minerales, uso de la tierra, etc.) y aspectos ambientales (competencia de usos con la biosfera, impactos ecológicos y en la biodiversidad) y sociales (competencia de usos humanos, conflictos por extractivismo y desigualdad, etc.).

Se considerará la renovabilidad en el horizonte temporal de este siglo ya que cambios tecnológicos de largo plazo, la finitud de recursos materiales y su necesario reciclado y los propios cambios sociales pueden disminuir o expandir los usos en otras centurias.

Tampoco se tendrán en cuenta las limitaciones que disrupciones de la actual civilización en las próximas décadas, como su más que probable colapso o radical transformación tras un fuerte decrecimiento energético-material (de Castro, 2017; Enríquez Sánchez *et al.*, 2020; Fernández Durán y González Reyes, 2014; Puig Vilar, 2022; Riechmann, 2021; Seibert y Rees, 2021, Turiel, 2020, este mismo trabajo), van a provocar a todas las escalas y en consecuencia en los potenciales energéticos asequibles en ese contexto.

Los factores principales acoplados entre sí y relacionados con la tecnología y la sostenibilidad que limitan las RES son:

1. Los sistemas de captación y transformación de energía RES no son renovables, están contruidos con materiales que en su mayoría proceden de minas y recursos finitos, no renovables. Estos sistemas hay que construirlos, mantenerlos y desmantelarlos o reformarlos periódicamente, para cualquier fuente, renovable o no. Así, los problemas de contaminación y geopolítica asociados a las minas y dispersión de materiales y la finitud de los recursos materiales están presentes y pueden limitar las RES (Seibert y Rees, 2021). El uso de materiales en infraestructuras por unidad de energía final producida es hoy muy superior para las tecnologías RES modernas que sus equivalentes fósiles, principalmente debido a la baja densidad energética relativa (Capellán *et al.*, 2020; IEA 2021; Valero y Valero, 2021; Pulido *et al.*, 2021). Por tanto, trasladan, pero no resuelven a priori, los problemas geopolíticos derivados de la finitud y concentración geográfica de los depósitos minerales y materiales clave (Seibert y Rees, 2021). La finitud y escasez de ciertos minerales puede ser combatida mediante el aumento de las tasas de reciclado y la sustitución por minerales menos escasos. Sin embargo, los stocks en los sistemas en uso y su velocidad de implantación pueden generar igualmente cuellos de botella por altísima que sea la tasa de reciclado, que, dados los niveles actuales de reciclado y las dificultades técnicas para su incremento, han de tenerse en cuenta (Capellán-Pérez, *et al.*, 2019). En general, la sustitución de un elemento escaso por otro, suele ir en detrimento de la eficiencia del sistema, lo que es lógico si pensamos en que la industria, antes de la escasez, busca aquellos materiales que le den más eficacia.
2. Los potenciales tecnológicos asequibles y eficacia de los sistemas de captación y transformación se han exagerado y se exageran de forma sistemática en la literatura (ver las denuncias por ejemplo en Bocard 2009; Giampietro y Mayumi, 2009; Miller *et al.*, 2010; de Castro *et al.*, 2013 y 2014; de Castro y Capellán-Pérez, 2018; Seibert y Rees 2021), hasta el punto en que se emplean metodologías para aquellas evaluaciones que violan incluso los principios más básicos de la física (Miller *et al.*, 2010; de Castro *et al.*, 2011; de Castro, 2015; de Castro, 2022; Patzek, 2004 y 2006), sin que haya una rectificación o reconocimiento de los hechos. Incluso, en algunos casos, se llega a tergiversar, a mentir y a atacar personalmente a los autores de estas críticas por investigadores y los propios editores de revistas (Seibert y Rees, 2022; de Castro *et al.*, 2022). Como consecuencia, se sigue dando por presupuesto que las barreras a las tecnologías para evitar el cambio climático son solo económicas y políticas y no tecnológicas,

ecológicas o sociológicas (di Felice *et al.*, 2021; Seibert and Rees, 2021; Martin *et al.*, 2022). Además, también derivado de esas exageraciones se han minimizado sus efectos negativos (Giampietro, 2009; Searchinger *et al.*, 2008; Crutzen *et al.*, 2007; Boccard, 2009; Capellán-Pérez *et al.*, 2017; Van de Ven *et al.*, 2021). Por ejemplo, en la evaluación de las TRE y por tanto la de la energía neta que llega a la sociedad, se tiende a maximizar el numerador (la energía producida final), dado que como hemos señalado la literatura científica se ha mostrado sistemáticamente optimista con las eficacias, y se tiende a minimizar el denominador (los insumos energéticos embebidos en la cadena del sistema energético). Por lo que se ha demostrado, en el presente estas TREs son en muchos casos muy bajas, incluso inferiores o próximas a uno, y en el caso de las RES modernas eléctricas, muy probablemente inferiores a las fósiles (de Castro y Capellán-Pérez, 2020, ver tabla 1), aunque estas también tienen una TRE baja si se transforman en electricidad (Brockway *et al.*, 2019). Es decir, la transformación de las fuentes energéticas en electricidad, aunque sea un vector especialmente útil, tiene casi siempre muy baja TRE. La TRE baja de algunas fuentes y la TRE baja en general cuando hablamos de electricidad, puede tanto limitar cuánta energía se puede captar durante este siglo como qué proporción puede tener la electricidad en el mix energético. A su vez, si se hace una transformación muy rápida y se instalan muy rápidamente los sistemas de captación, se puede caer en una trampa energética, ya que la TRE del sistema dinámico cae rápidamente ya que las inversiones energéticas principales se realizan durante la fase anterior a la producción de energía por estos sistemas (Capellán-Pérez *et al.*, 2019). Es decir, el flujo de instalaciones a instalar y no solo la capacidad tecno-sostenible máxima pueden limitar las RES.

3. La intermitencia de las fuentes RES y que la electricidad no sea almacenable, genera unas necesidades relativas a las fuentes fósiles que requiere de una estrategia multifactorial y coordinada. Así se requiere mucha mayor capacidad a instalar y mayor complejidad de gestión e instalaciones para esa complejidad y para el almacenamiento de la energía en formas no eléctricas (con sus consecuentes pérdidas de transformación). Hoy esta intermitencia mayoritariamente es absorbida por un mix energético fósil capaz de cubrir la demanda energética en los momentos en que las RES no pueden producir, por lo que, si se sustituye la capacidad de almacenamiento y de cubrir la demanda instantánea de energía de las fósiles en el futuro, la cantidad de materiales y la disminución de la TRE asociada, se incrementarían respecto al presente (Capellán-Pérez *et al.*, 2019 y 2020). La dependencia hoy es casi total de las fósiles en toda la cadena que va desde la adquisición de los materiales necesarios en la mina, hasta la construcción, mantenimiento y desmantelamiento de las plantas y sistemas de captación RES. Sobre todo, en el transporte, puesto que éste en más de un 95% está asociado al uso de combustibles líquidos procedentes del petróleo (de Blas *et al.*, 2020, Pulido *et al.*, 2021 y 2022). Es decir, que las limitaciones en las fósiles y la transformación de la cadena energética, limitan la transición a RES al menos temporalmente, requiriendo, por ejemplo, que el sector transporte tenga fuentes renovables al tiempo que los sistemas de captación de esas fuentes requieren del transporte. Por tanto, la transición a RES requiere cambios simultáneos perfectamente acoplados y engrasados en todos los sistemas, desde las minas, pasando por el transporte (por ejemplo los vehículos eléctricos), los propios sistemas de captación, la necesidad de una economía material circular que aumente enormemente las tasas de reciclado, etc. De hecho, nunca en la historia de la humanidad se ha hecho una transformación planificada de la matriz energética en la que las fuentes anteriores no estuvieran en crecimiento (Fernández-Durán y González-Reyes, 2014; Smil, 2008).
4. La biosfera usa energía y abarca al sistema humano. Esto tiene una doble relevancia, por un lado, porque la contaminación y el cambio climático y sus consecuencias también van a limitar, dependiendo de su grado, cualquier sistema humano mientras este se adapta. La probabilidad de daño a las infraestructuras energéticas o relacionadas, aumenta no solo con el grado de las consecuencias de contaminación y cambio climático, sino también por el montante de las infraestructuras, pues hemos señalado que se requieren más estructuras de captación, transporte y almacenamiento que para las fósiles por unidad de energía generada y, además, las RES están más expuestas a fenómenos meteorológicos extremos ya que necesitan captar de la biosfera la energía primaria (pueden tratar de aislarse del entorno las centrales térmicas y nucleares, pero no un parque fotovoltaico o eólico). A su vez, no se debería olvidar que las fuentes renovables son precisamente las fuentes que usa la biosfera para su metabolismo, es decir, existe

una competencia directa por el uso de ríos, vientos, radiación, madera, etc. con el resto de formas de vida y los ciclos biogeoquímicos, de tal forma que pueden competir por los suelos, el agua y el aire con otros usos de los ecosistemas naturales y humanos. Así, hay conflictos históricos y presentes por el uso de tierras y existe cierta controversia sobre el grado en que se pueden evitar los problemas ambientales, más allá del cambio climático: ¿usan menos plásticos, evitan las tasas de extinción de especies y el deterioro de la diversidad, usan menos agua, reducen la deforestación, disminuyen o aumentan la conflictividad –extractivismo– entre países, pueblos y regiones productoras de minerales –como el cobre o el litio o el tántalo– frecuentemente en el Sur global (Latinoamérica, África) o en poblaciones sujetas a dictaduras sin las necesarias medidas de protección social y ambiental (China)? (Alonso-Fradejas, 2021; Dunlap y Marin, 2022; Sánchez *et al.*, 2021; Seibert y Rees, 2021). El cambio climático es condición suficiente para tratar de cambiar el sistema energético rápidamente, pero su aparente solución por vía de la rápida transición de la matriz energética no es garantía de que se resuelvan o disminuyan otros problemas socio-ambientales gravísimos también (Martin *et al.*, 2022; Seibert y Rees 2021; Rehhein *et al.*, 2020; Sonter *et al.*, 2020). Cuando se habla de tecno-sostenibilidad, se debe ir, pues, más allá e incorporar los posibles efectos rebote incluso sobre el cambio climático, ya que pueden aumentar las emisiones durante la transición desde un sistema fósil (Capellán-Pérez *et al.*, 2020).

4. CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL TECNO-SOSTENIBLE DE LAS FUENTES RENOVABLES

Para estimar el potencial de captación de fuentes renovables a escala global vamos a tener en cuenta las siguientes hipótesis de acuerdo con el epígrafe anterior, pero de una forma que consideramos optimista:

- a. Se utilizan eficacias realistas presentes de los sistemas frente a la exageración casi sistemática de la literatura (ver epígrafe anterior) que suele fundamentarse en cálculos teóricos o en plantas tipo idóneas en vez de mirar la productividad y condiciones de las plantas promedio mundiales. El aumento de las eficiencias se supone limitado y con tendencia a ser compensado por la disminución esperable de la TRE y la sustitución de materiales en el futuro escasos por otros más abundantes pero menos eficientes (por ejemplo, sustitución del neodimio por otros sistemas o materiales en motores eléctricos o turbinas eólicas, eliminación de la plata en paneles fotovoltaicos por otros elementos de mayor resistividad, disminución del cobre en favor del aluminio –más intensivo en energía– en conductores eléctricos, etc.).
- b. Para que la tecnología proporcione energía neta a la sociedad y sea sostenible, la TRE final en el presente, con la metodología desarrollada en el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS, de Castro y Capellán-Pérez, 2020), ha de ser mayor de 3:1. La TRE final debe ser ostensiblemente mayor que 1:1 porque ésta no incorpora todos los gastos energéticos indirectos que mantienen el sistema energético (ésta sería la TRE extendida que puede ser la mitad de la final en sistemas complejos como los que nos ocupan) y a su vez, hay que tener un *búfer* energético porque se incurre en gastos defensivos: por ejemplo, la energía gastada para la corrección de la contaminación causada por los sistemas de captación (Moriarty y Honery, 2019), los accidentes, las guerras o los impactos como el cambio climático o el almacenamiento cuasi-eterno de los residuos nucleares, etc. Se asume que esta TRE no disminuirá, de forma muy optimista, ya que los aumentos en la eficacia suponemos que compensarán un número amplio de tendencias a disminuir en el futuro la TRE (escasez mineral, pérdidas e infraestructuras para gestionar la intermitencia vía sobrecapacidad y almacenamiento, ocupación de peores espacios según nos aproximamos al potencial, etc.). Por último, las TRE estimadas están probablemente sobreestimadas (de Castro y Capellán-Pérez, 2020).
- c. Metodología top-down para estimar los potenciales desarrollada por el grupo GEEDS en las tecnologías que pasen el corte de la TRE (de Castro *et al.*, 2011, 2013 y 2014; de Castro 2015; Capellán-Pérez *et al.*, 2020).
- d. Escenarios de transición rápida a fuentes renovables (Calvo y Valero, 2022; Capellán-Pérez *et al.*, 2020) que consideran el aumento de uso de minerales críticos llevan a que algunos minerales escaseen tanto que se exploten todas sus reservas o incluso recursos. Informes por parte de instituciones (IEA, 2021; American Chemical Society ACS, 2019) advierten de los posibles cuellos de botella que los minerales pueden imponer

en el futuro siguiendo las tendencias actuales y aún más en escenarios que aceleran la transición energética, sin embargo aquí no se limitan los potenciales de forma absoluta por ello, pero sí se utilizará cierto principio de precaución. Se asume que el decrecimiento energético futuro que se deduce de nuestros potenciales y un gran aumento en las tasas de reciclado (superando las tendencias) relaja esta situación, también en el propio resto de la economía. Estimaciones más altas que las que vamos a dar generarían una alta contradicción con la accesibilidad de recursos minerales (Capellán-Pérez *et al.*, 2020; Pulido *et al.*, 2021 y 2022; de Blas *et al.*, 2020; Calvo y Valero, 2022). No se consideran los problemas asociados al extractivismo y los conflictos e injusticias que la extracción de minerales genera o que el sistema de captación esté en países y regiones diferentes al del consumo (por ejemplo, si se ponen paneles y turbinas en el Sahara nigeriano para alimentar Europa en vez de Nigeria) y que es esperable que puedan aumentar en proporción de su uso si no se cambia la matriz socio-económica mundial y sus desigualdades.

- e. Se asume que los fósiles podrán apoyar la transición a pesar de su escasez y de que están bajando su TRE (Brockway *et al.*, 2019).
- f. Se asume que no hay un fortísimo decrecimiento energético-material, ni colapso de civilización y que tampoco cambia la matriz socio-económica de forma fundamental. Esto generará una cierta contradicción porque de forma efectiva los resultados que vamos a encontrar suponen un fuerte cambio en las tendencias de evolución del mix energético y un decrecimiento considerable de la cantidad energética disponible tecno-sostenible.

A su vez, existe una dependencia (incertidumbre) según los escenarios que se manejen. Aquí vamos a asumir, desde las hipótesis optimistas anteriores, tres escenarios de acuerdo con más optimismo tecnológico y menos sostenibilidad ecológica y social en el escenario alto hacia lo contrario en el escenario bajo.

1. Escenario alto.

Este escenario supone que el mix energético podrá asumir el porcentaje que se requiera de electricidad (resulta en más de un 70% según tabla 2) ya que los potenciales teóricamente más altos los encontramos en plantas que producen electricidad hoy. Los problemas de escasez mineral absoluta, de extractivismo, de geopolítica, de biodiversidad y conflictos sociales por la competencia, se ignoran.

El escenario se basa en los límites para cada tecnología con una horquilla de incertidumbre estimados por nuestro grupo en distintos trabajos y modelos de evaluación integrada (IAMs por sus siglas en inglés). Escoge los valores altos de la horquilla que estimamos para algunas fuentes, y prioriza, por razón de montante global y TRE, que se prefiere usos no eléctricos en aquellas fuentes en los que también se puede producir electricidad.

2. Escenario medio.

Este escenario asume los mismos presupuestos que el anterior, pero debido a la bajada de la TRE y sobre el uso de minerales que implica el escenario alto y la enorme dificultad de acercarse a un sistema con un mix 100% eléctrico, limita la entrada de electricidad al 60% del mix. Si extrapolamos la tendencia lineal de los últimos 45 años al crecimiento relativo de la electricidad respecto al mix global nos llevaría a un porcentaje del 40% para finales de siglo (elaboración propia a partir de IEA, 2022), por lo que para llegar al 60% se requiere acelerar la tasa de incremento actual en un 60%. Este escenario asume los valores promedio de las horquillas estimadas en algunas tecnologías.

3. Escenario bajo.

Asume las horquillas bajas y un share del 50% de los usos eléctricos en el mix final. Es el más precavido y más cercano a un criterio ecológico y social más fuerte de sostenibilidad.

En la tabla 1 recogemos las estimaciones de TRE finales para las tecnologías que se han valorado. Aquellas formas de captación con TRE final < 3:1 se consideran sumideros de energía y por tanto no aportarán potencial tecno-sostenible al sistema, aunque se usen como vectores energéticos para convertir una forma de energía en otra más utilizable. Se considera que tecnologías eléctricas con TRE final que no superen el valor 5 están en el límite de sostenibilidad de sociedades complejas. Se estimará la energía neta aproximada que llega a la sociedad descontando los insumos energéticos derivados de las TRE extendida, como reflejan los comentarios de la tabla 1.

Tecnologías	TRE final	Comentarios
Hidroelectricidad	13:1	Energía neta ≈90%
Geotérmica Eléctrica común Eléctrica EGS* Térmica	5:1 <1.5:1 ≈10:1	Todo a térmico para aumentar potencial Sumidero de energía Asumiendo eficacia y calidad relativa a eléctrica, neto 90%
Oceánicas Mareas Olas OTEC**	<2.5:1 <1:1 <1:1	Sumideros de energía
Bio Bio-eléctricas Bio-térmicas Bio-carburantes	<2:1 2-10:1 <2:1	Sumideros de energía TRE aceptable en tecnologías clásicas de bajos insumos, neto 90% Sumideros de energía
Eólica Terrestre Marina Marina flotante	5.8:1 4.7:1 ≈2:1	Neto 70% Neto 70% Sumidero de energía
Solar PV CSP*** Térmica en cubierta	4:1 <2:1 ≈10:1	Neto 50% Sumidero de energía Asumiendo eficacia, calidad y menos insumos relativas a PV, neto 90%

Tabla 1. Estimaciones de tasas de retorno energético finales.

Fuente: de Castro y Capellán-Pérez, 2020 para solares eléctricas, eólicas, hidroeléctrica; de Castro *et al.*, 2014 para biocarburantes, bioeléctrica; elaboración propia con la misma metodología para oceánicas, geotérmicas, bio, solar térmica, bio-térmicas, geotérmica para calor. *EGS: Enhanced Geothermal System. ** OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion. ***CSP: Concentrated Solar Power. Para la energía neta se considera que la energía perdida es mayor que la que se deduce de la TRE final (ver texto).

En la tabla 2 damos los potenciales tecno-sostenibles estimados. En los escenarios bajo y medio la suma de los potenciales de las distintas tecnologías eléctricas es mayor que la total porque limitamos la entrada de electricidad en el mix al 50 y 60% respectivamente. Se da preferencia en geotérmica y solar en cubierta al calor frente a la electricidad porque así los potenciales totales son mayores, de ahí que el potencial eléctrico de estas tecnologías sea de cero. El resto de ceros es por consideraciones de TRE final o ecológicas. Se muestran las producciones totales en 2019 del mix presente y entre paréntesis las debidas a las fuentes renovables. Se considera que el uso actual de biomasa y residuos no es sostenible por lo que en los escenarios bajo y medio se contempla su disminución respecto al presente. Para los finales netos se asume la TRE extendida que se considera aproximadamente la mitad que la TRE final (de Castro y Capellán-Pérez, 2020). De esta forma se asigna un 70% de la bruta para las eólicas, un 50% para la fotovoltaica y un 90% para el resto.

Potenciales tecno-sostenibles (EJ/año)	Escenario bajo (más ecológico)	Escenario medio	Escenario alto (menos ecológico)	Producción (2019)
Tecnologías eléctricas				
Hidroelectricidad	30	30	30	12.9
Geotérmica	0	0	0	2.8
Oceánicas	0	0	0	6.6
Eólica terrestre	20	30	40	
Eólica marina	3.5	5	7	
PV en suelo	60	120	133	
PV en cubierta	0	0	0	
Bio y residuos	0	0	0	7.7
TOTAL eléctrico	52	104	210	82 (30)
Tecnologías térmicas				
Geotérmica	15.2	15.2	15.2	0.9
Solar en cubierta	22.4	22.4	22.4	1.4
Biomasa sólida	14	28	35	43.4
Residuos	0	4.2	8.4	
Biogás	0.3	0.3	0.3	
TOTAL térmico	52	70	81	336 (46)
TOTAL final bruto	104	175	291	418 (76)
TOTAL final neto	93	158	200	355

Tabla 2. Potenciales tecno-sostenibles de energía final y producción en 2019. Entre paréntesis, la producción renovable.

Fuentes: elaboración propia a partir de IEA, 2022; de Castro *et al.*, 2011, 2013 y 2014; de Castro, 2015; de Blas *et al.*, 2018 (capítulos 2, 3 y 4); Capellán-Pérez *et al.*, 2020.

5. CONCLUSIONES

El potencial tecno-sostenible de energía final neta en escenarios optimistas nos da como resultado una horquilla que es del 26-56% de la energía consumida en la actualidad. Los escenarios más altos tienden a infraestimar los limitantes ecológicos y sociales, de minerales y de TRE, siendo pues menos sostenibles que los más bajos. Todos los escenarios, aún más los más altos, requieren un incremento respecto a las tendencias de las últimas décadas en las tasas de reciclado y en la electrificación del sistema, generan un incremento temporal de las emisiones asociadas a la construcción del sistema energético renovable si se hace en unas pocas décadas (antes de 2060) y asumen que el modelo socio-económico no cambia radicalmente, ni el cambio climático y otros problemas ambientales y sociales impiden o limitan más los potenciales encontrados.

Bajo un principio de precaución todo ello apunta a que la energía neta accesible en la segunda mitad del presente siglo por vía de las RES puede ser del orden de un 25% respecto al presente a lo sumo, lo que puede realimentar los conflictos por el acceso en un mundo desigualmente repartido y con inercia al aumento de la población y a los deseos de crecimiento económico.

La disponibilidad energética final neta promedio actual es de unos 45GJ/año per cápita, es decir unos 1425W/per cápita (IEA, 2022).

El ciudadano promedio del futuro, asumiendo un aumento de la población por encima de los 9.000 millones dispondría de unos 300W per cápita si finalmente lo asequible es un 25% de la producción presente, que es aproximadamente el consumo presente promedio per cápita en la República Democrática del Congo, uno de los paí-

ses más pobres del mundo en cuanto a consumo energético (IEA, 2022) y de índice de desarrollo humano (IDH¹). Supondría que el ciudadano promedio hoy de Estados Unidos en un mundo totalmente equitativo en el uso de energía con un 100% RES podría ver reducido su consumo neto a menos del 4% respecto al consumo actual.

Un fuerte decrecimiento energético-material o el colapso de la civilización industrial están pues servidos (de Castro, 2017; Enríquez Sánchez *et al.*, 2020; Fernández Durán y González Reyes, 2014; Puig Vilar, 2022; Riechmann, 2021; Seibert y Rees, 2021; Turiel, 2020; Trainer, 2017).

REFERENCIAS

- ACS, Chemistry for Life (2019). Endangered elements. <https://www.acs.org/greenchemistry/research-innovation/endangered-elements.html> American Chemical Society.
- Alonso-Fradejas, Alberto (2021). 'Leaving no one unscathed' in sustainability transitions: the life purging agro-extractivism of corporate renewables. *Journal of Rural Studies* 81: 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.001>
- de Blas, Ignacio *et al.* (2018). D4.2 (D14). *Medeas European model*. <https://www.medeas.eu/deliverables>
- de Blas, Ignacio; Mediavilla, Margarita; Capellán-Pérez, Íñigo y 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>
- Brockway, Paul E.; Owen, Anne, Brand-Correa, Lina I.; Hardt, Lukas (2019). Estimation of global final-stage energy-return-on investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. *Nature Energy*, 4(7), 612-621. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0425-z>
- Calvo, Guiomar y Valero, Alicia (2022). Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environmental Development*. 41, 100640 <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100640>.
- Campbell, Colin J. y Laherrere, Jean H. (1998). The end of cheap oil. *Scientific American* 278(3): 78-83.
- de Castro, Carlos (2009). *Escenarios de energía-economía mundiales con modelos de dinámica de sistemas*. UVA. Tesis doctoral: Accesible: <https://geeds.es/wp-content/uploads/2011/11/Tesis-Carlos-de-Castro.pdf>
- de Castro, Carlos (2015). El potencial tecnológico de la energía eólica (vuelto a visitar). <https://geeds.es/news/el-potencial-tecnologico-de-la-energia-eolica-vuelto-a-visitar/>
- de Castro, Carlos (2017). Colapso y transición de nuestra civilización: defensa del Gaiarquismo. *La Albolafia: Revista de Humanidades y Cultura*, 10: 75-94.
- de Castro, Carlos y Capellán-Pérez, Íñigo (2018). Concentrated Solar Power: Actual Performance and Foreseeable Future in High Penetration Scenarios of Renewable Energies. *BioPhysical Economics and Resource Quality* 3, (3): 14. <https://doi.org/10.1007/s41247-018-0043-6>
- de Castro, Carlos; Mediavilla, Margarita; Miguel, Luis J. y Frechoso, Fernando (2011). Global Wind Power Potential: Physical and Technological Limits. *Energy Policy* 39, (10): 6677–82. <http://doi:10.1016/j.enpol.2011.06.027>
- de Castro, Carlos y Capellán-Pérez, Íñigo (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(12), 3036. <https://doi.org/10.3390/en13123036>
- de Castro, Carlos; Miguel, Luis J. y Mediavilla, Margarita (2009). The Role of Non Conventional Oil in the Attenuation of Peak Oil. *Energy Policy* 37, (5): 1825–33. <http://doi:10.1016/j.enpol.2009.01.022>.
- de Castro, Carlos; Mediavilla, Margarita; Miguel, Luis J. y Frechoso, Fernando (2013). Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28(2013), 824-835.
- de Castro, Carlos; Carpintero, Óscar; Frechoso, Fernando; Mediavilla, Margarita y Miguel, Luis J. (2014). A Top-down Approach to Assess Physical and Ecological Limits of Biofuels. *Energy* 64: 506–12. <http://doi:10.1016/j.energy.2013.10.049>.
- de Castro, Carlos; Capellán-Pérez, Íñigo; Miguel, Luis J. (2022). Reply to Fthenakis *et al.*, (2022) (refused to be published by Energies, MDPI). <https://geeds.es/en/news-2/reply-to-fthenakis-et-al-2022-refused-to-be-published-by-energies-mdpi/>
- Capellán-Pérez, Íñigo; de Castro, Carlos y Miguel González, Luis Javier (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, Íñigo; de Castro, Carlos y Arto, Iñaki (2017). 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.
- Capellán-Pérez, Íñigo *et al.* (2020). MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. *Energy & Environmental Science* 13: 986-1017. <https://doi.org/10.1039/C9EE02627D>
- Capellán-Pérez, Íñigo *et al.* (2016). (2016). Likelihood of Climate Change Pathways under Uncertainty on Fossil Fuel Resource Availability. *Energy & Environmental Science* 9 (8): 2482–96. <http://doi:10.1039/C6EE01008C>
- Dunlap, Alexander y Marin, Diego (2022). Comparing coal and 'transition materials'? Overlooking complexity, flattening reality and ignoring capitalism. *Energy Research & Social Science*, 89, 102531. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102531>
- Enríquez, José M.; Miguel, Luis J. y Duce, Carmen (Editores) (2020). *Repensar la sostenibilidad*. Madrid: UNED.

1 <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index>

- EU (2021). *State of the Energy Union 2021 – Contributing to the European Green Deal and the Union's recovery*. https://energy.ec.europa.eu/index_en
- di Felice, Louisa J.; Renner, Ansel y Giampietro, Mario (2021). Why should the EU implement electric vehicles? Viewing the relationship between evidence and dominant policy solutions through the lens of complexity. *Environmental Science and Policy*, 123: 1-10.
- Fernández-Durán, Ramón y González-Reyes, Luis (2014). *En la espiral de la energía. Vol. 1: Historia de la humanidad desde el papel de la energía (pero no solo). Vol. 2: Colapso del capitalismo global y civilizatorio*. Madrid: Baladre y Libros en Acción.
- Gallero, José Luis y Riechmann, Jorge (2018). *Mater Celeritas. Materiales (biofísicos, políticos y poéticos) para una cronología de la aceleración*. Madrid: Corazones Blindados.
- Hall, Charles A.S.; Lambert, Jessica G. y Balogh, Stephen 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>
- Hermann, Weston A. (2006). Quantifying global exergy resources. *Energy*, 31, (12): 1685-1702. <https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0360544205001805;h=repec:eee:energy:v:31:y:2006:i:12:p:1685-1702>
- IEA (2022). International Energy Agency. <https://www.iea.org/sankey/>
- IEA (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IPCC (2022). *Sixth Assessment Report*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- IPCC, (2011). *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge United Kingdom y New York: Cambridge University Press.
- Kerschner, Christian y Capellán-Pérez, Íñigo (2017). "Peak-Oil and Ecological Economics". En: Spash, Clinve (ed.). *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and Society*. Abingdon: Routledge.
- Martin, Nick; Madrid-López, Cristina; Villalba-Méndez, Gara y Talens-Peiró, Laura (2022). Overlooked factors in predicting the transition to clean electricity. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(2), 021005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac70f7>
- Meadows, Donella H.; Meadows, Dennis L.; Randers, Jørgen; Behrens III y 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.
- Moriarty, Patrick y Honnery, Damond (2019). Ecosystem maintenance energy and the need for a green EROI. *Energy Policy*, 131: 229-234 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.006>.
- Nieto, Jaime; Carpintero, Óscar; Miguel, Luis J. y de Blas, Ignacio (2020). Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. *Energy Policy*, 137(111090), <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111090>
- Patzek, Tad W. (2004). Thermodynamics of the corn-ethanol biofuel cycle. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23(6): 519–567. <https://doi.org/10.1080/07352680490886905>
- Patzek, Tad W. (2006). A First-Law Thermodynamic Analysis of the Corn-Ethanol Cycle. *Natural Resources Research*, 15(4): 255–270. <https://doi.org/10.1007/s11053-007-9026-9>
- PuigVilar, Ferran (2022). *Usted no se lo cree*. <https://ustednoselocree.com/>
- Pulido Sánchez, Daniel; Capellán-Pérez, Íñigo; Mediavilla, Margarita; De Castro, Carlos y Frechoso, Fernando (2021). Análisis de los requerimientos de materiales de la movilidad eléctrica mundial. *DYNA*, 96: 207 – 213. <https://doi.org/10.6036/9893>
- Pulido Sánchez, Daniel; Capellán-Pérez, Íñigo; De Castro, Carlos y Frechoso, Fernando (2022). Material and energy requirements of transport electrification. *Energy & Environmental Science*, 15(12), 4872–4910. <https://doi.org/10.1039/d2ee00802e>
- Rehbein, José A.; Watson, James E. M.; Lane, Joe L.; Sonter, Laura J.; Venter, Oscar; Atkinson, Scott C. y Allan, James R. (2020). Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Global Change Biology*, 26(5), 3040–3051. <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>
- Riechmann, Jorge (2021). *Informe a la subcomisión de cuaternario*. Madrid: Ardora Ediciones.
- Sánchez Vázquez, Luis; Olivieri, Chiara; Escalante Moreno, Helios y Velázquez Pérez, Mariela (editores), (2021). *Minería y extractivismos. Diálogo entre la academia y los movimientos sociales*. Granada: Editorial Universidad de Granada.
- Seibert, Megan. K. y Rees, William E. (2021). Through the Eye of a Needle: An Eco-Heterodox Perspective on the Renewable Energy Transition. *Energies*, 14, no. 15: 4508. <https://doi.org/10.3390/en14154508>
- Seibert, Megan K. y Rees, William E. (2022). Reply to Fthenakis et al. Comment on "Seibert, M.K.; Rees, W.E. Through the Eye of a Needle: An Eco-Heterodox Perspective on the Renewable Energy Transition. *Energies* 2021, 14, 4508". *Energies* 15(3), 971. <https://doi.org/10.3390/en15030964>
- Sekera, June y Lichtenberger, Andreas (2020). Assessing Carbon Capture: Public Policy, Science, and Societal Need. *Biophysical Economics and Sustainability*, 5(3). <https://doi.org/10.1007/s41247-020-00080-5>
- Smil, Vaclav (2008). *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*. Cambridge: The MIT Press.
- Sonter, Laura J.; Dade, Marie C.; Watson, James E. M. y Valenta, Rick K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
- Trainer, Ted (2017). *La vía de la simplicidad: hacia un mundo sostenible y justo*. Madrid: Trotta.
- Turiel, Antonio (2020). *Petrocalipsis: Crisis energética global y cómo (no) la vamos a solucionar*. Barcelona: Alfabeto.

Valero, Antonio y Valero, Alicia (2021). *Thanatia. Los límites minerales del planeta*. Barcelona: Icaria.

World Bank. *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. <https://www.commdv.org/publications/minerals-for-climate-action-the-mineral-intensity-of-the-clean-energy-transition/>



a690

Carlos de Castro