

## CRECIMIENTO SOCIOECONÓMICO Y CRISIS ECOSOCIAL: ESTADO DE LA CUESTIÓN

José Anastasio Urra Urbieto

Universitat de València, España.

<https://orcid.org/0000-0002-5699-9453>

[anastasio.urra@uv.es](mailto:anastasio.urra@uv.es)

## SOCIO-ECONOMIC GROWTH AND THE ECO-SOCIAL CRISIS: STATE OF THE MATTER

**Cómo citar este artículo/Citation:** Urra Urbieto, José Anastasio (2024). Crecimiento socioeconómico y crisis ecosocial: estado de la cuestión. *Arbor*, 200(812): 2600. <https://doi.org/10.3989/arbor.2024.812.2600>

**Copyright:** © 2024 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: 10 enero 2023. Aceptado: 13 diciembre 2023.

Publicado: 13 diciembre 2024

**RESUMEN:** A partir de una extensa revisión de las referencias científico-técnicas esenciales y relevantes sobre la génesis y las implicaciones de la actual crisis ecosocial, en este artículo desarrollamos una descripción transdisciplinar y sintética del estado de la cuestión sobre la crisis de sostenibilidad. Para ello, tras la introducción y somera descripción del marco sociopolítico institucional de donde se ha tratado de gestionar la integración del crecimiento económico con la sostenibilidad, en primer lugar examinamos los principales costes, en términos energéticos, ecosistémicos y climáticos, acarreados hasta la actualidad por el paradigma dominante de crecimiento económico, para, a continuación, revisar los principales límites tecnológicos que desde la ciencia y la técnica se vislumbran a la continuidad de dicho paradigma dominante de crecimiento económico continuo. La revisión del ingente cúmulo de evidencia científico-técnica nos lleva, finalmente, a concluir sobre la incompatibilidad del paradigma socioeconómico dominante, basado en el crecimiento continuo, con toda forma de sostenibilidad ecológica, y sobre la necesidad de un profundo y radical replanteamiento de dicho paradigma socioeconómico dominante como la más lógica y mejor vía, si no ya la única, para afrontar los magníficos retos a los que como civilización se enfrenta la Humanidad.

**ABSTRACT:** Based on an extensive review of the essential and relevant scientific-technical literature on the genesis and implications of the current eco-social crisis, in this article we develop a transdisciplinary and synthetic description of the state of the matter regarding the sustainability crisis. To this end, after the introduction and a brief description of the institutional socio-political framework from which an attempt has been made to integrate economic growth with sustainability, we first examine the main costs, in terms of energy, ecosystems and climate, borne to date by the dominant paradigm of economic growth, to then review the main technological limits to the continuity of this dominant paradigm of continuous economic growth foreseen by science and technology. A review of the huge accumulation of scientific-technical evidence leads us, finally, to a conclusion on the incompatibility of the dominant socioeconomic paradigm, based on continuous growth, with all forms of ecological sustainability, and on the need for a profound and radical rethinking of this dominant socioeconomic paradigm as the most logical and best way, if not now the only one, to face the enormous challenges that as a civilization humanity faces.

**Palabras clave:** crecimiento; sostenibilidad; transición ecológica; colapso socioeconómico; estado de la cuestión

**Key Words:** growth; sustainability; ecological transition; socioeconomic collapse; state of the matter

## INTRODUCCIÓN

La preocupación por el deterioro del territorio, del paisaje, de los ecosistemas y de las especies que componen la biosfera, que tiene un largo recorrido, motivó el primero de los informes al Club de Roma por el grupo de científicos de dinámica de sistemas del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT): *Los límites del crecimiento* (Meadows, Meadows, Randers y Behrens III, 1972).

Por primera vez en la historia disponíamos de un modelo matemático complejo de la economía mundial y sus relaciones con la biosfera, el *World-3*, y de la tecnología necesaria para implementarlo; por primera vez capaces de buscar y encontrar patrones, más allá de la intuición, en la tupida red de interacciones entre las cinco variables consideradas en el modelo: inversiones (industrialización), población, contaminación, recursos naturales y alimentos.

La conclusión general del informe *Los límites del crecimiento* fue que, de seguir con nuestro modelo industrial de desarrollo capitalista, a lo largo del siglo XXI la economía mundial tendería a detener su crecimiento y luego a colapsar, como resultado de la combinación de una menor disponibilidad de recursos naturales con la sobrepoblación y el exceso de contaminación.

El objetivo del modelo global *World-3* no era proporcionar predicciones exactas, sino tratar de anticipar el comportamiento general del sistema socioeconómico-ecológico mundial; no se trataba de hacer vaticinios, sino de construir una herramienta útil para la adopción de decisiones al más alto nivel.

Más allá de la controversia inicial, las decisiones al más alto nivel no se hicieron esperar, con la enumeración de unos ambiciosos objetivos de protección medioambiental, entendido el medioambiente como *medioambiente humano*, en la Cumbre de la Organización de Naciones Unidas (ONU) de 1972 de Estocolmo. Pero no fue hasta 1987, con *Nuestro futuro común*, más conocido como *Informe Brundtland* (ONU – *Brundtland Commission*, 1987), que se popularizó el concepto de *desarrollo sostenible* como *aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*. Sin embargo, en la Cumbre de la ONU de Río de 1992 se produjeron serias rebajas en los objetivos de protección medioambiental, en el número y la calidad de los sujetos encargados de su ejecución, y en los medios utilizados para ejecutarlos (Naredo, 2015), de manera que los ambiciosos objetivos de protección de Estocolmo 72 fueron definitivamente sustituidos por la controlada dosis de ambigüedad del *desarrollo sostenible*, en un momento en el que la propia fuerza de los hechos exigía más que nunca ligar el proceso económico al medio físico en el que toma cuerpo y se desarrolla. Esta pérdida de radicalidad se siguió acusando en las Cumbres de Johannesburgo de 2002 y de Río de 2012, ya divulgada esta última como Río+20, dejando en el olvido Estocolmo+40.

Posteriormente, en 2016, dichas rebajas en los objetivos medioambientales se institucionalizaron por el *Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo* (PNUD) en los denominados *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS), que rematan la trayectoria de enarbolar metas loables (fin de la pobreza, hambre cero, salud y bienestar, igualdad de género, energía asequible y no contaminante...) (Morgan y Bach, 2018) manteniendo sin discusión el marco institucional y conceptual sobre el que se asientan las actuales reglas del juego económico, que contradice a diario los objetivos enunciados y que nos aleja cada vez más de la posibilidad de corregir el *statu quo*.

Mientras tanto, a la vez que la conclusión general del informe *Los límites del crecimiento* —robusta en la medida en que el desenlace variaba poco cuando cambiaban los supuestos iniciales de las simulaciones— ha venido confirmándose en las posteriores revisiones y actualizaciones del informe original, una en 1992 (Meadows, Randers y Meadows, 1992) y otra en 2004 (Meadows, Randers y Meadows, 2006), el *medioambiente* se ha convertido, fundamentalmente, en el vacío que deja el enfoque económico ortodoxo al circunscribir su razonamiento al universo de los valores monetarios y al definir como *externalidades* lo que ocurre en ese medioambiente.

De esta manera, a la par que se han venido multiplicando las cumbres y encuentros internacionales sobre el medioambiente, en una tendencia paranoica a dirigir la atención y las críticas hacia aspectos alejados del núcleo duro ideológico e institucional que genera los problemas (Ecologistas en Acción, 2021), su contenido se ha visto reducido a las cuestiones climáticas, desconectadas de los usos del territorio, del metabolismo del sistema socioeconómico y de las reglas del juego económico que las mueven, que son los que aumentan la entropía pla-

netaria, siendo los cambios climáticos locales y globales un mero reflejo de este aumento entrópico (Ecologistas en Acción, 2021).

## CRECIMIENTO: EL OCTAVO DE LOS ODS

El *Informe Brundtland* ideó el *desarrollo sostenible* para tender un puente virtual entre conservacionistas y desarrollistas. El objetivo era desactivar el enfrentamiento entre ambos, enconado tras la publicación del informe sobre *Los límites del crecimiento* en 1972 (Naredo, 1996). Las sucesivas *cumbres* de la ONU han venido imponiendo el concepto para sostener la lógica del crecimiento económico hasta institucionalizar su vaciado de contenido con los ODS de 2016, como lo prueba el hecho de que el octavo de estos objetivos fije como meta deseable, y alcanzable, la mezcla de *Trabajo decente y crecimiento económico*.

Sin duda, en nuestro actual paradigma de desarrollo industrial capitalista, el crecimiento económico resulta necesario para mantener una tasa de empleo social y políticamente aceptable; sin embargo, como cada vez observamos más a nuestro alrededor, eso no solo no significa que se trate de *trabajo decente*, sino que el trabajo precario, e incluso en régimen de semiesclavitud y esclavitud moderna, alcanza en la actualidad, según la propia ONU y las organizaciones no gubernamentales al frente de la investigación sobre esta cuestión, niveles nunca vistos en la historia de la humanidad (ILO, Walk Free y IOM, 2022; Walk Free, 2023). Además, según estas mismas fuentes, más de la mitad del trabajo forzoso se presenta, en la actualidad, y a pesar de las ingentes políticas sociales, en países de ingresos medios y altos; y, aunque esta práctica afecta a todos los sectores de la economía, las cinco actividades más proclives a estas acciones ilícitas son la agricultura, la industria, la construcción, los servicios y el trabajo doméstico (ILO, Walk Free y IOM, 2022).

Pero, ¿cuánto ha crecido el sistema económico?, ¿y a qué coste? Y más importante aún, ¿es posible mantener en adelante la trayectoria de crecimiento que hemos seguido hasta el presente?

El actual paradigma crematístico, que algunos no dudan en calificar como *necrocapitalismo* (Banerjee, 2008), se caracteriza por una visión del mundo-oceano decimonónico (Almenar, 2012), como si aún quedasen grandes descubrimientos por realizar en nuestro planeta; por una consideración teórica y práctica del proceso socioeconómico como sistema cerrado y ajeno a sus intercambios con la biosfera, el sistema superior del que ineluctablemente forma parte; y por una perspectiva centrada en el corto plazo y en el beneficio; y se basa en la competencia, el crecimiento y la acumulación. Conforme con este enfoque, y de acuerdo con las mejores estimaciones estadísticas de que disponemos, el Producto Interior Bruto (PIB) mundial ha crecido a una tasa media interanual del 2,1% durante el siglo XX y hasta 2010 (DeLong, 2022), prácticamente duplicando así la base material del sistema socioeconómico cada 35 años, hasta alcanzar, según datos del Banco Mundial, los 87,735 trillones de dólares, o 71,9 billones de euros, a precios constantes de 2019; mientras que, según datos de la ONU, la población mundial actual supera los 8.000 millones de personas, y la realidad inapelable es que hemos poblado prácticamente todo el planeta excepto las latitudes polares más extremas, no quedan islas por descubrir, y las que permanecen sin habitar es porque carecen de agua potable.

Este superlativo crecimiento socioeconómico ha sido posible gracias al desarrollo tecnológico del ser humano debido al incremento de la energía exosomática en sus relaciones socioeconómicas, lo que, a su vez, le ha permitido explotar exponencialmente los recursos naturales del planeta en una fase geológica interglacial, todo lo cual ha conducido al actual proceso de globalización de la civilización industrial, que, como describimos a continuación, no ha sido, ni mucho menos, gratuito.

### Energía

La energía no solo es el combustible de nuestro sistema socioeconómico, como ya reconocen innumerables investigaciones desde bien diferentes enfoques epistemológicos (Cleveland, Constanza, Hall y Kaufmann, 1984; Campbell y Laherrère, 1998; Hall *et al.*, 2001; Hamilton, 2009; Capellán-Pérez *et al.*, 2014; García-Olivares y Ballabrera-Poy, 2015; García-Olivares, 2016; Fernández y González, 2018), sino que además es la clave de la vida, la base de todo nuestro sistema biológico y socioeconómico, pues este último solo es una extensión del primero, auténtica condición material *sine qua non*.

Por si cupiese alguna duda sobre la relevancia socioeconómica de la energía, cuando cruzamos los datos de crecimiento mundial a partir del PIB con los datos de consumo energético mundial, publicados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) desde 1971, en millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), encontramos una elevada correlación directa entre ambas distribuciones; o a mayor crecimiento económico, mayor consumo energético; o sin consumo energético no es posible el crecimiento económico.

Según la IEA (2013), la matriz energética mundial —composición de las fuentes de energía primaria utilizadas en el mundo— en 2011 fue la siguiente: 32% petróleo, 29% carbón, 21% gas natural, 10% biomasa, 5% nuclear, 2% hidroeléctrica y 1% otras renovables; sin que haya variado significativamente hasta la actualidad, observándose en 2019 únicamente un ligero incremento de 7 puntos porcentuales de las renovables, incluida ahora la hidroeléctrica, a costa de una pérdida de 6 puntos porcentuales de la biomasa y una pérdida de un punto porcentual del carbón (IEA, 2020). No parecen preverse cambios significativos a más largo plazo, al menos en el escenario tendencial, con una estimación según la cual los combustibles fósiles pasarían de representar el 81% de la energía primaria en 2019 al 76% en 2030 (IEA, 2020); mientras que las renovables, incluida la hidroeléctrica, tan solo se incrementarían, según esta misma estimación, en 5 escasos puntos porcentuales a finales de la década (IEA, 2020). A escala mundial, los hidrocarburos, por tanto, aportan más de la mitad de la energía primaria consumida, y más de cuatro quintas partes provienen de los combustibles fósiles (hidrocarburos más carbón); en particular, el 32% del consumo energético primario global proviene del petróleo, siendo la fuente energética más utilizada aún en la actualidad y con la previsión de que continúe siendo así al menos hasta 2030 (IEA, 2020).

En 1956, Marion King Hubbert, geofísico de la *Royal Dutch Shell*, estimó, mediante modelos y cálculos matemáticos a partir de la evolución de las tasas de extracción de los pozos, que la producción total de petróleo de los Estados Unidos alcanzaría su tasa máxima posible de extracción entre 1965 y 1970 (Hubbert, 1956). Estados Unidos alcanzó su máxima tasa de producción petrolera en 1971, pasando desde ese año a ser uno de los principales importadores mundiales. Hubbert también estimó la tasa máxima de extracción petrolera mundial entre 1995 y 2000 (Hubbert, 1956).

A finales del siglo pasado, la evidencia apuntaba a que comenzábamos a llegar al fin del petróleo barato (Campbell y Laherrère, 1998). Posteriormente, tras la crisis de 2008, analizando los datos de la Administración para la Información sobre Energía de los Estados Unidos (EIA), Murray y King (2012) encontraron que desde 2004 la oferta mundial de crudo se había vuelto inelástica: hasta 2004, la oferta había seguido el comportamiento de mercado lógico y esperado, aumentando desde los 68 millones de barriles al día (mbd) de 1998 hasta los 74 mbd en respuesta al incremento de precio producido por una demanda rampante; pero algo ocurrió en 2004, pues desde entonces, por más que aumentó el precio, la producción mundial de crudo permanecía clavada en torno a los 74 mbd. La EIA estimaba en 2008 que la máxima producción mundial de crudo se había alcanzado en 2005 (EIA, 2008), mientras que la IEA reconoció en 2010 que la producción de petróleo crudo convencional tocó su *techo* mundial en 2006 en los poco más de 74 mbd (IEA, 2010); desde entonces, la producción mundial de crudo disminuye a razón de entre un 3% a un 6% anual (IEA, 2022), y, como ya hemos experimentado en diferentes ocasiones, el precio tampoco puede aumentar por encima de determinado umbral sin provocar una profunda recesión económica global (Hamilton, 2009).

En 2013, la IEA señalaba que, si no se realizan las inversiones necesarias, en 2035 tendremos que pasar con aproximadamente un 15% de la producción de 2013 (IEA, 2013). Y las inversiones necesarias no solo no se están realizando, sino que han comenzado a retirarse, constituyendo una de las principales amenazas para la *seguridad energética* (IEA, 2021b, 2022), claro eufemismo con el que la IEA se refiere a los posibles cortes de suministro y desabastecimientos; las grandes petroquímicas mundiales están disminuyendo las inversiones porque el petróleo ya no es rentable: cuesta más extraerlo de los menguantes yacimientos conocidos, y el que queda se halla en zonas profundas de los océanos, en el Ártico y la Antártida, o disperso en capas profundas de rocas compactas, lo que incrementa exponencialmente los costes de exploración y explotación (*upstream*) por las difíciles condiciones de tales enclaves.

Así, la producción mundial total de petróleo desciende inexorablemente a pesar de la explotación del petróleo ligero de roca compacta (*Light Tight Oil* - LTO) mediante la técnica de fracturación hidráulica (*fracking*) en Estados

Unidos y de las arenas bituminosas de Alberta en Canadá, sucedáneos de inferior rendimiento y dudosa rentabilidad energética que en conjunto han llegado a aportar el equivalente a unos 8 mbd desde el año 2009 (IEA, 2022) y ya se suman claramente al declive, con la mayor parte de las empresas que iniciaron las tempranas inversiones en estas técnicas de extracción quebrando en cascada desde 2014.

Recientemente, la IEA reconoció que el pico de extracción de todos los líquidos asimilados al petróleo se produjo en 2018 (IEA, 2021), y, mientras que en su informe de 2018 la IEA advertía de que tan pronto como en 2025 podría llegar a faltar hasta el 34% del consumo de petróleo y que se producirían varios picos de precio (IEA, 2018), en su informe de 2020 estimaba que, debido a la desinversión de las petroleras desde 2014, de 2020 a 2025 la producción de petróleo podría caer hasta un 50% (IEA, 2020). De hecho, en su informe de 2022, la IEA reconoce ya una caída del 10% de la producción de crudo convencional entre 2010 y 2021, caída que solo se ha visto amortiguada por el incremento de los líquidos del gas natural (comúnmente NGL, que incluyen propano, butano, pentano, hexano y heptano, pero no metano ni etano, debido a que estos últimos necesitan refrigeración para licuarse) (IEA, 2022), que en su mayoría son consumidos de manera no energética por la industria para hacer plásticos. También *British Petroleum* (BP), una de las *big five* o *supermajors* entre las corporaciones petroquímicas, se suma al reconocimiento del pico de extracción de todos los líquidos asimilados al petróleo en 2018, con lo que, incluso desde la esfera privada, las estimaciones y advertencias no dejan lugar a duda: guiada por el paradigma de valores capitalista, la civilización industrial ha quemado la mayor parte de la herencia energética recibida.

Y ante tal situación y tendencia, agravada por los recientes, y crecientes, conflictos bélicos, ya en el este de Europa —donde “la invasión Rusa de Ucrania en febrero de 2022 ha intensificado un periodo de extraordinaria turbulencia en los mercados energéticos desde septiembre de 2020” (IEA, 2022, p. 87)—, ya en el norte de África (Níger, Sahara Occidental) y, más recientemente, en Oriente Medio (Israel, Gaza, Siria, Egipto, Irán...), se confía plenamente en las energías erróneamente denominadas renovables (que en su desarrollo actual, sin embargo, en realidad constituyen enormes sistemas industriales no renovables de captación y transformación de energías renovables, principalmente, aunque no exclusivamente, solar y eólica). Y ello a pesar no solo de sus límites físicos y técnicos, como describimos en el epígrafe 3, sino también de las amenazas para la *seguridad energética* que entraña su desarrollo previsto, entre las que, tal como señala y describe la misma IEA, merecen ser destacadas la significativa falta de inversión (IEA, 2021b, 2022), las dramáticas limitaciones de los materiales críticos necesarios para su desarrollo (IEA, 2021a, 2021b, 2022) y la inestabilidad de la red eléctrica mundial derivada de una dimensión muy distante a la necesaria para el despliegue previsto (IEA, 2022, 2023). Una solución en la que se confía también a pesar de que la ciencia señala que, tras casi dos décadas, su desarrollo dista mucho de lo que sería necesario para considerar cualquier forma de transición energética (Ripple *et al.*, 2020, 2021, 2023).

### Ecosistemas y recursos

De los ecosistemas obtenemos los recursos naturales necesarios para nuestra subsistencia y todos nuestros desarrollos tecnológicos e industriales. En este sentido, no solo el petróleo o los minerales constituyen recursos naturales, sino que los bosques, el resto de los animales y plantas, el agua o el aire respirable deben considerarse también recursos naturales valiosísimos. Y el agotamiento de muchos recursos vitales para nuestra especie constituye una de las más preocupantes amenazas de la actual situación de emergencia planetaria, uno de los mayores retos a los que como especie nos enfrentamos.

Porque no solo tenemos problemas con recursos no renovables como el petróleo y las fuentes energéticas fósiles, como hemos argumentado, sino que el número de recursos vitales con los que comenzamos a tener serios problemas globales ha venido incrementándose y acelerándose a medida que el modelo de desarrollo industrial capitalista se ha extendido por todo el planeta, afectando en la actualidad a recursos tradicionalmente considerados como renovables (Steffen *et al.*, 2004).

Así, comenzamos también a tener graves problemas con una gran parte de los minerales en la base de nuestra industria y nuestra tecnología, tal como se evidencia desde la academia (Valero, 2008), desde la industria (Diederer, 2009) y, ya también, como hemos señalado en el epígrafe anterior, desde las más altas instituciones (IEA, 2021a, 2021b, 2022, 2023). Pero, además, tenemos problemas globales con el agua potable, cuyo consumo se ha

venido doblando cada 20 años, debido a la conjunción de los excesos de consumo de los países desarrollados y del crecimiento demográfico, con las consiguientes necesidades de alimentos (UNESCO-WWAP, 2003). También la fauna marina se encuentra en una situación de sobrecarga, en la que el 30% de las especies marinas que se pescaban ha colapsado, reduciéndose sus poblaciones en un 90% desde 1950 (Worm *et al.*, 2006); y, según la ONU, entre 1970 y 2006 se extinguieron un tercio de todas las especies conocidas de vertebrados (mamíferos, reptiles, aves, anfibios y peces).

Por si fuera poco, tenemos problemas con las tierras cultivables, bien a pesar de que en los últimos 100 años hemos perdido la mitad de la superficie forestal del planeta (Ripple *et al.*, 2020, 2021, 2023), y, como señalan los informes de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) de la ONU, continuamos perdiendo 11,2 millones de hectáreas netas de bosques vírgenes al año. Según el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), esto se debe fundamentalmente al uso del bosque como fuente de energía (cerca de 2.000 millones de personas en el mundo dependen de la leña como combustible), a la expansión agrícola y ganadera, y a la de la minería y de las actividades de compañías madereras que, a menudo, escapan a todo control.

Superamos la capacidad de carga del planeta desde 1980, y la huella ecológica mundial superó ya en 1999 la capacidad de carga planetaria en más del 20% (Wackernagel *et al.*, 2002).

Tal es la situación que, a iniciativa de su Secretario General, Kofi Annan, Naciones Unidas decidió en 2000 tratar de avanzar, sistematizar e integrar el conocimiento con la creación de la *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio* (MA), conformada por un panel de más de 1.360 científicos con la finalidad de evaluar las consecuencias del cambio de los ecosistemas para el bienestar humano y la base científica de las acciones necesarias para mejorar la conservación y el uso sostenible de los ecosistemas y su contribución al bienestar humano. Del informe de MA, que se publicó en 2005 (Reid *et al.*, 2005), se desprenden, entre otros, los siguientes hallazgos fundamentales:

- El 60% de los servicios que nos prestan los ecosistemas están siendo degradados o usados de forma insostenible.
- Durante la segunda mitad del siglo XX se ha producido la transformación de los ecosistemas más rápida de la historia, con daños a la diversidad biológica considerables e irreversibles.
- Los cambios de los ecosistemas entrañan costes severos, con riesgo de cambios no lineales, disruptivos, y el agravamiento de la pobreza para una gran parte de la humanidad y las generaciones futuras.
- La degradación de los servicios de la naturaleza podría empeorar durante la primera mitad del siglo XXI, impidiendo el desarrollo de los países emergentes.
- La degradación de los ecosistemas podría ser parcialmente revertida mediante cambios políticos, institucionales y sociales, pero no se están produciendo.

Como podemos observar, la evidencia tampoco deja lugar a duda en el caso de los ecosistemas: los cambios políticos, institucionales y sociales necesarios para revertir su avanzada, preocupante y amenazante degradación no solo no se están produciendo, sino que el ritmo de la degradación se ha acelerado desde 2004 (Steffen *et al.*, 2015; Ripple *et al.*, 2020, 2021, 2023).

## Clima

Sabemos que el clima del planeta depende de numerosos factores y fenómenos, endógenos y exógenos, comenzando por la influencia del Sol, cuya energía se encuentra en la base de la vida.

Gran parte de la irradiación solar, alrededor del 60%, atraviesa la atmósfera sin interactuar con las moléculas de oxígeno, nitrógeno, agua y CO<sub>2</sub>, hasta llegar a la superficie, donde se absorbe y luego es irradiada nuevamente hacia la atmósfera en forma de calor. Pero la radiación infrarroja de la superficie calentada del planeta es retenida en la atmósfera por los gases de efecto invernadero (GEI) y devuelta hacia la superficie.

Los principales GEI son, por este orden, el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>) y los gases clorofluorocarbonados (CFC); y sabemos que, a diferencia

del vapor de agua, cuya concentración, regulada por la lluvia, se mantiene constante en la atmósfera (a mayor concentración de vapor de agua, más lluvia, y a la inversa), la concentración de CO<sub>2</sub> puede variar desde 150 partes por millón (ppm) hasta 2.000 ppm a lo largo de los milenios y de los eones.

Sabemos también que cada evento de extinción masiva se corresponde con periodos de elevaciones rápidas en la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico: cuando el CO<sub>2</sub> cambia lentamente, el aumento gradual permite la mezcla y almacenamiento de las capas superficiales por los sumideros del océano profundo y los organismos marinos tienen tiempo para adaptarse a las nuevas condiciones medioambientales; sin embargo, cuando el CO<sub>2</sub> aumenta bruscamente, los efectos de la acidificación se intensifican en las aguas poco profundas debido a la falta de mezcla y la vida marina, base de la cadena trófica, no tiene tiempo de adaptarse (Veron, 2008).

Además, los registros geológicos nos indican que, desde hace 800.000 años, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha variado entre 170 y 280 ppm, y que la temperatura media del planeta es alta cuando hay mucho CO<sub>2</sub> en la atmósfera y baja cuando hay poco; la química y la física indican que debe ser así (Fourier, 1824, 1827; Tyndall, 1861; Arrhenius, 1896). Y, finalmente, sabemos que nunca en la historia del planeta se ha producido un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico tan intenso y, sobre todo, tan rápido como el actual, en el que hemos pasado de 280 ppm en 1880 a, tal como recoge el observatorio de Mauna Loa (Hawái, EE. UU.), estación de referencia mundial en esta materia, 424 ppm en mayo de 2023: ¡un increíble incremento de 144 ppm en 143 años!

Este aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico está provocando un calentamiento global que ha supuesto un incremento de la temperatura media del Polo Norte de más de 7 °C en los últimos 50 años, con una reducción del hielo ártico estival de más del 50% de su superficie y de más del 80% de su volumen. Desde principios del siglo XX la temperatura media global ha aumentado alrededor de 1,2 °C, de los cuales más de tres cuartas partes se han producido desde 1980 y una cuarta parte, el 25%, ¡en tan solo tres años!, de 2014 a 2016 (Yin, Overpeck, Peyser y Stouffer, 2018); y aunque desde 1971 el 90% del incremento energético se ha almacenado en los océanos, cada una de las últimas cuatro décadas ha sido sucesivamente más cálida en la superficie terrestre que cualquier otra década precedente desde 1850 (IPCC, 2014, 2023).

El conocimiento científico sobre el clima ha ido en aumento, y su comprensión ha mejorado profundamente desde su sistematización por el *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático* (IPCC) a partir de su creación por la ONU en 1988. En su cuarta evaluación de la literatura científica pertinente, el IPCC (2007) informó de que la mayor parte del calentamiento que el planeta experimenta estaba siendo causada por las crecientes concentraciones de GEI producidos por las actividades humanas con una probabilidad mayor del 90%. Confirmando estos hallazgos, en su quinto informe de evaluación (AR5), en 2014, afirmó que el mayor impulsor del calentamiento global son las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo, con la consecuente deforestación asociada. Su informe de 2014, AR5, declara (IPCC, 2014):

*Se ha detectado la influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y el océano, en cambios en el ciclo global del agua, en reducciones en nieve y hielo, en ascenso de la media global del nivel del mar y cambios en algunos climas extremos. Esta evidencia de la influencia humana ha crecido desde AR4. Es extremadamente probable (95-100%) que la influencia humana sea la causa dominante del calentamiento observado desde la mitad del siglo XX.*

Del *Resumen para responsables de política* del IPCC (2014) se desprenden los siguientes hallazgos:

- El calentamiento es inequívoco, antropogénico con una probabilidad mayor del 95%, y los cambios observados no tienen precedentes desde hace milenios.
- Entre 1983 y 2012 se produjo el período más cálido de los últimos 1.400 años.
- El 90% del calentamiento total producido entre 1971 y 2010 se encuentra en los océanos.
- Se está produciendo una disminución del volumen de hielo continental y una reducción de la superficie del hielo marino, y acelerando el ritmo de aumento del nivel del mar y de acidificación de los océanos.
- La temperatura media global de finales del siglo XXI será entre 2 °C/3 °C y 6 °C mayor que la actual.

- Debemos esperar un incremento del nivel y de la acidificación de los océanos, cambios en las corrientes marinas y radicalización de los fenómenos meteorológicos extremos.
- Las consecuencias del cambio climático persistirán durante muchos siglos incluso aunque detuviésemos completamente las emisiones de CO<sub>2</sub> en este momento.

Con bastante retraso y no menos polémica, el IPCC publicó su sexto informe de evaluación (AR6) en 2023. El retraso en la publicación del informe ha resultado muy significativo, pues si bien inicialmente los informes de evaluación del organismo público debían tener una periodicidad quinquenal, mientras el AR5 se publicó con un retraso de 2 años, el AR6 se ha demorado casi 4 sobre su fecha prevista. La polémica que ha acompañado su publicación se ha derivado de sendas filtraciones de los borradores de los informes parciales del Grupo II (*Impactos, adaptación y vulnerabilidad relacionados con el cambio climático*) y del Grupo III (*Mitigación del cambio climático*); estas filtraciones obedecen sin duda a la preocupación de una buena parte del colectivo científico tras los informes, no solo por la evidente y manifiesta gravedad de la situación y de la evolución climática que este sexto informe de evaluación describe (IPCC, 2023), sino, fundamentalmente, por la tibieza de algunas de las conclusiones de los sucesivos informes y por la manifiesta dificultad de plasmar en políticas las medidas propuestas (Bordera y Prieto, 2021), y, adicionalmente, por el intento de dilución del informe por los *lobbies* empresariales (Bordera *et al.*, 2022), proceso de *suavizado* que finalmente se ha materializado en el *Resumen para responsables de política* de este AR6 (IPCC, 2023).

Mientras que la situación que describe el AR6 resulta aterradora, las previsiones que realiza nos sumen prácticamente en la incertidumbre (IPCC, 2023):

- El crecimiento del consumo de energía y materiales es la causa principal del incremento de GEI; el ligero desacoplamiento parcial observado del crecimiento respecto al uso de energía (motivado en gran medida por la deslocalización de la producción) no ha contrarrestado el efecto del crecimiento económico y poblacional global.
- El 10% más rico de la población mundial emite diez veces más que el 10% más pobre.
- El calentamiento global asociado a los distintos escenarios de emisiones oscila entre menos de 1,5 °C y más de 5 °C para 2100 en comparación con los niveles preindustriales; los escenarios de referencia sin nuevas políticas climáticas conducirían a un calentamiento global medio de entre 3,3 °C y 5,4 °C sobre los niveles preindustriales.
- Sería necesario que las emisiones de CO<sub>2</sub> llegaran a su máximo antes de 2025 y que llegaran al cero neto a partir de 2050, para lo que, entre otras medidas, no habría que construir ninguna nueva planta de carbón o gas, y las actuales deberían reducir su vida útil.
- El desarrollo tecnológico implementado hasta ahora a nivel global no es suficiente para alcanzar los objetivos climáticos ni de desarrollo; a pesar de la espectacular reducción de los costes de las tecnologías renovables desde 2010, las energías solar y eólica representan tan solo el 7% del suministro eléctrico; los avances esperados en otras tecnologías como la captura y secuestro de carbono o la energía nuclear resultan poco esperanzadores.
- Se confía en la transición al vehículo eléctrico como modelo de movilidad, pero se reconoce el riesgo de falta de materiales críticos para su desarrollo y extensión, que se fía al reciclaje.

Finalmente, en términos estrictamente socioeconómicos, la investigación más reciente evidencia que son atribuibles al cambio climático 143.000 millones de dólares al año de los costes de los fenómenos extremos (Newman y Noy, 2023), cantidad ingente que, si bien de momento *solo* representa un escaso 0,15% del PIB mundial en dólares corrientes de 2021, tiende a crecer exponencialmente y sugiere que las estimaciones frecuentemente citadas de los costes económicos del cambio climático obtenidas mediante el uso de los *Modelos de Evaluación Integrados* (IAM, por sus siglas en inglés) (Nordhaus y Boyer, 1999; Nordhaus, 2017) están sustancialmente subestimadas.

Como podemos ver, la evidencia tampoco deja lugar a duda en cuanto a los costes climáticos del crecimiento socioeconómico: desde el fin de la última glaciación, durante los últimos 9.000 años, hemos gozado de una relativa estabilidad climática que ha permitido la agricultura e impulsado nuestro desarrollo, pero grandes sequías, grandes inundaciones, cada vez mayores contrastes de temperatura en menores plazos de tiempo y aumento de la temperatura media, con efectos sobre especies vegetales y animales de todo tipo, es lo que espera al mundo en el siglo XXI (Ripple *et al.*, 2020, 2021, 2023). Como también nos esperan guerras climáticas, algunas de las cuales, como el permanente e irresoluble conflicto en Sudán, o la devastación en la que se encuentra sumida Siria, entre otros, ya se han iniciado (Welzer, 2011).

Con todo, no hemos alcanzado el crecimiento actual sin una costosa contrapartida, y en los últimos cinco siglos hemos acabado con la mitad de los bosques del planeta, que desaparecen a un ritmo neto superior al 1% anual. Para satisfacer nuestras necesidades agrícolas, ganaderas, residenciales e industriales, consumimos 5.000 de los 9.000 Km<sup>3</sup> de agua dulce accesibles que existen en el planeta; estamos agotando los acuíferos subterráneos a ritmos muy superiores a los de reposición, y hemos envenenado y obstruido los grandes ríos del planeta, que transcurren casi biológicamente muertos, y canalizado y secado muchos de los medianos y pequeños. Los desiertos crecen debido al impacto de nuestras actividades: hemos ocupado el 10% de la superficie de todos los continentes para cultivos agrícolas, para alimentación humana y animal; salinizamos y agotamos la capa fértil de la tierra arrojando millones de toneladas de productos fertilizantes de síntesis y pesticidas. Agotamos las pesquerías fluviales y marinas, y reducimos la biodiversidad con monocultivos y arrasando áreas vírgenes. Hemos envenenado y seguimos envenenando el agua del mar, arrojando toda suerte de residuos, especialmente nitratos, nitritos y plásticos. Lanzamos unos 30.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera cada año, pero, además, también enormes cantidades de metano (CH<sub>4</sub>), cuya molécula resulta 21 veces más potente como gas de efecto invernadero que la de CO<sub>2</sub>; y millones de toneladas de gases en forma de óxidos nitrosos y nítricos, y anhídridos sulfurosos, que provocan lluvia ácida; emitimos también gases clorofluorocarbonados y, al quemar nuestros cada vez más voluminosos residuos, emitimos los muy venenosos furanos y dioxinas.

Evidentemente, la trayectoria de crecimiento que hemos seguido es manifiestamente imposible en adelante: en términos físicos, un crecimiento continuo de la energía a una tasa media interanual de un 2% llevaría a la Tierra a alcanzar temperaturas de ebullición en 400 años, no debido al CO<sub>2</sub>, sino simplemente a la mera termodinámica del calor residual (Murphy, 2011, 2022); y mantener una tasa de crecimiento similar en la extracción de minerales nos conduciría a una extracción 10.000 veces superior a la actual en los mismos 400 años (Murphy, 2021, 2022). El crecimiento exponencial indefinido en cualquier medida física es incompatible con un planeta finito que tiene una herencia finita y una capacidad de carga limitada. La función exponencial es una realidad cruel e innegociable, y sus consecuencias no pueden persistir durante demasiado tiempo en ningún sistema físico.

### **OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS): LA HISTORIA SE REPITE, PERO EN TONOS DE VERDE**

A medida que los problemas ecológico-ambientales han venido agravándose, la reflexión y los encuentros internacionales han desplazado su centro de interés desde el sistema socioeconómico hacia el clima. Este desplazamiento no es ajeno a la cada vez más evidente dificultad de reconvertir los modos actuales de gestión que inciden sobre el territorio y los recursos planetarios, dificultad que ha inducido a abrazar falsos pragmatismos ingenuamente orientados a corregir los efectos, el cambio climático, sin preocuparse de atajar las causas, la dinámica socioeconómica (Naredo y Gutiérrez, 2005).

En este sentido, los ODS suponen repetir la historia: una declaración de buenas intenciones que, parasitada y contaminada por la lógica del crecimiento exponencial, continúa en la dinámica de desviar la atención hacia los efectos sin preocuparse de las causas. Es el último intento pragmático de cambiarlo todo para que, finalmente, nada cambie, pero en esta ocasión pintando *en tonos de verde* la tecnología, la eficiencia y el desacoplamiento material de la economía, y las energías renovables. ¿Será posible...?

## Tecnología

Si, a pesar de lo disperso y fragmentado del conocimiento científico y de la tecnología en nuestro mundo globalizado actual, en algo parece existir un consenso generalizado, es en el hecho de que la tecnología está avanzando de manera exponencial y de que tal avance continuará imperturbable en el futuro. El supuesto básico tras esta perspectiva es que, o bien no hay límite al avance tecnológico, o, si hay un límite, estamos muy lejos de él.

Sin embargo, si bien es cierto que la tecnología ha crecido exponencialmente al menos desde la Edad Media, la realidad física y los hechos económicos vienen a contradecir el aparente consenso sobre su evolución futura.

En este sentido apuntan las declaraciones en *Financial Times* del profesor de la Universidad de Manchester, y ganador del Nobel 2010 en Física por su descubrimiento del grafeno, Andre Geim (2013), cuando nos alerta de que «temamos, temamos mucho, la crisis tecnológica» en que nos hemos ido sumiendo durante las últimas décadas. Con motivo de la celebración del *Foro Económico Mundial* de 2012 en Davos, Geim describe cómo la creciente mercantilización del conocimiento científico y la búsqueda del beneficio rápido en detrimento de la investigación científica pura, o de base, durante las últimas décadas nos ha llevado a una reducción alarmante, y de tremendas implicaciones, de la tasa mundial de descubrimientos científicos. Y tales razones y argumentos no son nuevos...

En 2005, en uno de los estudios de mayor alcance sobre la evolución mundial de la tecnología, publicado en una de las principales revistas académicas mundiales del área de *management*, y sorprendentemente poco divulgado, Jonathan Huebner (2005), un científico independiente, muestra, mediante el ajuste matemático de los datos histórico-científicos de innovación, que la tasa de innovación tecnológica radical, aquella con un amplio impacto socioeconómico y capaz de producir hitos en el desarrollo y el progreso de la humanidad, tuvo su *pico* en 1873 [sic], año desde el cual dicha tasa mundial de innovación radical no ha parado de declinar.

De ser ciertos y consistentes, como parecen, estos resultados, que han tratado de ser contraargumentados y refutados con bastante poco éxito en numerosas ocasiones desde su publicación, la experiencia e intuición de Geim solo vendría a ratificar una tendencia bastante más pesada que *unas cuantas décadas*.

En esta misma línea se posiciona un número creciente de científicos e intelectuales que se aproximan, cada vez más, a esta perspectiva de nuestra realidad, llegando incluso a plantear una hipótesis aún más sobrecogedora: no se trata sólo de que la tasa de descubrimiento científico haya disminuido, y sea menor, por tanto, sino que la cantidad absoluta de progreso científico en su conjunto puede bien ser inferior a medida que trascendemos en el tiempo. Es la hipótesis que mantienen y argumentan fundamentadamente el doctor en medicina y profesor de psiquiatría evolutiva en la Universidad de Newcastle, Bruce Charlton (2013), o el analista de sistemas cibernéticos y programador de *software* Anthony Burgoyne (2010), entre otros, además de ofrecernos innumerables claves y pistas sobre cómo hemos llegado a esta situación. Según Charlton, la clave se encuentra, de nuevo, en una mercantilización del conocimiento científico que ha incentivado una *profesionalización* de la ciencia y del trabajo científico, y generado un oportunismo colectivo que ha llevado a convertir en *papel moneda* la publicación de artículos intrascendentes en las revistas académicas, confundiendo colectivamente el verdadero crecimiento del conocimiento y avance científico con una mera expansión de «chismes y cosas sin valor».

Más allá de hipótesis aún pendientes de contraste, en el campo de los desarrollos tecnológicos energéticos la incertidumbre tecnológica, en el mejor de los casos, si no incluso la ralentización del mismo desarrollo tecnológico, en el peor de los casos, ha venido siendo refrendada más recientemente desde la ciencia y desde las más altas instituciones. Así, tras el estudio detallado de las tendencias recientes en los signos vitales planetarios se señala, por un lado, que los desarrollos de las tecnologías energéticas renovables distan mucho de lo que sería necesario para la necesaria transición energética, y, por otra parte, que los avances tecnológicos, a pesar de que pueden contribuir a cierto grado de desacoplamiento material de la economía, a menudo no logran mitigar la huella ecológica general de las actividades económicas (Ripple *et al.*, 2020, 2021, 2023); y la misma ONU, a través del IPCC, evidencia que el desarrollo tecnológico implementado hasta la actualidad a nivel global no es suficiente para alcanzar los objetivos climáticos ni de desarrollo y que los avances esperados en las tecnologías energéticas resultan poco esperanzadores (IPCC, 2023).

Mientras tanto, a pesar del largo camino de progreso recorrido, seguimos sin encontrar respuesta a las mismas fundamentales cuestiones que en este terreno nos planteábamos hace más de 70 años (Weaver, 1948); y, en el mejor de los casos, la evidencia introduce una fuerte incertidumbre respecto de la magnitud y el signo de nuestra capacidad tecnológica futura, más aún si consideramos un escenario de energía neta disponible menguante. La creatividad humana bien puede ser infinita, sí; pero la innovación, fuente de toda tecnología, requiere sin duda de una base material sobre la que sustentarse y construirse.

### Desacoplamiento material de la economía por la vía de la eficiencia

La abundante y reciente literatura científica sobre esta cuestión muestra una evidencia abrumadora: aunque un incremento significativo de la eficiencia es posible, el crecimiento del sistema socioeconómico no puede ser desacoplado en términos absolutos del crecimiento en el uso de la energía, en las emisiones de GEI y en la extracción de materiales, porque la eficiencia, simplemente, adolece de límites físicos.

En cuanto a la energía y las emisiones de GEI, se vienen publicando diferentes artículos e informes que presentan y analizan los casos aislados de algunos países o territorios, típicamente Estados Unidos y la Unión Europea, cuyos datos muestran que, en los últimos años, estas economías han conseguido incrementar su PIB al tiempo que han reducido significativamente su consumo energético y, consecuentemente, sus emisiones de GEI; pero lo que estos estudios no muestran es el efecto de las magníficas deslocalizaciones industriales sufridas en estas economías, que importan la mayor parte de los productos manufacturados que utilizan y consumen, y, muy sibilinaamente, recurren a la *trampa* contable de no computar el consecuente consumo de energía, y sus emisiones relacionadas, embebidos en sus importaciones y, lógicamente, realizados en los países exportadores, fundamentalmente los eufemísticamente denominados *países en vías de desarrollo*. Pero cuando las cuentas se hacen correctamente y en términos globales, un mayor crecimiento implica un mayor consumo de energía y mayores emisiones, y un mayor uso de energía dificulta la cobertura de esa demanda con energías renovables; y los únicos escenarios que logran reducir las emisiones lo suficientemente rápido como para mantenernos por debajo de los objetivos globales de 1.5 °C o 2 °C de aumento máximo de la temperatura media global con respecto a los registros preindustriales implican necesariamente una reducción del uso de energía y recursos (D'Alessandro, Cieplinski, Distefano y Dittmer, 2020; Haberl *et al.*, 2020; Keyßer y Lenzen, 2021; Ripple *et al.*, 2023).

En relación con los recursos, la evidencia muestra que, a pesar de las mejoras en la eficiencia y de una importante traslación hacia los servicios en las *economías desarrolladas*, su extracción sigue aumentando correlativamente con el aumento del PIB (Ripple *et al.*, 2020, 2021, 2023), y todos los modelos existentes indican que es poco probable que se produzca un desacoplamiento en términos absolutos, incluso en condiciones de políticas estrictas (Schandl *et al.*, 2016; Ward *et al.*, 2016; D'Alessandro, Cieplinski, Distefano y Dittmer, 2020; Haberl *et al.*, 2020; Vadén *et al.*, 2020a, 2020b).

Ward *et al.* (2016) muestran que ni siquiera las proyecciones más optimistas de mejora en la eficiencia permiten un desacoplamiento absoluto a medio ni largo plazo, y sostienen que «tal resultado es una sólida refutación de la afirmación del desacoplamiento absoluto, porque las ganancias de eficiencia se rigen en última instancia por límites físicos»; mientras que, en la proyección de su mejor escenario, Schandl *et al.* (2016) muestran cómo el consumo mundial de recursos sigue creciendo de forma constante, alcanzando la misma conclusión. Por su parte, los extensos metaanálisis más recientes llegan a las mismas conclusiones (Haberl *et al.*, 2020; Vadén *et al.*, 2020b).

### Energías renovables

Las energías denominadas renovables, fundamentalmente eólica y fotovoltaica, que se prometen como garantía de una energía futura inocua y prácticamente ilimitada, adolecen en realidad de serios límites físicos que las comprometen para sustituir de forma viable la energía que obtenemos de las fuentes fósiles. Entre sus principales límites merecen ser destacados, entre otros, el máximo potencial de la eólica, la tasa de rentabilidad energética (TRE) de la fotovoltaica, su producción energética eminentemente eléctrica, su base como mera extensión de los combustibles fósiles, las limitaciones de los materiales críticos necesarios para su desarrollo, y la vida útil de las instalaciones y su reemplazo.

Considerando la conservación del balance energético de la Tierra, primer principio de la termodinámica, que impone una disipación de la energía del viento en los primeros 200 m de la atmósfera equivalente a 100 Tw de potencia media —la denominada *capa límite atmosférica*—, y una vez consideradas las restricciones de accesibilidad, la disposición de los aerogeneradores, el uso exclusivo de las zonas de Clase 3 o superior (porque las de Clase 1 y 2 son antieconómicas), el factor de carga y el factor de conversión, De Castro, Mediavilla, Miguel y Frechoso (2011) llegan al desolador resultado de que el máximo potencial eólico posible equivale a 1 Tw de potencia media equivalente; mientras que el consumo global anual de energía ronda los 14 Tw de potencia media. Y, aunque ha pasado más de una década desde el estudio de De Castro, Mediavilla, Miguel y Frechoso (2011), la evidencia más actual indica que, si bien el desarrollo tecnológico puede aumentar el potencial eólico más allá de 1 Tw, es muy poco probable, y menos plausible aún, que el incremento llegue a un orden de magnitud superior (IEA, 2023).

Por otra parte, en su estudio integral de la TRE de sistemas fotovoltaicos solares a gran escala en un país desarrollado, basado en datos reales en lugar de aproximaciones y extrapolaciones de laboratorio, que describe la dependencia de la energía fotovoltaica de los bienes y servicios provenientes de los combustibles fósiles, y con implicaciones globales para el potencial de la energía fotovoltaica en el reemplazo de las fuentes fósiles, Prieto y Hall (2013) estiman que la TRE de la energía fotovoltaica rondaría 2,4; mientras que las diferentes estimaciones para los mejores campos petrolíferos disponibles en la actualidad ofrecen una TRE de entre 20 y 25 (Hall, Lambert y Balogh, 2014); las estimaciones para la energía eólica (aun considerando las limitaciones de su máximo potencial) brindan una TRE en torno a 18 (Hall, Lambert y Balogh, 2014); y para el progreso de una sociedad industrial compleja como la actual se estiman necesarias fuentes energéticas con TRE superiores a 10-14 (Tainter, 1988; Hall, Balogh y Murphy, 2009; Brandt, 2017; Capellán-Pérez, de Castro y González, 2019; Rowlands, 2021).

Además, aparte de la biomasa, todos los sistemas renovables se dedican a producir electricidad, un vector energético, no una fuente energética. Pero las energías fósiles no se usan mayoritariamente para producir electricidad; esta, la electricidad, representa apenas el 21% del consumo de energía final en los países avanzados, y parece bastante difícil, al menos con la suficiente rapidez como para reducir las emisiones y mantener los niveles actuales de actividad y crecimiento económicos, electrificar ese 79% restante de usos no eléctricos de las fuentes fósiles: los derivados del petróleo, como el gasóleo, son el principal combustible para la minería, para la logística marítima global, para la logística global por carretera e incluso para buena parte de la logística ferroviaria global, y prácticamente insustituibles en la logística aérea global; la producción de acero y otros metales requiere calentar el hierro de forma constante e ininterrumpida a unos 1.250 °C, lo que no resulta económicamente viable con energía eléctrica, ni permiten las fluctuaciones o cortes de energía debidos a la intermitencia propia de las renovables. Por las mismas razones, las energías renovables constituyen una mera extensión de las energías fósiles, pues ¿cómo construir los complejos sistemas industriales renovables con energía renovable, esto es, tan solo con electricidad?

Adicionalmente, el despliegue renovable que se pretende requiere de una gran cantidad de materiales críticos, cuya escasez es ya hace tiempo extensamente reconocida; tanto que, a la evidencia desde la academia (Valero, 2008) y la industria (Diederer, 2009) ya expuesta, se suma nueva evidencia desde el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid (GEEDS) (Capellán-Pérez, de Castro y González, 2019; Pulido-Sanchez *et al.*, 2021), e, incluso, recientemente desde instituciones del más alto nivel, como la misma IEA (2021a, 2021b, 2022, 2023) o el Instituto Geológico de Finlandia (Michaux, 2021). Así, el GEEDS muestra que no se puede mantener el actual modelo socioeconómico y de movilidad basándose en fuentes renovables y vehículos eléctricos. Y mientras que, debido a la ya tangible escasez de minerales críticos, desde el Instituto Geológico de Finlandia se cuestiona ampliamente la viabilidad del despliegue renovable propuesto si no se revisan los supuestos de crecimiento económico; en su *Informe Especial*, la IEA estima que, de aquí a 2040, la demanda de litio debe multiplicarse por 42, la de grafito por 25, la de cobalto por 21, la de níquel por 19 y la de tierras raras por 7 como consecuencia del despliegue renovable previsto, y, entre sus 6 recomendaciones, urge a los países de la OCDE a «constituir reservas estratégicas para hacer frente a posibles interrupciones del suministro» (IEA, 2021a).

Finalmente, considerando una vida útil estándar de las instalaciones renovables de entre 25 y 30 años, en el mejor de los casos, la dispersión de los materiales que impone su diseño, y las limitaciones al reciclaje derivadas

del segundo principio de la termodinámica, la *ley de la entropía*, ¿será posible su reemplazo a tenor de que, en la actualidad, las exóticas y monstruosas palas de los aerogeneradores no se pueden reciclar y acaban contaminando suelos y acuíferos al amontonarse o enterrarse en los vertederos (Martin, 2020)?

Las energías erróneamente denominadas renovables son en realidad sistemas industriales complejos para la captación de energía renovable que, basados en un sinfín de materiales no renovables, adolecen de importantes e insoslayables límites físicos y técnicos que los inhabilitan para sustituir completamente el consumo actual de las fuentes fósiles, en particular el petróleo; y, si no interiorizamos esta realidad física, corremos el riesgo de convertir la apuesta renovable en el último intento de mantener el negocio de la economía del crecimiento, como ya está sucediendo con los planes para la *Transición Ecológica* tanto en la Unión Europea, al amparo de los ODS, como en Estados Unidos, mientras China construye y activa centrales de carbón a un ritmo exponencial.

Ahora bien, aunque podemos soñar que damos con una tecnología que nos permita la disposición y expansión energética de manera prácticamente ilimitada, como podría ser el caso de la fusión nuclear, de momento aún en el terreno de la ciencia ficción, pronto nos encontraremos de nuevo con las leyes físicas, en concreto las de la termodinámica, como límite a una energía a escala galáctica (Murphy, 2011, 2022).

## CONCLUSIÓN

La microeconomía establece una identidad bien conocida, incluso intuitivamente, por cualquier empresario o directivo. Según esta *regla de oro* microeconómica, en competencia perfecta, el beneficio máximo, o el límite del crecimiento de la producción, en cualquier unidad organizativa o empresarial, se alcanza con el nivel de producción que iguala el coste marginal (el coste de producir la última unidad) al ingreso marginal (el precio de venta de la última unidad producida); de esta forma, el crecimiento de la producción deja de tener sentido económico a partir del punto en el que una unidad adicional cuesta más que lo que se puede ingresar por ella. Sin embargo, aunque los costes del crecimiento global del sistema socioeconómico, son, como hemos revisado y expuesto, cada vez mayores en términos energéticos, ecológicos y climáticos, en fin, en términos de degradación de la biosfera, paradójicamente no disponemos de ninguna identidad similar en la macroeconomía, en términos agregados; y no solo es que no dispongamos de ella, cuando la misma *regla de oro* microeconómica resulta tan evidente e intuitiva en términos agregados, sino que los mismos empresarios y directivos que reconocen sin problemas la regla en el nivel microeconómico tienen verdaderas dificultades y reticencias para apreciarla en el nivel macroeconómico.

Pero la realidad de nuestro sistema socioeconómico dista mucho del ideal de la competencia perfecta, y el reconocimiento de la imposibilidad de un crecimiento económico indefinidamente sostenido, en virtud de los límites físicos del ecosistema en el que opera la economía —la biosfera—, choca frontalmente con la representación del sistema socioeconómico como una esfera aislada del entorno que alimenta la ideología económica dominante. Una representación que impide la comprensión de las interdependencias y lleva a asumir como principio guía de la política económica el incremento del PIB, y como principio guía de la gestión la continua maximización del beneficio empresarial. Tal conflicto queda perfectamente reflejado en la famosa frase de Kenneth Boulding: “Quien crea que el crecimiento exponencial puede durar eternamente en un mundo finito, o es un loco o es un economista” (United States Congress House, 1973; 248).

Tal reduccionismo economicista se solapa con la profusión de *cumbres* y la creación de administraciones y programas *ambientales*, como los mismos ODS y las políticas para la *Transición Ecológica* en las que tratan de concretarse, ajenos al mínimo principio de precaución, si no directamente basados en un tecnooptimismo infundado, sin ningún planteamiento sobre el incuestionado e incuestionable núcleo duro del paradigma socioeconómico dominante, el crecimiento exponencial.

De esta forma, nuestro sistema socioeconómico capitalista, gobernado por la visión neoclásica de la economía, del mundo y de su funcionamiento, que constituye la corriente de pensamiento económico principal, el paradigma dominante, adolece de inconsistencias y limitaciones fundamentales que impiden explicar y comprender satisfactoriamente la compleja realidad de su funcionamiento; y mucho más aún impiden adoptar deci-

siones acordes con la realidad para afrontar eficiente y eficazmente los formidables retos a los que, como hemos expuesto, nos enfrentamos.

Consecuentemente, desde una perspectiva transdisciplinar y global, somos prácticamente los últimos en llegar, y los que más y más rápido estamos modificando nuestro entorno, nuestro planeta. Tanto que los científicos de las disciplinas con más tradición y consolidación han pasado de alertarnos desde los años 70 del siglo pasado sobre los límites del crecimiento en un planeta finito (Meadows, Meadows, Randers y Behrens III, 1972), a anunciarnos a principios de este siglo XXI la inminencia del colapso socioeconómico (Turner, 2014) e incluso ecológico global (Barnosky *et al.*, 2012), y que la única alternativa lógica pasa por asumir que seguir creciendo sin mayores costes, sin causar más daños, resulta imposible y, en consecuencia, habría que planificar cuanto antes una estabilización y un decrecimiento de la esfera material (Keyßer y Lenzen, 2021). Y con todo y con ello, tras medio millón de años de progreso y desarrollo humano entre luces y sombras, en un mundo donde el ser humano ha alcanzado las mayores cotas de riqueza de su historia, ni hemos acabado con el hambre ni hemos conseguido reducir la desigualdad (UNDP, 2014), que se ha disparado en los últimos años hasta los niveles más altos de nuestra historia bien a pesar de la evolución en la complejidad y generalización de los programas institucionales de medida, apoyo y fomento del desarrollo (Morgan y Bach, 2018).

Como sabemos por la historia y la arqueología, civilizaciones previas más pequeñas y locales, pero también complejas, ya colapsaron (Tainter, 1988), por lo que recordar la historia con nueva luz (Graeber y Wengrow, 2021) puede proporcionar lecciones sobre las acciones necesarias para evitar lo peor de lo que está por venir; aunque dicen que el ser humano es el único animal que tropieza dos veces con la misma piedra.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

El autor de este artículo declara no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

José Anastasio Urra Urbieto: Conceptualización, Investigación, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

## REFERENCIAS

- Almenar, Ricardo (2012). *El fin de la expansión. Del mundo-oceano sin límites al mundo-isla*. Barcelona: Icaria.
- Arrhenius, Svante (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine*, 41, 237-276. <http://dx.doi.org/10.1080/14786449608620846>
- Banerjee, Subhabrata B. (2008). Necrocapitalism. *Organization Studies*, 29(12), 1541-1563. <https://doi.org/10.1177/0170840607096386>
- Barnosky, Anthony D. *et al.* (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature*, 486, 52-58. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- Bordera, Juan y Prieto, Fernando (2021). El IPCC considera que el decrecimiento es clave para mitigar el cambio climático. *ctxt Contexto y Acción*, 275. Disponible en: <https://ctxt.es/es/20210801/Politica/36900/IPCC-cambio-climatico-colapso-medioambiental-decrecimiento.htm>
- Bordera, Juan *et al.* (2022). Sobre cómo los 'lobbies' diluyen el informe climático más importante del mundo. *ctxt Contexto y Acción*, 283. Disponible en: <https://ctxt.es/es/20220401/Firmas/39348/ipcc-juan-bordera-cambio-climatico-combustibles-fosiles-decrecimiento.htm>
- Brandt, Adam R. (2017). How does energy resource depletion affect prosperity? Mathematics of a minimum energy return on investment (EROI). *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2. <https://doi.org/10.1007/s41247-017-0019-y>
- Burgoyne, Anthony (2010). Charlton and the Scientific Bubble. *Philosophy of Science*. Disponible en: <http://anthonyburgoyne.com/2010/07/08/charlton-and-the-scientific-bubble/>
- Campbell, Colin. J. y Laherrère, Jean H. (1998). The end of cheap oil. *Scientific American*, 278(3), 78-83. <http://www.jstor.org/stable/26057708>
- Capellán-Pérez, Iñigo *et al.* (2014). Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach. *Energy*, 77(1), 641-666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.063>
- Capellán-Pérez, Iñigo; de Castro, Carlos y González, Luis J. M. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, 26(7). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Charlton, Bruce (7 de julio de 2010). Growth and the expectation of growth in scientific knowledge. *Bruce Charlton's Notions*.

- Disponible en: <http://charlonteaching.blogspot.com/2010/07/growth-and-expectation-of-growth-in.html>
- Cleveland, Cutler J.; Constanza, Robert; Hall, Charles A. S. y Kaufmann, Robert (1984). Energy and the US economy: A biophysical perspective. *Science*, 225(4665), 890–897. <https://doi.org/10.1126/science.225.4665.890>
- D'Alessandro, Simone; Cieplinski, André; Distefano, Tiziano y Dittmer, Kristofer (2020). Feasible alternatives to green growth. *Nature Sustainability*, 3, 329–335. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0484-y>
- DeLong, Bradford J. (2022). *Slouching Towards Utopia: An Economic History of the Twentieth Century*. New York: Basic Books.
- De Castro, Carlos; Mediavilla, Margarita; Miguel, Luis Javier y Frechoso, Fernando (2011). Global wind power potential: Physical and technological limits. *Energy Policy*, 39(10), 6677–6682. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.027>
- Diederer, André M. (2009). Metal minerals scarcity: A call for managed austerity and the elements of hope. *TNO Defence, Security and Safety*. Disponible en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9fe525ac-3ca2-4bef-95e2-279baaa5f055>
- Ecologistas en Acción (2021). Los conceptos que nos moldean. Una entrevista con José Manuel Naredo. *Revista Nº 107*. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/163412/los-conceptos-que-nos-moldean-una-entrevista-con-jose-manuel-naredo/>
- EIA (2008). *Annual Energy Outlook 2008. With Projections to 2030*. Washington DC: EIA. Disponible en: [https://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0806\\_EIA\\_-\\_Annual\\_Energy\\_Outlook\\_2008.pdf](https://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0806_EIA_-_Annual_Energy_Outlook_2008.pdf)
- EIA (2021). *Annual Energy Outlook 2021*. Washington DC: EIA.
- Fernández, Ramón y González, Luis (2018). *En la espiral de la energía, 2ª ed.* Madrid: Libros en Acción.
- Fourier, Jean-Baptiste Joseph (1824). Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*, 27, 136–167.
- Fourier, Jean-Baptiste Joseph (1827). Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 7, 569–604.
- García-Olivares, Antonio (2016). Energy for a sustainable post-carbon society. *Scientia Marina*, 80(S1), 257–268. <https://doi.org/10.3989/scimar.04295.12A>
- García-Olivares, Antonio y Ballabrera-Poy, Joaquim (2015). Energy and mineral peaks, and a future steady state economy. *Technological Forecasting & Social Change*, 90 B, 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.02.013>
- Geim, Andre (5 de febrero de 2013). Be afraid, very afraid, of the tech crises. *Financial Times*. Disponible en: <https://www.ft.com/content/ad8e9df0-6faa-11e2-956b-00144feab49a>
- Graeber, David y Wengrow, David (2021). *The Dawn of Everything: A New History of Humanity*. London: Penguin Books.
- Haberl, Helmut 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*, 15(6). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab842a>
- Hall, Charles A. S. et al. (2001). The Need to Reintegrate the Natural Sciences with Economics. *BioScience*, 51(8), 663–673. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051%5b0663:TNTRTN%5d2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051%5b0663:TNTRTN%5d2.0.CO;2)
- Hall, Charles A. S.; Balogh, Stephen y Murphy, David J. R. (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*, 2(1), 25–47. <https://doi.org/10.3390/en20100025>
- Hall, Charles A. S.; Lambert, Jessica G. y Balogh, Stephen (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>
- Hamilton, James D. (2009). Causes and Consequences of the Oil Shock of 2007–08. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1, 215–283. Disponible en: <https://www.brookings.edu/bpea-articles/causes-and-consequences-of-the-oil-shock-of-2007-08/>
- Hubbert, Marion K. (1956). Nuclear Energy and The Fossil Fuels. *Shell Development Company, Exploration and Production Research Division*, 95. Houston.
- Huebner, Jonathan (2005). A possible declining trend for worldwide innovation. *Technological Forecasting & Social Change*, 72(8), 980–986. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.01.003>
- IEA (2010). *World Energy Outlook 2010*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010>
- IEA (2013). *World Energy Outlook 2013*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2013>
- IEA (2018). *World Energy Outlook 2018*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- IEA (2020). *World Energy Outlook 2020*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IEA (2021a). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA (2021b). *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- IEA (2022). *World Energy Outlook 2022*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- IEA (2023). *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- ILO, Walk Free y IOM (2022). *Global Estimates of Modern Slavery: Forced Labour and Forced Marriage*. International Labour Organization, Walk Free y International Organization for Migration. Geneva. Disponible en: <https://www.ilo.org/publications/major-publications/global-estimates-modern-slavery-forced-labour-and-forced-marriage>
- IPCC (2007). *AR4 Synthesis Report: Climate Change 2007*. Geneva: IPCC. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- IPCC (2014). *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. Geneva: IPCC. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC (2023). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Geneva: IPCC. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Keyßer, Lorenz T. y Lenzen, Manfred (2021). 1.5°C degrowth scenarios suggest the need for new mitigation pathways. *Nature Communications*, 12, 2676. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22884-9>

- Martin, Chris (5 de febrero de 2020). Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills. *Bloomberg Green*. Disponible en: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>
- Meadows, Donella H.; Meadows, Dennis L.; Randers, Jørgen y 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.; Randers, Jørgen y Meadows, Dennis L. (1992). *Más allá de los límites del crecimiento*. Madrid: El País - Aguilar.
- Meadows, Donella H.; Randers, Jørgen y Meadows, Dennis L. (2006). *Los límites del crecimiento 30 años después*. Barcelona: Galaxia Gutenberg - Círculo de Lectores.
- Michaux, Simon P. (2021). The Mining of Minerals and the Limits to Growth. *Geological Survey of Finland - GTK*. Disponible en: [https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/16\\_2021.pdf](https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/16_2021.pdf)
- Morgan, Mary S. y Bach, Maria (2018). Measuring Development – from the UN's perspective. *History of Political Economy*, 50, 193-210. <https://doi.org/10.1215/00182702-7033932>
- Murphy, Thomas W. (12 de julio de 2011). Galactic-Scale Energy. *Do the Math*. Disponible en: <https://dothemath.ucsd.edu/2011/07/galactic-scale-energy/>
- Murphy, Thomas W. (18 de mayo de 2021). Why Worry About Collapse? *Do the Math*. Disponible en: <https://dothemath.ucsd.edu/2021/05/why-worry-about-collapse/>
- Murphy, Thomas W. (2022). Limits to economic growth. *Nature Physics*, 18, 844-847. <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01652-6>
- Murray, James y King, David (2012). Oil's tipping point has passed. *Nature*, 481, 433-435. <https://doi.org/10.1038/481433a>
- Naredo, José Manuel (1996). Sobre el origen, el uso y el contenido del término 'sostenible'. *Documentación Social*, 102, 129-148.
- Naredo, José Manuel (2015). *Raíces económicas del deterioro ecológico y social. Más allá de los dogmas*. Madrid: Siglo XXI de España.
- Naredo, José Manuel y Gutiérrez, Andrés (Eds.) (2005). *La incidencia de la especie humana sobre la faz de la Tierra (1955-2005)*. Granada: Universidad de Granada - Fundación César Manrique.
- Newman, Rebeca y Noy, Ilan (2023). The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. *Nature Communications*, 14, 6103. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41888-1>
- Nordhaus, William y Boyer, Joseph (1999). *Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming*. Massachusetts: MIT Press.
- Nordhaus, William (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114(7), 1518-1523. <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
- ONU - Brundtland Commission (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development, Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press. Disponible en: <https://undocs.org/en/A/42/427>
- Prieto, Pedro A. y Hall, Charles A. S. (2013). *Spain's Photovoltaic Revolution. The Energy Return on Investment*. New York: Springer-Verlag.
- Pulido-Sanchez, Daniel et al. (2021). Analysis of the material requirements of global electrical mobility. *DYNA*, 96(2), 207-213. <https://doi.org/10.6036/9893>
- Reid, Walter V. et al. (2005). *Ecosystems and Human Well-being. Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment, United Nations Organization. Disponible en: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Ripple, William J. et al. (2020). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 70(1), 8-12. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>
- Ripple, William J. et al. (2021). World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2021. *BioScience*, 71(9), 894-898. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab079>
- Ripple, William J. et al. (2023). The 2023 state of the climate report: Entering uncharted territory. *BioScience*, 73(12), 841-850. <https://doi.org/10.1093/biosci/biad080>
- Rowlands, Mark (2021). *World on Fire: Humans, Animals, and the Future of the Planet*. Oxford: Oxford University Press.
- Schandl, Heinz et al. (2016). Decoupling global environmental pressure and economic growth: scenarios for energy use, materials use and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 132, 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.100>
- Steffen, Will et al. (2004). *Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Steffen, Will et al. (2015). The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Tainter, Joseph A. (1988). *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Turner, Graham (2014). Is Global Collapse Imminent? An Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data. *Melbourne Sustainable Society Institute*, Research Paper No. 4. The University of Melbourne. Disponible en: [https://sustainable.unimelb.edu.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/2763500/MSSI-ResearchPaper-4\\_Turner\\_2014.pdf](https://sustainable.unimelb.edu.au/__data/assets/pdf_file/0005/2763500/MSSI-ResearchPaper-4_Turner_2014.pdf)
- Tyndall, John (1861). The Bakerian Lecture: On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 151, 1-36. <http://www.jstor.org/stable/108724>
- United States Congress House (1973). *Energy reorganization act of 1973: Hearings, Ninety-third Congress, first session, on H.R. 11510*. Disponible en: <https://www.govinfo.gov/app/details/CHRG-93hhrg251080/context>
- UNDP (2014). *Human Development Report. Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience*. United Nations Development Program. Disponible en: <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2014>

- UNESCO-WWAP (2003). *Water for People, Water for Life. Executive Summary of the UN World Water Development Report*. Paris: UNESCO. Disponible en: [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/WWDR\\_english\\_129556e.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/WWDR_english_129556e.pdf)
- Vadén, Tere *et al.* (2020a). Raising the bar: on the type, size and timeline of a 'successful' decoupling. *Environmental Politics*, 30(3), 462-476. <https://doi.org/10.1080/09644016.2020.1783951>
- Vadén, Tere *et al.* (2020b). Decoupling for ecological sustainability: A categorization and review of research literature. *Environmental Science & Policy*, 112, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.016>
- Valero, Alicia (2008). *Exergy evolution of the mineral capital on Earth*. Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Centro Politécnico Superior, University of Zaragoza.
- Veron, John Edward Norwood (2008). Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs*, 27, 459-472. <https://doi.org/10.1007/s00338-008-0381-8>
- Wackernagel, Mathis *et al.* (2002). Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Science*, 99(14), 9266-9271. <https://doi.org/10.1073/pnas.142033699>
- Walk Free (2023). *The Global Slavery Index 2023*. Minderoo Foundation. Disponible en: <https://walkfree.org/global-slavery-index>
- Ward, James D. *et al.* (2016). Is Decoupling GDP Growth from Environmental Impact Possible? *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164733>
- Weaver, Warren (1948). Science and complexity. *American Scientist*, 36(4), 536-544.
- Welzer, Harald (2011). *Guerras climáticas. Por qué mataremos (y nos matarán) en el siglo XXI*. Buenos Aires: Katz Editores.
- Worm, Boris *et al.* (2006). Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314(5800), 787-790. <https://doi.org/10.1126/science.1132294>
- Yin, Jianjun; Overpeck, Jonathan; Peysner, Cheryl y Stouffer, Ronald (2018). Big jump of record warm global mean surface temperature in 2014–2016 related to unusually large oceanic heat releases. *Geophysical Research Letters*, 45(2), 1069–1078. <https://doi.org/10.1002/2017GL076500>



2600

José Anastasio Urra Urbieta