

Entropía, economía y sostenibilidad: alguna aclaración conceptual y muchas preguntas

Pablo Aguirre Carmona

Resumen

En este documento se aclaran nociones físicas como la entropía y el segundo principio de la termodinámica, así como su relevancia para el análisis del sistema económico y de la sostenibilidad. Se ofrece también una panorámica estructurada de algunas cuestiones relevantes en materia de sostenibilidad. Se trata de un trabajo exploratorio que pretende ser útil como punto de partida para una investigación más profunda. De la aclaración de conceptos básicos y del repaso de temáticas y dilemas relevantes surge una idea principal: la interrelación entre energía, materiales y desechos es inherente a la naturaleza del sistema económico, en tanto que sistema entrópico que permite organizar la satisfacción de las necesidades de los seres humanos. Pero dicha interrelación no es siempre tenida en los análisis de sostenibilidad, lo cual puede estar limitando el alcance y la utilidad de las conclusiones obtenidas, así como de las recomendaciones que de ellas se deriven.



Imagen de la portada: Equisetum arvense iniciando la colonización de una zona volcánica sin apenas vegetación, en Islandia (fotografía tomada por Pablo Aguirre Carmona)

Introducción

Este documento trata sobre el concepto de entropía y su relación con la economía, concretamente con el ámbito de la sostenibilidad. No es la conclusión de un trabajo, sino más bien una guía para acometerlo de forma orientada, aclarando conceptos básicos y estructurando un conjunto de preguntas relevantes para construir lo que podría llamarse un “mapa preliminar de ignorancia” de quien escribe este texto en materia de sostenibilidad. Un punto de partida, mucho más que de llegada. El texto se divide en 5 epígrafes, tras esta introducción. En el segundo epígrafe se explican,

desde un punto de vista físico, el concepto de entropía y otras cuestiones relacionadas relevantes. En el tercero se justifica la utilidad de los conceptos anteriores para analizar el sistema económico. El cuarto epígrafe se dedica a delimitar el ámbito de estudio de la sostenibilidad. A continuación, el quinto ofrece una relación estructurada de preguntas relevantes en materia de economía y sostenibilidad, con bibliografía sugerida, aunque sin pretensión alguna de exhaustividad. El sexto y último epígrafe ofrece unas ideas finales sobre la temática abordada.

Entropía y cuestiones relacionadas¹

Trabajo mecánico e irreversibilidad

Hay dos conceptos físicos con los que conviene familiarizarse antes de abordar la cuestión de la entropía: el “trabajo mecánico” y la “irreversibilidad”. Y el personaje histórico que los relacionó entre sí, sentando las bases para la posterior definición de entropía, fue Sadi Carnot, un ingeniero francés hijo de Lazare Carnot, revolucionario y amigo personal de Robespierre. Sadi Carnot escribió en 1824 las Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego (Rovelli 2018, cap. 2), donde trataba de analizar el máximo rendimiento que se podía extraer de un motor.

Los motores de combustión, como las máquinas de vapor en las que se interesó Carnot, utilizan energía calorífica de una fuente que se quema (por ejemplo, carbón) para transformarla en “trabajo mecánico”. Esta magnitud mide algo así como el efecto de una fuerza, y se define como el producto de dicha fuerza por el desplazamiento producido en la dirección en esta actúa. Por ejemplo, cuando empujamos un mueble para cambiarlo de sitio en nuestra casa, aplicamos una fuerza horizontal, paralela al suelo. Si conseguimos mover el mueble, habremos realizado un trabajo mecánico igual a la fuerza realizada multiplicada por el desplazamiento producido.²

Realizar trabajo mecánico exige un gasto de energía. Quién recibe el efecto del “trabajo realizado” (quien recibe la fuerza causante de ese trabajo), incrementa su energía de alguna forma. Puede ganar velocidad, incrementando su energía cinética, su altitud con respecto a la superficie de la Tierra, lo que le confiere energía potencial, o su temperatura, lo que indicaría que ha ganado energía interna. También se produce “trabajo” cuando hacemos circular una corriente eléctrica por un circuito, porque hay cargas sometidas a fuerzas que se desplazan como resultado de dichas fuerzas.

Carnot, estudiando el rendimiento de la máquina de vapor (cuánto trabajo mecánico se podía obtener de ella), detectó el fenómeno clave que nos interesa: el calor pasa de lo caliente a lo frío, nunca al revés. No es como una pelota que cae, pero que podría volver a subir en un rebote. El calor nunca “rebota”. Cuando algo recién cocinado se retira del fuego, sucede que se enfría en contacto con el aire, nunca a la inversa. El calor jamás vuelve a concentrarse en la comida, calentándose esta espontáneamente y enfriándose el aire a su alrededor. Simplemente, eso no sucede.

¹ Basado principalmente en las siguientes fuentes (Zemansky 1973, cap. 8, 9, 10; Feynman 1963, cap. 46; Pathria 1996; Tipler 1994, cap. 17; Rovelli 2018, cap. 2; Brodianski 1990, cap. 3,4).

² Una curiosidad. Solo se produce algo de “trabajo mecánico” cuando la fuerza aplicada provoca un desplazamiento, que además debe tener lugar en la dirección en la que opera la fuerza. Así, cuando levantamos las bolsas de la compra desde el suelo para que queden colgando de nuestras manos estamos aplicando una fuerza vertical que realiza un “trabajo mecánico” pues las bolsas se desplazan también verticalmente como resultado de nuestra fuerza. Pero nuestra fuerza no realiza trabajo simplemente por sostener las bolsas colgando de nuestras manos. No hay duda de que los músculos de nuestros brazos y manos se cansarán mientras mantenemos las bolsas a una altura constante sobre el suelo, porque dichos músculos deben mantener una tensión suficiente que equilibre la fuerza de la gravedad que haría caer las bolsas al suelo si no las sujetáramos. Pero no habrá más “trabajo mecánico” realizado por la fuerza vertical mientras esta no provoque desplazamientos verticales adicionales de las bolsas. Y la fuerza vertical tampoco realiza trabajo mecánico por el hecho de que traslademos las bolsas desde el supermercado hasta nuestra casa caminando por una calle horizontal y manteniendo las bolsas a una altura constante sobre el suelo, colgando de nuestras manos. En este último caso existe un desplazamiento de la bolsa, en dirección horizontal, pero no hay ningún desplazamiento vertical, que es la dirección de la fuerza con la que sostenemos las bolsas, así que dicha fuerza no realiza trabajo mecánico, porque no es ella la responsable del desplazamiento.

El paso del calor de un cuerpo caliente a otro frío es un ejemplo de proceso irreversible (Zemansky 1973, cap. 8,9). Podemos entender los procesos irreversibles, en general, como aquellos en los que se producen efectos disipativos, que son aquellos que evitan que el trabajo realizado por el sistema durante el proceso pueda ser devuelto íntegramente al recorrer el proceso en sentido contrario. Disipativo quiere decir que parte del trabajo invertido por el sistema “se pierde” por el camino, se vuelve irrecuperable. Y se pierde porque se ha transformado en calor, el cual se dispersa hacia el entorno más frío, se disipa, y de ahí no se podrá hacer volver atrás. Así pues, “irreversible” quiere decir que hay “disipación”, es decir, flujo de calor que va “de lo más caliente a lo más frío”, dispersándose esa energía en el entorno de forma que se convierte en una energía irrecuperable.

Por el contrario, un proceso reversible es aquel que tiene lugar de tal modo que, al finalizar el mismo, tanto el sistema

Los procesos reversibles no existen en la realidad, sino que todos los procesos reales son irreversibles, porque siempre aparecen fenómenos disipativos que implican algún flujo de calor hacia el entorno, alguna energía que se disipa, que se vuelve irrecuperable.

como el medio exterior inmediato pueden ser reintegrados a sus estados iniciales, sin ocasionar ningún cambio en el resto del universo. Si en el proceso reversible se ha realizado algún trabajo, la energía que “costó” realizarlo podría ser recuperada de nuevo íntegramente, realizando el proceso inverso.

Los procesos reversibles no existen en la realidad, sino que todos los procesos reales son irreversibles, porque siempre aparecen fenómenos disipativos que implican algún flujo de calor hacia el entorno, alguna energía que se disipa, que se vuelve irrecuperable. Lo que los diferencia entre sí es su grado de irreversibilidad. Hay multitud de fenómenos cotidianos que corresponden a procesos altamente irreversibles. La conducción de calor de un sistema a su medio exterior más frío, lo que detectó Carnot, es un ejemplo de irreversibilidad térmica (como el enfriamiento de la comida cocinada que ya hemos comentado). Cuando agitamos un líquido (remover el café), o detenemos un líquido que está en rotación, o hacemos circular una corriente eléctrica a través de una resistencia (como por ejemplo ocurre en un secador de pelo o una tostadora) se ha utilizado una fuente de energía (muscular en el caso de los líquidos, eléctrica en el último ejemplo) para realizar un trabajo que se transforma en calor, el cual se dispersará por el entorno y no podrá ser recuperado después para ser fuente de un nuevo trabajo. Por su parte, la irreversibilidad química está presente en cualquier reacción química (las reacciones que suceden en un sentido no suceden en el contrario espontáneamente), o en la mezcla de dos sustancias, o en la disolución de un sólido en agua (la sal disuelta en el agua no vuelve a precipitar formando un sólido de forma espontánea). Todos ellos son procesos irreversibles que solo suceden espontáneamente en un sentido, no en el contrario.

El análisis de la “irreversibilidad” de los procesos que tienen lugar en la realidad (y su contraste con la reversibilidad, solo posible teóricamente pero muy útil como elemento de comparación) es territorio de la termodinámica: aquella parte de la física que analiza los sistemas desde un punto de vista macroscópico, analizando sus estados de equilibrio (aquellos en que las propiedades medibles que lo caracterizan son constantes en el tiempo) y con especial atención a lo que tiene que ver con la energía de los sistemas y el calor que intercambian estos con el exterior.

El segundo principio de la termodinámica como pérdida de energía utilizable

El primer principio de la termodinámica es el de la conservación de la energía: la energía ni se crea ni se destruye, simplemente va cambiando de forma, se va transformando constantemente. Esta transformación es posible porque hay distintas formas de energía (Zemansky 1973, cap. 9). Algunas proporcionan trabajo mecánico con gran facilidad, y otras, como el calor que ha fluído de lo caliente a lo frío, no son nada aptas para extraer de ellas trabajo mecánico.

El segundo principio o ley de la termodinámica afirma que siempre que tiene lugar un proceso irreversible (recordemos que todos los procesos reales son, en mayor o menor medida, irreversibles), el efecto sobre el universo es igual al que se produciría si se convirtiese cierta cantidad de energía, de una forma en la cual es completamente utilizable para la obtención de trabajo, en otra que es totalmente inadecuada para convertirse en trabajo (Zemansky 1973, cap. 9).

Así, si el primer principio de la termodinámica afirma que la energía no se pierde sino que solo se transforma, el segundo principio establece que dicha transformación tiene siempre un mismo sentido, el de hacer a la energía cada vez menos utilizable para obtener de ella trabajo mecánico. Puede decirse que “la energía va de mal en peor”.

Otra forma equivalente de enunciar el segundo principio de la termodinámica es afirmar que todo proceso irreversible implica que el trabajo mecánico que un sistema proporcione a partir de la energía que posee se podrá transformar íntegramente en calor, pero de este calor no se podrá volver a obtener de vuelta el trabajo mecánico o la energía interna que lo generaron (Tipler 1994, cap. 17).

Un ejemplo es lo que ocurre con un vehículo de gasolina. La energía que proporciona un litro de gasolina se convierte en dos cosas. Una parte se transforma en trabajo al mover el vehículo durante una serie de kilómetros, incrementando la energía cinética del vehículo. Pero otra parte se transforma en calor, ya sea del propio motor (que se calienta), o del aire que rodea al vehículo (por el rozamiento con este). Pues bien, si frenamos el coche, podremos recuperar algo del trabajo invertido en mantener el coche en marcha (con una dinamo) para cargar una batería (de hecho, esto es utilizado habitualmente por los vehículos híbridos: la frenada contribuye a cargar las baterías). Pero una gran parte de la energía que contenía el combustible se ha transformado, de una u otra forma, en calor, bien durante el trayecto del coche (rozamiento, disipación calorífica del motor) o bien durante su frenada (calentamiento del sistema de frenado por la fricción de sus componentes). Ese calor no se puede recuperar para cargar una batería.

Así, la combustión de la gasolina en el motor para obtener trabajo mecánico es un proceso irreversible, donde intervienen muchos fenómenos disipativos, pues se genera un importante flujo de calor que se dispersa en el entorno. La energía del combustible no ha desaparecido, pero se ha vuelto en gran parte inútil. Solo una pequeña fracción de la energía inicial ha podido hacer el viaje de ida y vuelta, transformándose primero en trabajo mecánico que incrementa la energía cinética del coche, para después transformarse de vuelta (durante la frenada) en energía química de una batería que servirá para obtener más trabajo en el futuro. La mayor parte, en cambio, se ha transformado irremediablemente en otra forma de energía (calor disipado) que es completamente inutilizable para obtener de ella trabajo mecánico en el futuro. Ha fluido hacia el entorno más frío y se ha dispersado por la atmósfera. Ya no podremos recuperarla.

Exergía

La exergía mide precisamente la máxima cantidad de trabajo mecánico que puede obtenerse de un sistema, es decir, la parte de la energía que contiene dicho sistema que es utilizable para “hacer algo con ella” convirtiéndola en trabajo mecánico (Brodianski 1990, cap. 3,4).

Visto desde otro punto de vista, la exergía sería la mínima cantidad de energía requerida para formar un sistema a partir de sus elementos constituyentes encontrados en un entorno de referencia. Lo de “mínimo” viene porque la exergía es la energía requerida para formar el sistema mediante un proceso reversible, es decir, un proceso teórico en el que no tuviera lugar ninguna disipación (Valero, Valero, y Calvo 2021, cap. 4).

Como la energía en un proceso reversible no se inutiliza, porque no hay disipación, las dos acepciones de exergía son equivalentes: la mínima cantidad de energía necesaria para formar el sistema (o sea, mediante un proceso reversible) es igual a la máxima energía que tiene el sistema disponible para ser transformada en un trabajo mecánico mediante un proceso real.

En términos de exergía, el segundo principio de la termodinámica se puede expresar como sigue: en cualquier proceso que tiene lugar en condiciones de interacción con un medio ambiente equilibrado, la exergía del conjunto del sistema o bien queda invariable (en los procesos ideales = reversibles) o bien disminuye (en los procesos reales) (Brodianski 1990, cap. 3,4). La disminución irremediable de la exergía es otra forma de decir que “la energía va de mal en peor”.

La entropía y el segundo principio de la termodinámica

La entropía se definió precisamente para poder medir el “avance” de todos los fenómenos en el sentido que marca la irreversibilidad. Se pretendía conseguir una métrica de ese devenir formado por eventos que nunca pueden suceder “marcha atrás” completamente.

Inspirado por el trabajo de Carnot, fue Rudolf Clausius quien dio en 1855 la definición original de entropía (Rovelli 2018, cap. 2), a partir precisamente del ejemplo del calor que solo va en una dirección y que tanto llamó la atención de Carnot cuando estudió las máquinas de vapor. Clausius equiparó ese “transitar irreversible” de calor a la variación de una magnitud que denominó entropía. El cambio en la entropía del sistema a lo largo del proceso irreversible (no su valor absoluto) fue definido por Clausius como la cantidad de calor intercambiado por el sistema con el entorno dividida por la temperatura.

Clausius fue también el responsable del enunciado original de la 2ª ley o principio de la termodinámica: la entropía de un sistema aislado se mantiene o crece, pero nunca decrece. De nuevo, lo de “se mantiene” valdría para un proceso reversible, esa idealización que en la realidad nunca sucede. El incremento de la entropía se podría interpretar también como el incremento de la cantidad de energía no disponible en un sistema para su aprovechamiento en forma de trabajo (Georgescu-Roegen 2021c). Cuando aumenta la entropía, hay cada vez más energía no utilizable, es decir, menos exergía.

El segundo principio como incremento del desorden

Hay una interpretación interesante de la entropía en términos del desorden presente en la organización de la materia. Imaginemos que tenemos un sistema macroscópico (por ejemplo, un cierto volumen de un gas contenido de un recipiente) en un estado determinado que llamaremos “A” y que se caracteriza por corresponder a una temperatura, presión y volumen determinados.

En termodinámica, se entiende que hay un cierto número de disposiciones en que nuestro gas se puede organizar internamente (las opciones distintas de que las moléculas del gas se coloquen en el espacio disponible), de forma que el estado macroscópico observable sea el estado A. Este número de disposiciones distintas en lo microscópico, pero que generan el mismo estado detectable macroscópicamente, se interpreta como una medida del “grado de desorden” molecular del gas en ese estado A. Cuantas menos formas hay de organizar internamente el sistema de forma que presente un determinado estado macroscópico, diremos que ese estado tiene asociado un menor grado de desorden.

Puede valer aquí el símil de un almacén. Hay una sola disposición del stock del almacén compatible con el estado macroscópico que podemos denominar “almacén en perfecto estado de revista, con todo en su sitio”. Este es el estado de máximo orden, cuando TODO está en su sitio. En cambio, el estado que podríamos llamar “almacén hecho un desastre” es alcanzable con multitud de disposiciones internas del stock del almacén. Hay una sola forma de que todo esté ordenado, pero muchas (y todas ellas equivalentes a efectos del aspecto del conjunto) de que esté todo manga por hombro. Así es como el número de disposiciones internas del sistema compatibles con un determinado estado macroscópico da una medida del grado de desorden que podemos asociar a dicho estado.

Para otro ejemplo (Feynman 1963, cap. 46), supongamos que el gas del que habíamos hablado anteriormente está formado por moléculas blancas y negras, y que el espacio disponible para el gas está dividido en pequeños volúmenes o celdas, de forma que cada molécula se sitúa en alguna de esas celdas. ¿Cuántas formas distintas tenemos de distribuir las moléculas entre las celdas disponibles de forma que todas las moléculas blancas queden en la parte izquierda del recipiente y las negras en la derecha? Por otra parte, ¿de cuántas formas podríamos distribuir las moléculas blancas y negra en las celdas disponibles, sin restricción alguna respecto a dónde va cada cuál? Hay muchas más formas de distribuir las moléculas en este segundo supuesto, cuando no imponemos restricción alguna. Este estado (las moléculas blancas y negras se mezclan de cualquier forma) es más desordenado porque admite más configuraciones internas compatibles con el mismo estado macroscópico. Así que tiene más entropía. En cambio, el estado en el cual todas las moléculas blancas quedan a un lado y las negras al otro se puede conseguir con un menor número de disposiciones distintas, así que es un estado más ordenado, con menor entropía.

Ahora tenemos un pequeño problema. Es razonable entender que la entropía se relaciona con el desorden. Pero el hecho es que la definición original de entropía, la de Clausius, no habla de desorden, sino de calor intercambiado entre el sistema y su entorno. Y ni siquiera permite conocer el nivel absoluto de entropía en un estado determinado, sino solo el incremento de entropía que experimenta el sistema cuando transita de un estado a otro, a partir del calor que intercambia con el exterior durante dicho tránsito.

La solución a esta cuestión la ofreció Ludwig Boltzmann en 1865. Lo hizo mientras sentaba las bases de la mecánica estadística, un campo de la física que trata de deducir las propiedades termodinámicas de los sistemas macroscópicos a partir del análisis de los movimientos e interacciones de las partículas fundamentales (microscópicas) que los componen. La mecánica estadística ofrece una medición precisa de la entropía asociada a un estado determinado, relacionada con el desorden molecular que corresponde a ese estado. Justo lo que necesitamos.

Según la expresión de Boltzmann, la entropía del sistema cuando se encuentra en el estado “A” es proporcional al logaritmo de lo que se conoce como “probabilidad termodinámica”, que es simplemente el número de disposiciones internas compatibles con el estado externo “A” (Pathria 1996). Gracias a esta fórmula, tenemos ya una entropía definida para cada estado macroscópico, en función del número de disposiciones internas compatibles con dicho estado, o sea, en función de su grado de desorden.

La entropía entendida como grado de desorden de la materia conecta fácilmente con la irreversibilidad, pues todo proceso irreversible implica un incremento del desorden molecular. La disipación, la disolución, la mezcla...todo ello incrementa el grado de agitación de las moléculas, su energía no organizada, su entropía (Zemansky 1973, cap. 10). Si

la entropía mide el grado de desorden, su aumento mide el desordenamiento de la materia. Así, los procesos irreversibles pueden caracterizarse por el aumento del desorden molecular.³

Bajo este enfoque de entropía como grado de desorden, el segundo principio de la termodinámica (el que afirma que la entropía aumenta) concluiría que el universo tiende a incrementar su desorden. El devenir, que no es sino una sucesión enorme de pequeñas interacciones, cada una de ellas gobernadas por las leyes de la física, lleva al mundo a estados cada vez más probables, aquellos alcanzables con un mayor número de configuraciones internas. Aquellos estados que son, en definitiva, más desordenados en el sentido termodinámico, con mayor entropía.⁴

El segundo principio como disminución de la cantidad de información

Una última interpretación interesante de la entropía indica que el número de modos (disposiciones internas) que permiten alcanzar un estado macroscópico particular (número con el que se relaciona la entropía), también indica la información que tenemos a nuestro alcance sobre ese sistema. Veamos por qué. La disposición interna del sistema (qué posición exacta ocupa en el espacio cada uno de sus componentes microscópicos en un momento dado) no puede ser conocida, es imposible de determinar. Así que conociendo el estado macroscópico (la “apariciencia” externa del sistema en cuanto a sus variables termodinámicas básicas como volumen, presión o temperatura), lo más que podemos decir es que la disposición interna será una de todas las que son compatibles con dicho estado que podemos observar macroscópicamente.

Cuanto mayor sea este número de disposiciones internas compatibles, mayor es la entropía porque mayor es el abanico de posibilidades en las que nuestro sistema podría situarse, sin que podamos determinar exactamente en cuál se encuentra (pues todas ellas dan como resultado la misma apariciencia macroscópica). Así que nuestro desconocimiento sobre el estado microscópico del sistema es mayor. Por el contrario, a menor número de configuraciones internas compatibles con el estado macroscópico, más información tenemos de cómo está el sistema (Zemansky 1973, cap. 10), en el sentido de que tenemos menos incertidumbre respecto a cómo se dispone internamente (menos opciones disponibles).

La entropía estaría dando cuenta de la magnitud de nuestra ignorancia respecto a cómo se dispone el sistema internamente. En palabras de Brillouin, “la entropía mide la falta de información acerca del estado exacto de un sistema” (Zemansky 1973, cap. 10).

El flujo del tiempo y la paradoja de las leyes reversibles que provocan fenómenos irreversibles

Hay algo que diferencia la entropía y el segundo principio de la termodinámica, del resto de magnitudes y leyes del ámbito de la física. Tiene que ver con el concepto del tiempo. La física, al plantearse en los siglos XIX y XX qué era el

³ Y todo cuadra también entre la fórmula de Boltzmann para el nivel de entropía (como grado de desorden) del sistema cuando se encuentra en un estado “A”, y la fórmula de Clausius para el cambio en la entropía del sistema cuando este intercambia calor con su entorno al transitar de un estado “A” a otro “B”. Según la fórmula de Clausius, el sistema que absorbe calor para pasar del estado “A” al estado “B” estará incrementando su entropía. Al absorber calor, se incrementará la agitación térmica de las moléculas y, por lo tanto, su desorden. El estado B será compatible con más disposiciones internas de las partículas microscópicas que conforman el sistema, así que la “probabilidad termodinámica” en ese estado “B” (el número de configuraciones internas compatibles con el estado “B”) será también mayor, lo que, según la fórmula de Boltzmann, indica que el sistema tiene mayor entropía en el estado “B” de la que tenía en el estado “A”.

⁴ Una vez que se entiende por qué el mundo avanza desde el orden hacia el desorden, una pregunta interesante que surge es: ¿y por qué el mundo estaba más ordenado al principio? No es una cuestión ni trivial ni que esté resuelta. Feynman (1963, cap. 46) afirma que ese “mayor orden” inicial se ve dondequiera que mires en el universo con un telescopio, así que es algo “de todo el universo”. Como dice Feynman “eso no significa que entendamos la lógica que hay detrás. Por alguna razón, el universo en un momento dado tuvo muy baja entropía para su contenido energético, y desde entonces la entropía ha aumentado. Así que ese es el camino que nos espera en el futuro. Esa es la fuente de la irreversibilidad”. Por su parte, Rovelli (2018, cap. 2) discute desde el ámbito de la relatividad y se arriesga con una respuesta: lo particular no está en el mundo, sino en nosotros y en nuestra interacción con él. El incremento de la entropía que detectamos como una ley sería simplemente el resultado de nuestra forma particular de interaccionar e interpretar el mundo, que es cosa nuestra, más que del mundo.

tiempo, tropezó con algo muy desconcertante: la diferencia entre pasado y futuro no existe en las leyes elementales que describen los mecanismos del mundo (Rovelli 2018, cap. 2). Ni la mecánica de Newton, ni el electromagnetismo de Maxwell, ni la relatividad de Einstein, ni la mecánica cuántica de Dirac y Schrödinger diferencian pasado de futuro. Todas estas ecuaciones tienen la propiedad de que si existe una solución (es decir, un fenómeno posible) para un tiempo "t", también existe otra solución para un tiempo "t".

Parecería, por lo tanto, que en las ecuaciones de la física el mundo es reversible. Todo lo que sucede y queda descrito por las mencionadas ecuaciones fundamentales podría suceder perfectamente, por lo que atañe a dichas ecuaciones, hacia atrás. Nada en las ecuaciones lo impide.

Pero el hecho es que la característica más natural de todo fenómeno real es su obvia irreversibilidad (Feynman 1963, cap. 46), es decir, que los fenómenos suceden en el sentido temporal en que suceden, que es uno determinado, y no pueden suceder en sentido contrario. Esto forma parte de nuestro "sentido común" como humanos. Imaginemos que visualizamos un video en el que una mano agita un recipiente que contiene alubias y garbanzos crudos. A medida que avanza el video se observa cómo los garbanzos se agrupan en la parte inferior del recipiente, y las alubias en la parte superior. ¿Es creíble esto? No, sabemos perfectamente que nos están engañando y que están proyectando el vídeo marcha atrás. La "desmezcla" no se produce como resultado de la agitación. La experiencia nos dice que las cosas, espontáneamente, tienden a mezclarse, no a separar sus elementos constitutivos. La mezcla es un proceso altamente irreversible que solo sucede en un sentido, aquel a lo largo del cual se incrementa la entropía (el desorden) del sistema cuando los componentes se mezclan, nunca lo contrario.

Pero entonces ¿de dónde viene la irreversibilidad que plantea el segundo principio de la termodinámica, si todas las ecuaciones fundamentales de la física son reversibles temporalmente? ¿Por qué esta irreversibilidad solo se hace patente cuando entra en juego el calor, de alguna forma? ¿Significa que la única teoría física auténticamente válida es la termodinámica? No parece ser el caso, pues todas las otras teorías mencionadas, desde la relatividad a las mecánicas clásica y cuántica, están ampliamente refrendadas por la evidencia empírica. Y, sin embargo, el fenómeno evidente y ubicuo de la irreversibilidad no parece estar contenido en ellas. Por lo que a dichas ecuaciones se refiere, la reversibilidad sería plenamente posible.

La solución parece ser que en realidad no hay ningún conflicto. La irreversibilidad del mundo no proviene de (ni requiere de) un incumplimiento de las (reversibles) leyes de la física, sino del hecho de que, al aplicar estas leyes muchas veces a componentes pequeños de la materia, lo que sucede macroscópicamente es un tránsito del orden hacia el desorden, que es la esencia de la irreversibilidad. Por ejemplo, en un gas, cada choque de las partículas estaría gobernado por leyes reversibles de la mecánica, pero si empezamos con un compartimento separado en dos mitades con dos gases, uno a cada lado de la separación, y eliminamos la separación, las colisiones reversibles entre moléculas de uno y otro lado acaban generando un proceso irreversible que es la mezcla de ambos gases.⁵ Las leyes reversibles,

⁵ A modo de curiosidad, Nicholas Georgescu-Roegen (2021d), el economista de referencia en cuanto a la consideración de la entropía y las leyes de la termodinámica en la economía, se muestra en frontal desacuerdo con la mecánica estadística. Para él, la segunda ley de la termodinámica y su irreversibilidad revelan que el paradigma mecanicista reversible de la mecánica clásica habría quedado claramente superado ya a mediados del siglo XIX. La mecánica estadística no sería sino el intento a la desesperada de salvar ese paradigma superado, utilizándolo para "microfundamentar" la termodinámica. Se habría generado así un "collage" absurdo: lo que es una ley universal (el aumento de la entropía) se describe en el ámbito de la mecánica estadística como el resultado más plausible probabilísticamente del devenir del universo, pero sin descartar la posibilidad de que se den otros. En efecto, para la mecánica estadística no es completamente imposible que un vaso de agua hervida que se ha enfriado por el contacto con el aire vuelva a hervir espontáneamente robando calor del ambiente que le rodea. Pero la probabilidad de que ocurra tal cosa (lo que supondría un incumplimiento del segundo principio de la termodinámica) para un sistema macroscópico (es decir, con muchas moléculas) es insignificante, a efectos prácticos indistinguible de cero. Pero el hecho de que no sea estrictamente cero supone para Georgescu-Roegen la prueba de que el andamio de la física se tambalea, por culpa de ese añadido espurio que es la mecánica estadística. Los físicos, por su parte, no tienen en general ningún dolor de cabeza con esta cuestión (Tipler 1994, cap. 17).

gobernando cada una de las pequeñas interacciones que llenan el devenir del tiempo, acaban generando una corriente irreversible hacia un mayor desorden.

Balance

Tenemos una descripción de los fenómenos de la energía y el calor que funciona bien en la realidad física. Esta descripción tiene dos pilares complementarios. Uno microscópico que es la mecánica estadística basada en las ecuaciones de la mecánica aplicadas a los componentes microscópicos de un sistema. Y uno macroscópico que es la termodinámica. Ambos engarzan.

De esta descripción se deduce en términos prácticos un principio de irreversibilidad, en el sentido de que todo sistema físico evoluciona de una forma que se denomina irreversible, entendiendo irreversible en el sentido de que el proceso no podría ir en sentido temporal contrario al que lleva.

Este acontecer irreversible del universo en su conjunto (o de cualquier sistema que podamos considerar aislado), con el transcurrir del tiempo, presenta tres síntomas, o se puede describir desde 3 perspectivas alternativas y consistentes entre sí, que no son sino las tres formas de enunciar el segundo principio de la termodinámica.

El primer síntoma es el descenso de la cantidad de energía utilizable en el universo (la exergía) o, lo que es lo mismo, el incremento de la fracción no utilizable dentro de la energía presente. La energía existente siempre es la misma (primer principio de la termodinámica) pero cada vez está más degradada en cuanto a su capacidad de proporcionar trabajo mecánico (cada vez con menor exergía).

El segundo síntoma es el incremento del desorden molecular, a medida que las leyes reversibles de la mecánica, operando en lo microscópico, hacen evolucionar el sistema de manera irreversible a los estados macroscópicos más probables, aquellos que son compatibles con un mayor número de configuraciones internas del sistema. La relación entre los síntomas 1 y 2 es inmediata, pues la cantidad de energía que se vuelve no utilizable en el transcurso de un proceso irreversible es proporcional, precisamente, al incremento de entropía que ha experimentado el universo como consecuencia de dicho proceso (Zemansky 1973, cap. 9). Y, en el mismo sentido, a mayor entropía (desorden) en el sistema, menor exergía (energía utilizable) disponible para extraer de él y transformarlo en trabajo mecánico.

Por último, el tercer síntoma es el descenso en la información disponible sobre el sistema, que es la otra cara del incremento del desorden. A mayor número de configuraciones compatibles con un estado macroscópico determinado, la entropía es mayor (mayor desorden), pero al mismo tiempo es inferior lo que sabemos del sistema, porque solo conocemos que se dispondrá internamente según una de las (muchas) disposiciones compatibles con el estado macroscópico que observamos.

En definitiva, la flecha del tiempo apunta en el sentido de incrementar la entropía y el desorden, o lo que es lo mismo, disminuir la exergía o energía utilizable. Esto es lo que describe la física. Y la descripción funciona.

El sistema económico y la entropía

Vida y entropía

Antes de llegar a la economía y a la sostenibilidad, hay que hacer una pequeña parada intermedia en “lo vivo”. ¿Qué relación existe entre entropía y vida? Schrödinger, uno de los pioneros de la mecánica cuántica, fue de los primeros que

Para mantenerse como el islote de baja entropía que es, la vida acelera el crecimiento entrópico del sistema del que forma parte, “robando” baja entropía de su entorno en forma de energía y materiales y devolviendo al sistema calor y residuos de entropía incrementada.

indagó esta cuestión (Schrödinger 1990). Lo cierto es que la materia viva está más ordenada que la inerte, así que tiene menos entropía. La vida pugna por mantener su baja entropía, absorbiendo baja entropía del entorno y expulsando alta entropía hacia él, luchando contra su inherente tendencia a incrementar su propia entropía, cosa que pasaría si muriera (Georgescu-Roegen 2021c).

Parecería entonces que la existencia de la vida viola el principio del aumento de la entropía, o como mínimo se opone a dicho principio. Es más bien lo contrario. Para mantenerse como el islote de baja entropía que es, la vida acelera el crecimiento entrópico del sistema del que forma parte, “robando” baja entropía de su entorno en forma de energía y materiales y devolviendo al sistema calor y residuos de entropía incrementada. Pero el balance neto de entropía es positivo. La entropía de todo el sistema (vida + entorno) crece más rápidamente porque hay vida.

Así, la ley de la entropía no explica la existencia de vida, ni necesita de la vida para cumplirse. Pero la vida no contradice la ley del incremento de la entropía, sino que de hecho colabora a que se cumpla más rápidamente (Georgescu-Roegen 2021c), acelerando, como medio para subsistir, la degradación (incremento de entropía) del sistema del que forma parte.

Sobre esta idea de partida, Schneider y Sagan desarrollan su explicación del sentido (físico) de la vida en su libro La Termodinámica de la vida (Schneider y Sagan 2008). Para ellos, la vida es uno de los muchos sistemas autoorganizados complejos (es decir, con menor entropía que su alrededor) que surgen en la naturaleza al calor de los llamados “gradientes”, que son simplemente diferencias en el valor que toma una magnitud a lo largo de una distancia.⁶

Lo cierto es que la naturaleza parece aborrecer los gradientes, pues da lugar a muchos tipos de estructuras organizadas para “aplanarlos”. Un tornado sería un ejemplo de estructura organizada (aunque no viva) que “gestiona” un desequilibrio de presiones de la atmósfera, colaborando a su desaparición. Pues bien, la vida en la Tierra sería también uno de estos sistemas, particularmente complejo, que contribuiría, alimentado por el flujo de energía solar, a “aplanar”, a homogeneizar el tremendo gradiente térmico que existe entre el Sol (caliente) y el espacio (frío). La vida en la Tierra colabora a degradar más eficazmente la energía solar.

Los físicos como Schrödinger llamaron “no entropía” o entropía negativa a lo que alimenta la vida, a lo que esta requiere para existir (Schrödinger 1990). La exergía permite hablar de lo mismo, de lo que “come” la vida, pero en magnitudes mensurables en unidades de energía (Brodianski 1990, cap. 4).

Así que estar vivo consiste, termodinámicamente hablando, en mantener tu entropía baja. La paradoja está en que, al hacerlo, “consumes” la fuente de tu subsistencia, que es la baja entropía que extraes de tu entorno. La vida degrada eficazmente (más eficazmente que la materia no viva) la baja entropía que la hace posible. Ese es el resquicio que nos dejan las leyes de la física para que algo tan improbable como la vida (por lo organizado que es) llegue a existir: que acelera el proceso de desorganización del universo en general.

⁶ Por ejemplo, en la atmósfera existe un “gradiente” vertical de temperatura, pues a medida que ascendemos respecto a la superficie terrestre la temperatura del aire va cambiando.

Economía y entropía

Siguiendo el hilo de la entropía, ahora toca dar el salto de la vida a la economía. Nicholas Georgescu-Roegen es sin duda el que más activamente ha trabajado este tema (Georgescu-Roegen 1971; 2021c; 2021a; 2021b; 2021d). Explicaremos en primer lugar la visión de Georgescu-Roegen de la economía como extensión de lo vivo para después analizar las fuentes de baja entropía de las que se alimenta el sistema económico.

La economía como extensión de lo vivo

La economía puede entenderse como una actividad vital más del ser humano, una extensión de las funciones biológicas de nuestra especie. A fin de subsistir, el ser humano no se limita a utilizar (como hacen todos los seres vivos) sus órganos endosomáticos (internos), perfeccionados por la selección natural, sino que también ha inventado y perfeccionado (por la vía de la transmisión cultural) herramientas e ideas, que pueden considerarse órganos exosomáticos (externos al cuerpo). Estos permiten satisfacer muy bien las necesidades de la especie, aunque su producción, distribución y control da lugar a un inevitable conflicto social (Georgescu-Roegen 2021a).

La economía se alimenta de baja entropía en forma de materia organizada y energía utilizable y expulsa constantemente de vuelta al sistema alta entropía en forma de materia menos organizada (residuos) y energía menos utilizable, disipada en forma de calor

de nuestra especie. A fin de subsistir, el ser humano no se limita a utilizar (como hacen todos los seres vivos) sus órganos endosomáticos (internos), perfeccionados por la selección natural, sino que también ha inventado y perfeccionado (por la vía de la transmisión cultural) herramientas e ideas, que pueden considerarse órganos exosomáticos (externos al cuerpo). Estos permiten satisfacer muy bien las necesidades de la especie,

La economía también es una extensión de “lo biológico” en cuanto a entropía se refiere: la economía contribuye al

La entropía no ha sido reconocido por la economía tradicional, que representa a menudo la actividad económica como un círculo producción-consumo cerrado y, lo que es peor, sin intervención alguna de los recursos naturales.

incremento de la entropía en el conjunto del sistema. Para ello se alimenta de baja entropía en forma de materia organizada y energía utilizable (tanto a partir de otras formas de vida vegetales o animales, como de recursos minerales), y expulsa constantemente de vuelta al sistema alta entropía en forma de materia menos organizada (residuos) y energía menos

utilizable, disipada en forma de calor (Georgescu-Roegen 2021c).

Pero esto no ha sido reconocido por la economía tradicional, que representa a menudo la actividad económica como un círculo producción-consumo cerrado y, lo que es peor, sin intervención alguna de los recursos naturales. En realidad, el único esquema cerrado que podría representar de forma fidedigna el sistema económico sería el de un reloj de arena, en que la materia y energía de “alta calidad”, los recursos de baja entropía, ocupan la parte superior del reloj. Con el transcurrir el tiempo, los recursos son procesados por el sistema económico y se transforman en otros diferentes, de menor calidad y mayor entropía, que caen a la parte inferior del reloj. Se trata de un proceso irreversible, así que los recursos, cuando llegan abajo, están degradados, han ganado más entropía y por lo tanto ya no son utilizables en la misma medida en que lo eran antes, cuando estaban en la parte superior del reloj (Georgescu-Roegen 2021a).

Es cierto que a veces la producción humana consiste precisamente en reducir la cantidad de entropía de un determinado material, para construir un material más organizado, con menor entropía. Un ejemplo, tomado de Georgescu-Roegen (2021c) sería fabricar hilo de cobre a partir de mineral de cobre, proceso en el cual disminuye la entropía del material de cobre (pues el hilo de cobre es materia más organizada, menos entrópica, que el mineral con el que se inició el proceso). Pero esa no es la historia completa. Para realizar esa transformación industrial se ha invertido energía, y se han utilizado máquinas que se han tenido que construir. En conjunto, el proceso de fabricación del hilo de cobre, aunque genere una “isla” de entropía decrecida (la del propio hilo cobre) colabora, en términos agregados, a que la entropía del universo se acreciente más rápidamente que si dicho proceso no hubiera tenido lugar.

Así que el sistema económico juega un papel similar al que jugaba el metabolismo de la vida: acelerar le degradación entrópica del sistema en su conjunto. La economía, como extensión de la actividad vital de los humanos, genera también “islas de baja entropía”, estructuras materiales más organizadas. De nuevo, esto no se opone a la ley del aumento de la entropía, sino que, al contrario, acelera su inexorable cumplimiento en el conjunto del sistema.

Fuentes de baja entropía para la economía

Para Georgescu-Roegen (2021c), la “baja entropía” de la que se alimenta la economía humana procede de dos fuentes. Por un lado, el stock de materiales que nos ofrece la Tierra, lo que incluye los combustibles fósiles y los minerales que utilizamos como base material de nuestra subsistencia; por el otro, el flujo de radiación solar.

Sin duda esta clasificación es un buen punto de partida, pero tiene al menos dos inconvenientes. La dicotomía stock/flujo es evidente, pero oculta una cuestión importante, y es la diferente naturaleza de las dos grandes partidas que existen dentro del stock de materiales que nos proporciona la Tierra. Los combustibles fósiles se originaron a partir de la energía solar que llegó hace millones de años a la Tierra, mientras que los minerales que utilizamos como materiales no. Es decir, parte del stock de materiales es en realidad “sol concentrado y empaquetado”. Otro aspecto relevante que falta es el papel que juega la vida no humana como mediadora insustituible entre nuestra especie y algunas de las más importantes fuentes de baja entropía que necesitamos.

Para diseñar una clasificación que supere estas limitaciones, se puede comenzar por dos criterios básicos: si la fuente de entropía constituye un stock o un flujo, y si el origen es solar o no. Esto nos permite elaborar una de tabla de doble entrada, que empezaremos a rellenar pensando en primer lugar en las fuentes de baja entropía que requiere la vida humana para su subsistencia más básica, todo aquello que es imprescindible para sostener nuestra parte “endosomática”, nuestro organismo: la alimentación. De ella obtenemos los materiales y la energía necesarios para mantener nuestro organismo con el adecuado (bajo) nivel de entropía que requiere (figura 1).

La alimentación requiere del aporte de distintas fuentes de baja entropía.

Figura 1. Fuentes de baja entropía para la vida humana a través de la alimentación

	Origen solar	Otro origen
Stock		<ul style="list-style-type: none"> - Minerales (sustrato material de la vida) - Medio ambiente para la vida (agua dulce/salada, aire atmosférico)
Flujo	<ul style="list-style-type: none"> - Energía solar procesada por la vida vegetal y animal que utilizamos de alimento - Agua dulce (consumida por organismos vivos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Geotérmica (vida no humana)

Elaboración propia

La alimentación requiere del aporte de distintas fuentes de baja entropía. Su base está en la vida vegetal y animal, así que el primer elemento que entra en juego es un flujo y de origen solar: la energía del sol que solo podemos asimilar una vez “procesada” por las plantas (o por animales que en último término se alimentan de ellas). Podemos considerar también como resultado del flujo de energía solar el agua dulce que la vida necesita para sobrevivir. Es la energía solar

la que, a partir del agua (mayoritariamente salada) con la que cuenta el planeta, provoca la evaporación de la que proviene la lluvia que proporciona el flujo de agua dulce disponible que la vida precisa.

Pero la alimentación humana requiere también de aportes de baja entropía no solares. En cuanto a stocks, intervienen aquí las sustancias químicas inorgánicas que constituyen el sustrato de la vida, y los medios en los que esta se desarrolla (agua - tanto líquida como gaseosa- y/o el aire atmosférico). En cuanto a flujos, hay que mencionar la energía geotérmica que sustenta algunas formas de vida (las que habitan en el fondo del mar, junto a las dorsales oceánicas, o en zonas terrestres con fuerte actividad volcánica). El supuesto adoptado aquí es que todas las formas de vida están relacionadas. Así, como la alimentación se sustenta en algunos organismos vivos, depende de hecho de todas las fuentes de baja entropía utilizadas por cualquier forma de vida.

Una vez identificadas las fuentes de baja entropía que nuestros órganos endosomáticos requieren como condición mínima para subsistir, la tabla se puede completar con aquellas otras fuentes que también utilizamos los seres humanos. Evidentemente estas también sirven, en último término, para satisfacer necesidades humanas, pero de una forma mucho más organizada, mediante estructuras y dinámicas sociales más complejas.⁷

Pues bien, en cuanto a fuentes de baja entropía de origen solar, tendríamos en primer lugar los combustibles fósiles, el stock de “pilas de luz solar” que desde la revolución industrial sostiene, aunque con grados de intensidad diversos, el funcionamiento de la gran mayoría de sociedades humanas (figura 2, más adelante). Adicionalmente, se añade en la columna de origen solar, pero en la fila de flujos, toda la energía que nos llega mediante la luz solar en forma de distintas “fuentes renovables” como solar, eólica, hidroeléctrica, o combustión de biomasa.⁸ También se encuadran aquí la energía undimotriz que proporcionan las olas (que están generadas principalmente por viento, es decir, en último término energía solar) o la energía que proporcionan las corrientes marinas, que derivan también del sol pues existen principalmente para redistribuir por el planeta el desigual flujo de energía solar que llega a cada punto del océano.

De forma directa o indirecta, todas las fuentes anteriores proporcionan baja entropía que proviene del flujo lumínico que nos llega del sol. Para completar la casilla de los flujos de baja entropía de origen solar, hay que mencionar la energía mareomotriz, originada en el movimiento de las mareas. Una parte de esta energía proviene del sol, pero no del flujo de radiación que emite, sino de la fuerza gravitatoria con la que atrae a la Tierra y que es una de las responsables de los movimientos de mareas.

Todavía en la columna de origen solar, hay que hacer dos añadidos en el ámbito material, no energético. El primero es un stock: el de los materiales que obtenemos del petróleo, como la mayoría de los plásticos. El segundo es un flujo conformado por todos los materiales que obtenemos de las plantas, desde la madera para la construcción de todo tipo

⁷ Por ejemplo, tanto la vida vegetal como el petróleo son fuentes de baja entropía que actualmente precisa la sociedad humana para subsistir tal y como la conocemos. Incluso se puede decir que ambas fuentes son imprescindibles para lo más básico: la alimentación. No en vano, en la base de la alimentación humana está el cultivo de vegetales con tecnología intensiva en la combustión de derivados del petróleo (por lo menos en algunas zonas del planeta). Pero hay una diferencia sustancial entre ambas fuentes. La vida vegetal es absolutamente imprescindible como fuente de baja entropía. El petróleo no. La humanidad se ha alimentado (otra cosa es en qué condiciones) durante miles de años sin dominar la tecnología del motor de combustión, pero la vida vegetal siempre ha estado ahí, inevitablemente, como base de la subsistencia humana.

⁸ Por definición, la energía solar térmica y fotovoltaica proviene directamente del flujo de luz solar. Pero el resto de las energías renovables también, aunque de forma indirecta. La energía eólica procede del viento, que surge como consecuencia de diferencias de presión en la atmósfera, resultado de la desigual cantidad de energía de luz solar que cada punto de la atmósfera recibe. La energía hidroeléctrica procede del agua que se evapora por acción de la radiación solar, forma nubes, y se convierte en agua líquida que, si cae en zonas terrestres elevadas sobre el nivel del mar, tiende a fluir hacia el mar “cuesta abajo”, y es en ese tránsito de vuelta al mar donde la aprovechamos para producir electricidad. La biomasa, como materia viva, es también “luz solar empaquetada” al igual que la vida vegetal que nos sirve de alimento. La biomasa tiene algún rasgo de stock, aunque de vida corta en comparación con el carbón o el petróleo. Pero la provisión de biomasa puede verse también como un flujo solar “retardado” unos años, los que conlleva el crecimiento de la materia vegetal.

de objetos y estructuras hasta los materiales de origen vegetal con los que tímidamente vamos encontrando sustitutos a algunos plásticos tradicionales. Esto constituye la tercera aparición de la vida vegetal o “biomasa”, primero como comida, después como fuente de energía, y ahora como fuente de materiales.

En la columna de origen no solar, situamos para comenzar el stock de minerales que extraemos de la corteza terrestre. Estos materiales no constituyen una “pila de luz solar”, como los combustibles fósiles, sino que están formados por elementos químicos formados en los procesos de combustión estelar, recombinados en algunos casos por medio de procesos geológicos donde el aporte energético, si acaso, ha provenido de la geología terrestre a través del vulcanismo y los movimientos tectónicos.

Figura 2. Fuentes de baja entropía para la vida humana

	Origen solar	Otro origen
Stock	<ul style="list-style-type: none"> - Materiales derivados del petróleo (plásticos) - Combustibles fósiles 	<ul style="list-style-type: none"> - Minerales (energía) - Minerales (materiales) - Minerales (sustrato material de la vida) - Medio ambiente para la vida (agua dulce/salada, aire atmosférico)
Flujo	<ul style="list-style-type: none"> - Energía solar procesada por la vida vegetal y animal que utilizamos de alimento - Agua dulce (consumida por organismos vivos) - Biomasa (energía y material) - E. Solar (térmica y fotovoltaica) - E. Eólica - E. Hidroeléctrica - E. Marina debido al flujo de luz solar (undimotriz y corrientes) - Energía mareomotriz (fuerza gravitatoria solar) 	<ul style="list-style-type: none"> - Geotérmica (vida no humana) - Energía geotérmica (aprovechamiento humano) - Energía mareomotriz (fuerza gravitatoria lunar)

Elaboración propia (zona sombreada: fuentes de baja entropía de las que depende la alimentación humana; color verde: fuentes de baja entropía que aprovechamos con la mediación de la vida no humana)

En el caso de los materiales, la “baja entropía” alude al grado de orden que necesitamos que contengan. Por ejemplo, si necesitamos litio para baterías, tenemos que encontrar una mina de litio en que este elemento químico se encuentra en una forma relativamente organizada, suficientemente concentrada como para que sea factible y rentable extraer material de la mina para después obtener de ahí el elemento litio. Si todo el litio que existe en la tierra estuviera completamente disperso por la corteza terrestre, en partículas de nanogramos mezcladas con el resto de materiales, tendríamos un problema. Habría litio, pero muy poco organizado, con alta entropía, muy poco apto para ser utilizado. Acceder a ese material tan entrópico requeriría un consumo de tiempo y energía enormes, para “seleccionarlo” y separarlo del resto. Es decir, dependemos de estos “reservorios” de baja entropía en forma de materiales organizados, no dispersos, para poder extraerlos y utilizarlos en nuestro sistema productivo.

Estos materiales nos interesan, en general, porque proporcionan la base material de nuestra economía, con la que construimos nuestros “órganos exosomáticos” en palabras de Georgescu-Roegen (maquinaria, herramientas, objetos cotidianos). Es el caso, por ejemplo, del hierro, el aluminio, el cobre, o los áridos que utilizamos para la construcción. Pero no hay que olvidar que una pequeña parte de estos recursos minerales de origen no solar nos interesan por la energía que son capaces de proporcionar, como ocurre con los recursos minerales de los que obtenemos combustible para las centrales nucleares.

En esta misma columna de origen no solar, se encuadrarían por último algunos flujos energéticos de importancia menor en términos globales. Un ejemplo sería la energía geotérmica apta para el aprovechamiento humano, que en países como Islandia proporciona energía para uso doméstico e industrial, por ejemplo, para fundiciones de aluminio. Esta energía es de origen geológico, sin relación con la energía solar, y constituye un flujo de calor que, por su intensidad, es apto para producir trabajo antes de disiparse en la atmósfera. Otro ejemplo sería la energía mareomotriz debida a la atracción gravitatoria de la luna.

El panorama completo de fuentes de baja entropía (figura 2) arroja algunas ideas interesantes para la discusión sobre la sostenibilidad. La primera es lo diversas que son las fuentes de baja entropía que sostienen la vida humana, incluso si nos fijamos en su núcleo mínimo, el que constituye la base de nuestra alimentación (celdas sombreadas en la figura 2). Se encuentran aquí flujos originados en la radiación solar, y tanto stocks como flujos de origen no solar. Esta diversidad no debe extrañar. La vida, para reducir eficazmente el gradiente térmico entre el sol y el espacio, no desaprovecha ninguna de las fuentes de baja entropía disponibles.

La segunda idea apunta a la relevancia de “lo vivo” como fuente de baja entropía (texto en verde en la figura 2). No solo la alimentación se basa por completo en la vida, sino que esta hace además un aporte decisivo a las sociedades humanas como fuente de energía “exosomática”, a través de la energía que proviene de la quema de materia vegetal y, muy especialmente, de la quema de combustibles fósiles. También los vegetales (tanto actuales como del pasado, convertidos en petróleo) nos proporcionan abundantes materiales. No es exagerado decir que la vida humana está inevitablemente entrelazada con el resto de la vida terrestre, tanto actual (alimentación, biomasa para energía o para materiales) como pasada (energía fósil y materiales).

La tercera idea retoma la cuestión de la variedad de fuentes de baja entropía, ya mencionada, pero poniendo el foco ahora en otra faceta: la dependencia. Sacamos entropía negativa de muchas fuentes, es decir, tenemos un abanico de proveedores diversificado. Eso suena bien, pero el problema es que las fuentes no son intercambiables entre sí, o lo son de forma muy limitada. No hay sustituto para el aporte de baja entropía que, literalmente, ingerimos cuando nos alimentamos. Aunque la energía que obtenemos de nuestro metabolismo provenga en último término del sol, sin el trabajo previo de las plantas seríamos incapaces de aprovecharla para mantenernos con vida. Al margen de la alimentación, incluso entre las fuentes de baja entropía de origen solar la sustituibilidad es limitada o, como mínimo, incierta. La intensidad energética que proporcionan los combustibles fósiles es imprescindible para algunas aplicaciones (por ejemplo, el transporte marítimo) e imposible, de momento, de sustituir por fuentes renovables.

Economía y segundo principio de la termodinámica

Todo lo que sostiene nuestro (entrópico) sistema económico, como extensión de nuestro esquema biológico para lograr la supervivencia, se encuentra en la Tierra. Y está sometido, como parte del universo, al segundo principio de la termodinámica que impone un aumento de la entropía de cualquier sistema aislado (que no intercambia ni materia ni energía con el exterior) con el transcurrir del tiempo.

Ahora bien, la Tierra no es un sistema termodinámicamente aislado, sino “cerrado” porque intercambia energía con el exterior: recibe la luz solar, y parte de esa energía es reflejada de vuelta al espacio. Tampoco son aislados los distintos subsistemas terrestres que entran en juego aquí a distintas escalas: el ser vivo, del tipo que sea, la sociedad humana, la biosfera en su conjunto o el sistema económico. Cada uno de ellos constituye un subsistema abierto dentro de la Tierra, pues es capaz de intercambiar tanto materia como energía con su entorno a fin de mantener su entropía estable, en un nivel suficientemente bajo.

Entonces ¿qué sistema aislado es aquel que está condenado por el segundo principio a incrementar su entropía, y qué

Ayudamos a que se cumpla el segundo principio porque nuestro acopio de baja entropía significa que los materiales tienden a ser menos útiles cada vez, porque exigen cada vez de más trabajo para hacerlos aprovechables. Y la energía cada vez es menos utilizable porque, mientras va perdiendo exergía, es menos aprovechable para obtener de ella trabajo.

papel juega la sociedad humana y su economía en dicho sistema? Deberá ser un sistema que incluya la Tierra y que pueda considerarse razonablemente aislado del exterior porque apenas intercambie ni materia ni energía con este. Este sistema puede ser el conjunto que forman la Tierra con el Sol y un cierto volumen de espacio que contiene a ambos. En ese sistema, aislado, se verificará el segundo principio de la termodinámica: su entropía

aumentará. En él contamos con un foco emisor muy potente de baja entropía, el Sol, un entorno muy homogéneo y de alta entropía como es el espacio, y la Tierra, que intercambia energía con el espacio y cuya posición en medio de ese gradiente energético tan potente entre el sol y el espacio da pie a la formación de estructuras complejas (como la vida) cuyo sentido termodinámico es aplanar el gradiente del que se alimentan.

Es en ese sistema donde el segundo principio dicta el aumento de la entropía como algo inevitable. El ser vivo, la sociedad humana, la biosfera o el sistema económico colaboran a este destino termodinámico del sistema aislado en el que se insertan. ¿Su estrategia? Convertirse en islas de baja entropía, más baja cuanto mayor organización y complejidad adquieran, a costa de consumir de forma más acelerada la baja entropía disponible (materiales y energía) en el entorno.

Ayudamos a que se cumpla el segundo principio porque nuestro acopio de baja entropía significa que los materiales tienden a ser menos útiles cada vez, porque exigen cada vez de más trabajo para hacerlos aprovechables. Y la energía cada vez es menos utilizable porque, mientras va perdiendo exergía, es menos aprovechable para obtener de ella trabajo. Esto ocurriría igualmente sin vida, sin humanidad y sin sistema económico alguno, pero con todo ello sucede más rápidamente. Es inevitable.

De qué va la sostenibilidad

La sostenibilidad no va de si podemos escapar al segundo principio de la termodinámica. Eso no es posible. Más bien se trata de si se cumplen las condiciones para que estructuras complejas como la sociedad humana y su sistema económico perduren en el tiempo mientras colaboran al cumplimiento del segundo principio. ¿Cuáles son esas condiciones? Muy sencillo: que las fuentes de baja entropía disponibles suministren el “alimento” requerido para sostener el metabolismo de (toda) la vida y de la economía a un ritmo suficiente, dadas las condiciones de la Tierra.

Empecemos por una buena noticia. En el periodo temporal de varios miles de millones de años que nos interesa (lo que le queda de vida al sol antes de que crezca demasiado y abraza a la Tierra), hay unas fuentes de baja entropía con las que seguro podremos contar (texto en color azul en la figura 3, en la página siguiente): se trata de los flujos (tanto

solares como no solares) no relacionados con la vida, aquellos a los que podemos acceder sin la mediación de otros seres vivos.

Ahora viene la mala noticia: no tenemos garantizada ni la disponibilidad de los stocks (de cualquier origen) ni tampoco el acceso a los flujos de energía (sobre todo de luz solar, pero también geotérmico) de los que nos aprovechamos actualmente para subsistir gracias a la intermediación de la materia viva.

En el caso de los stocks de combustibles fósiles (y materiales que de ellos se derivan) y de minerales (tanto para usos materiales como energéticos) el peligro es el agotamiento. El factor que nos llevaría a ese escenario antes o después es que los stocks son finitos y están disminuyendo porque dependemos (cada vez más) de ellos.

Figura 3. Fuentes de baja entropía para la vida humana y disponibilidad en el largo plazo

	Origen solar	Otro origen
Stock	<ul style="list-style-type: none"> - Materiales derivados del petróleo (plásticos) - Combustibles fósiles 	<ul style="list-style-type: none"> - Minerales (energía) - Minerales (materiales) - Minerales (sustrato material de la vida) - Medio ambiente para la vida (agua dulce/salada, aire atmosférico)
Flujo	<ul style="list-style-type: none"> - Energía solar procesada por la vida vegetal y animal que utilizamos de alimento - Agua dulce (consumida por organismos vivos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Geotérmica (vida no humana)
	<ul style="list-style-type: none"> - Biomasa (energía y material) - E. Solar (térmica y fotovoltaica) - E. Eólica - E. Hidroeléctrica - E. Marina debido al flujo de luz solar (undimotriz y corrientes) - Energía mareomotriz (fuerza gravitatoria solar) 	<ul style="list-style-type: none"> - Energía geotérmica (aprovechamiento humano) - Energía mareomotriz (fuerza gravitatoria lunar)

Elaboración propia (zona sombreada: fuentes de baja entropía de las que depende la alimentación humana; color verde: fuentes de baja entropía que aprovechamos con la mediación de la vida no humana; color azul: fuentes de baja entropía que están aseguradas en el largo plazo)

Más compleja es la cuestión de las fuentes de baja entropía a las que actualmente accedemos gracias a la mediación de la vida no humana. El flujo de luz solar que alimenta la vida estará disponible, pero hay dos amenazas. Una es que el aprovechamiento de algunas formas de vida, sea para alimentación, para energía o para materiales, conlleve su desaparición. Un ejemplo es el de la pesca. Como todos los seres vivos, los peces tienen una determinada dinámica de perpetuación en el tiempo, y si explotamos esa forma de baja entropía a un ritmo excesivo, simplemente desaparecerá,

un fenómeno que ya es patente en la delicada situación de determinadas especies pesqueras en algunos caladeros. Otro ejemplo es el de la tala de árboles a un ritmo superior al que permite la regeneración de los bosques.

La segunda amenaza alude a los stocks no solares de los que la vida depende (sustrato mineral y medio ambiente -agua y aire). El riesgo aquí no es el agotamiento, sino que se rompan los ciclos que regulan la disponibilidad de los elementos clave, como el fósforo y el nitrógeno, o que el agua (dulce y salada) y/ o el aire atmosférico pierdan las características (composición, temperatura, salinidad, acidez, etc.) que hacen posible la vida. La vida evolucionó adaptada a esos stocks con unas condiciones determinadas, y cambios súbitos en los mismos (y décadas o siglos es muy poco tiempo en términos evolutivos) comprometen la supervivencia de la vida.

Si consumimos excesivamente rápido la vida de la que nos alimentamos esta forma de baja entropía dejará de estar disponible. Pero si los stocks de baja entropía que nutren la vida dejan de ser adecuados para cumplir su función (por la polución), el problema será el mismo.

El factor peligroso en este sentido es la polución, en cualquiera de sus formas. Valgan 3 ejemplos. La acumulación de mercurio puede envenenar un ecosistema, la sobreutilización de fertilizantes puede desequilibrar las condiciones del agua marina modificando la disponibilidad de oxígeno para algunas especies y, por último, la acumulación de gases de efecto invernadero y el cambio climático que provoca, con el consecuente incremento de las temperaturas, pueden obstaculizar seriamente la vida en determinados entornos. Todas estas circunstancias, en la medida en que tensan las condiciones de vida de todos los organismos (afectando a los stocks de los que estos dependen), pueden suponer cambios que potencialmente comprometan nuestra capacidad de acceso a la alimentación, es decir, de acceso a todas las fuentes de baja entropía de la zona sombreada de la figura 3 (y también la biomasa).

Dicho de otra forma, si consumimos excesivamente rápido la vida de la que nos alimentamos (sobrepesca o deforestación), esta forma de baja entropía dejará de estar disponible en el futuro. Pero si los stocks de baja entropía que nutren la vida dejan de ser adecuados para cumplir su función (por la polución), el problema será el mismo. Por cualquiera de las dos vías (consumir la vida o hacer inviable su subsistencia) perderíamos el acceso a todo el flujo de baja entropía originado en la luz solar al que ahora accedemos por mediación de la vida no humana (casilla inferior izquierda, texto en verde), ya sea para alimentación, o para usos energéticos y materiales a partir de la biomasa.

A la vista de lo anterior, la sostenibilidad en el largo plazo solo es posible si se cumplen tres condiciones bastante exigentes.

A la vista de lo anterior, la sostenibilidad en el largo plazo solo es posible si se cumplen tres condiciones bastante exigentes. Por una parte, ser capaces en el futuro de obtener toda la energía que precisamos de los flujos de luz solar, mareomotriz y geotérmico (los que están garantizados en el largo plazo, color azul en la figura 3), pues las pilas de luz solar, que eso es lo que son en esencia son los combustibles fósiles, son finitas. Actualmente no cumplimos esta condición. Estamos consumiendo esta fuente de baja entropía (carbón, petróleo y gas), un regalo geológico irreplicable para el cual de momento no tenemos sustituto, aunque quizá podamos encontrarlo.

La segunda condición es análoga a la anterior, pero referida a los minerales de los que depende la supervivencia material de nuestras sociedades. También en este caso estamos agotando (quizá de forma más lenta, aunque es difícil de determinar) una fuente de baja entropía que nos ha venido dada. Otro regalo geológico al que cada vez le damos bocados más y más grandes, a medida que se incrementan nuestras exigencias materiales.

Y la tercera condición es que debemos ser capaces de no dañar, con nuestro metabolismo económico, los ciclos y condiciones de los que depende la vida sobre la Tierra, sobre cuya salud descansa inevitablemente nuestra alimentación, es decir, nuestra supervivencia (además de los servicios energéticos y materiales que nos proporciona la biomasa). Esto parece que tampoco lo cumplimos. Estamos dañando también, por sobreexplotación y/o por alteración de condiciones ambientales, una fuente clave de baja entropía como es la biosfera. Su importancia, especialmente como fuente exclusiva de nuestra alimentación (celdas sombreadas en la figura 3) radica en que para ella no hay sustituto posible. Aunque llegáramos a la excelencia captando la energía solar para usos industriales, los seres humanos duraríamos muy poco tiempo sin las plantas. Sencillamente, no podemos “comer sol”.

En resumen, para lograr la sostenibilidad, deberíamos, en el largo plazo: i) deshacernos de la dependencia energética de un stock no renovable (combustibles fósiles) apañándonos con las energías renovables, que son flujos (solar y no solar); ii) evitar el agotamiento de otro stock no renovable, el de los materiales minerales para el que no tenemos sustituto; y iii) evitar el daño a la biosfera que, como fuente exclusiva de alimento, no tiene sustituto.

En el cumplimiento de las condiciones anteriores está la clave de la sostenibilidad. Un factor novedoso en términos de la historia de la humanidad añade algo más de premura al escenario: el cambio climático. Se trata de una consecuencia de un tipo de polución, un daño colateral de nuestro desarrollo basado en la combustión de carbón y petróleo que complica aún más el cumplimiento de las tres condiciones anteriores. Dado que dificulta la vida en la Tierra (porque obliga a los organismos a funcionar en un entorno en rápido cambio, al que no siempre se pueden adaptar), compromete nuestra capacidad de alimentarnos. Eso incrementa la exigencia en cuanto a cumplir la tercera condición: ya no se trata de “no dañar” la biosfera, sino que empieza a ser necesaria una “reparación” del daño ya causado, lo que supone una mayor dificultad.⁹

Además, el cambio climático hará del planeta un lugar probablemente más inhóspito para la vida humana tal y como la conocemos, con mayor incertidumbre y riesgos. Una mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, que ya estamos experimentando, puede implicar más gasto energético para hacer frente a temperaturas más extremas (picos de frío y de calor más intensos en zonas hasta ahora templadas y muy pobladas), o sea una dificultad añadida para cumplir la condición 1. Pero también supone que habrá que invertir más para construir infraestructuras nuevas y reparar las existentes a fin de adaptarse a la nueva situación, lo que supone más utilización de materiales, o sea más dificultad en cuanto a la condición 2.¹⁰

El cambio climático, en la medida en que provoque efectos cada vez más patentes (ya empiezan a serlo) estaría “alejando la línea de llegada”, es decir, complicándonos la tarea de la sostenibilidad, haciendo más complicado el cumplimiento de las 3 condiciones enunciadas.

A modo de resumen, la realidad parece ser que nuestra dinámica actual no nos acerca precisamente a un escenario de sostenibilidad. Dependemos fuertemente de combustibles y materiales agotables, fuentes de baja entropía solo parcialmente sustituibles con la tecnología actual; estamos dañando la biosfera (nuestra vía de acceso a unas fuentes de entropía insustituibles), alterando las condiciones ambientales y ciclos básicos que requiere la vida; y estamos

⁹ Esto, por cierto, también es aplicable a otros tipos de polución, como los microplásticos. Ya no estamos en la situación de plantearnos como objetivo “no dañar”, porque ya se han producido alteraciones sensibles. Así que en muchos casos se trata de “minimizar daños” o, incluso, de revertirlos.

¹⁰ Cerrando el círculo, la reparación de daños medioambientales a la que nos hemos referido tampoco es gratis, pues supone el empleo de recursos materiales y energéticos, así que, de nuevo, más dificultades para cumplir las condiciones 1 y 2.

provocando un cambio climático que puede agudizar las dinámicas anteriores, incrementando las exigencias sobre los stocks no renovables, y haciendo de la biosfera un lugar muy distinto en unas pocas décadas, un lugar menos amigable para una vida cuya capacidad de adaptación es amplia, pero no ilimitada.

Llegamos entonces a la pregunta clave de la sostenibilidad, que condensa todo lo anterior. Dada la dinámica actual que

¿qué tipo de sociedad debemos ser a fin de cumplir con las tres condiciones expuestas?... ¿cómo puede la humanidad llegar viva a ese escenario?

nos llevará en el largo plazo a un progresivo agotamiento de combustibles fósiles, a una progresiva (aunque no tan acuciante) escasez de materiales fácilmente disponibles, y a unos de ecosistemas cada vez más tensionados por la polución: ¿seremos capaces de alimentarnos a la vez que el sol satisface nuestra demanda de baja entropía energética para calentarnos, cocinar, reciclar los materiales utilizados y adaptarnos a las consecuencias de la polución acumulada?

Esta es la pregunta. Para estar en condiciones de responder afirmativamente (lese es el objetivo!), tenemos que resolver dos cuestiones, a cuál más peliaguda. La primera alude a ese futuro que debemos imaginar, en el largo plazo, para que la humanidad sea viable: ¿qué tipo de sociedad debemos ser a fin de cumplir con las tres condiciones expuestas? Es decir: ¿cómo debe ser ese futuro para que la humanidad sea sostenible?

Aunque conociéramos la respuesta, hay una segunda pregunta, aun más acuciante, porque nos interpela para el “aquí y ahora”: ¿cómo puede la humanidad llegar viva a ese escenario? Dicho de otra forma: asumiendo que sabemos cómo es el futuro que necesitamos ¿cómo llegamos hasta ahí?, ¿cómo nos las apañamos ahora para transitar exitosamente hacia la sostenibilidad, sin descarrilar en alguna de las muchas curvas peligrosas que a buen seguro surgirán?

A la luz de estas dos cuestiones, y de todo lo expuesto en epígrafes anteriores, surgen dos conclusiones. La primera: la sostenibilidad es relevante, trata de si somos viables como especie en el largo plazo. La segunda: para analizar esta cuestión deben tenerse en cuenta de forma integrada la energía, los recursos materiales y los desechos. Al menos esto es lo que sugiere un vistazo al listado de fuentes de baja entropía del epígrafe anterior. Veamos por qué.

Independientemente de su origen (solar o no solar) y de su presentación (stock o flujo), todas las fuentes de baja entropía a nuestro alcance nos sirven para obtener dos aportes: materia y energía con una organización adecuadamente compleja para sostener (y hacer perdurar) nuestra propia complejidad (baja entropía) como forma de vida. Pero ambas aportaciones trabajan inevitablemente juntas. Captar baja entropía en forma de energía (por ejemplo, extraer combustibles fósiles) requiere de estructuras materiales. A su vez, la extracción de materiales requiere de intensos aportes energéticos. No podemos pensar en satisfacer las necesidades energéticas sin las materiales, ni a la inversa. Ambas están fuertemente conectadas.

Por otra parte, la obtención tanto de materia como de energía, sea como organismo individual o como sistema económico, implica en todo caso la producción de desechos. Estos desechos, materiales de alta entropía fruto de nuestro metabolismo, siguen con nosotros, no desaparecen, y pueden comprometer la disponibilidad y calidad de otras fuentes de baja entropía (para uso energético o material) en el futuro, incluso a corto plazo. Valga recordar dos ejemplos que ya se han mencionado. El primero, la polución que pone en riesgo la salud de los ecosistemas, de los que depende en último término nuestra alimentación, esa fuente de baja entropía insustituible. El segundo, un tipo concreto de polución, los gases de efecto invernadero, que no solo tensan los ecosistemas, sino que modifican las exigencias tanto energéticas como materiales para la propia sociedad humana.

Así que los desechos, la polución, los residuos, como lo queramos llamar, ni desaparecen ni son ajenos a la cuestión de la energía y los materiales. Reducirlos parecería una buena idea, pero ¿cómo? Podríamos reducir la intensidad del metabolismo (el famoso “decrecimiento”), pero ¿sería asumible socialmente? Otra opción es no dar por perdidos los residuos, tratar de aprovecharlos, pero esto no es gratis entrópicamente. Reciclar es costoso energéticamente, y supone también un gasto material para diseñar la infraestructura industrial donde se realiza esa tarea. Podríamos también ser más eficientes para producir menos residuos (por ejemplo, reduciendo las emisiones de CO₂, en lo que se refiere al cambio climático) pero esto también tiene un coste entrópico. Transitar de una economía basada en energía fósil a otra en energía renovable es, incertidumbres tecnológicas aparte, un proceso intensivo en energía fósil y en la utilización de materiales muy específicos (las tierras raras).

Energía, materiales y polución: tres caras inseparables de un único proceso entrópico como es el metabolismo económico. Tres ámbitos entrelazados en los que la humanidad se juega su viabilidad.

Economía y sostenibilidad: temas, preguntas y algunas referencias

Como justificamos en el epígrafe anterior, lo que hagamos en cualquiera de estos tres ámbitos, materiales, energía y desechos, tiene consecuencias en los otros dos. Sin perder de vista este hecho, se propone a continuación un listado estructurado de los ámbitos relevantes de análisis en tres grupos de contenido: cuestiones del presente que debemos conocer mejor, preguntas que tienen que ver con el largo plazo y, por último, otras referidas al corto y medio plazo.

Cuestiones que debemos entender mejor

Necesitamos, para empezar, profundizar nuestra comprensión de las 3 facetas de la sostenibilidad: los materiales, la energía y la polución. En cuanto a los materiales, la cuestión técnica básica alude a su extracción: cómo se realiza, cuál es la tecnología requerida o qué efectos medioambientales tiene la actividad minera, etc. (Valero, Valero, y Calvo 2021).

En materia de energía, debemos conocer mejor las distintas fuentes de energía y sus características: desde las más densas energéticamente pero difíciles de controlar (nuclear) a las que poseen una menor densidad energética pero son

Una cuestión básica es que, de momento, solo podemos obtener energía no fósil si contamos con combustibles fósiles en la trastienda.

muy difíciles de concentrar y almacenar (solar), pasando por las fósiles, que al margen de sus efectos colaterales ofrecen unas prestaciones difíciles de igualar: gran densidad energética, fácilmente controlables y almacenables (Georgescu-Roegen

2021d; González Reyes 2022). También es necesario conocer el punto en que nos encontramos en cuanto a combustibles fósiles, con la discusión alrededor de si se ha alcanzado ya o cuándo se alcanzará el pico de producción de cada uno de ellos (Turiel 2022).

Parece necesario además conocer la historia de la humanidad y la energía (Fernández Durán y González Reyes 2018a; Smil 2021), así como, con esa perspectiva histórica, los retos a los que nos enfrentamos actualmente en materia de energía (Smil 2022). Una cuestión básica es que, de momento, solo podemos obtener energía no fósil si contamos con combustibles fósiles en la trastienda. De momento, ni los reactores nucleares ni los paneles solares se pueden fabricar sin contar con combustibles fósiles. Las placas solares no sirven para producir más placas solares.

En materia de polución, hay que mencionar para empezar el fenómeno del cambio climático, quizá el ámbito de la sostenibilidad hasta el momento más analizado y en el que las ciencia internacional ha trabajado en común de forma

más decidida para ofrecer una visión permanentemente actualizada del estado de la cuestión y las perspectivas futuras (Bennett 2019; International Panel for Climate Change 2022; Lomborg 2021; W. D. Nordhaus 2013; Thunberg 2022; Wallace-Wells 2019). Pero no es este el único efecto de la polución. El planeta tendría diversos límites, asociados a los ciclos de algunos elementos químicos, a la capacidad de soportar partículas extrañas como los plásticos, etc., muchos de los cuales se habrían superado ya, como detalla el artículo de Nature de Rockström et al. (2023).

Además de materiales, energía y polución, una cuarta cuestión que necesitamos comprender mejor es la situación de la

Los dilemas medioambientales a que nos enfrentamos no son el resultado del azar, sino de un determinado comportamiento de los actores implicados, que operan bajo los incentivos que proporciona el sistema económico, definidos por una multiplicidad de factores, como la estructura de poder económico o político o factores históricos, entre otros.

frontera científica y tecnológica en ámbitos relevantes para la sostenibilidad. Valgan dos ejemplos: el desarrollo de baterías más potentes y duraderas que acumulen la electricidad obtenida de fuentes renovables, o la posibilidad de llegar a obtener energía de la fusión nuclear. No parece posible encontrar un punto razonable entre un ingenuo optimismo tecnológico y un desesperanzado colapsismo energético sin recabar

conocimiento experto sobre estas cuestiones científicas y tecnológicas. ¿Son posibles avances que supongan un cambio en las restricciones medioambientales? ¿Son plausibles? ¿Es posible estimar plazos?

Por último, parece también relevante comprender cómo hemos llegado hasta aquí. Los dilemas medioambientales a que nos enfrentamos no son el resultado del azar, sino de un determinado comportamiento de los actores implicados, que operan bajo los incentivos que proporciona el sistema económico, definidos por una multiplicidad de factores, como la estructura de poder económico o político o factores históricos, entre otros. Sin entender por qué llegamos hasta aquí, difícilmente podremos reflexionar de forma útil sobre qué hacer.

Preguntas de largo plazo

En el largo plazo, surgen preguntas tanto o más interesantes que las anteriores. En cuanto a los materiales que obtenemos mediante la minería, la cuestión principal es, por supuesto, su posible agotamiento. Agotamiento no quiere decir que “desaparezcan”, sino que dejen de estar disponibles en la forma en que los encontramos actualmente, concentrados (con baja entropía) en minas. ¿Llegará un momento en que la minería actual se transformará en la llamada “minería urbana”, que trataría de obtener materiales de los vertederos en que todos los residuos que no se queman habrán sido mezclados durante décadas o siglos? ¿De qué plazos temporales hablamos antes de que escaseen los materiales “fácilmente extraíbles”, es decir, con baja entropía? (Valero, Valero, y Calvo 2021; Valero, Calvo, y Valero 2022).

En materia energética, algunas cuestiones son: ¿en qué plazo es plausible que se agoten los combustibles fósiles? De producirse este agotamiento ¿supondría el fin del capitalismo por el colapso energético? (Fernández Durán y González Reyes 2018b). Por último, el análisis de la polución nos lleva a proyectar, para empezar, los efectos del cambio climático. ¿Estaremos en el “planeta inhóspito” que pronostica David Wallace-Wells (2019)? ¿Quizá el problema venga de otra polución distinta a la de los gases de efecto invernadero, relacionada con los otros límites planetarios que ya estaríamos superando (Rockström y et al. 2023)? Está claro que en ese futuro con polución la Tierra continuará existiendo, pero la pregunta es qué restricciones impondrá el medio ambiente a las condiciones de vida de los seres humanos que la habiten. Y, por cierto ¿cómo de lejos está ese futuro?

Esto nos lleva a una cuestión que ha adquirido vida propia como ámbito de análisis: la posibilidad de que la civilización humana llegue a un colapso. Este término no tiene una definición cerrada. En ocasiones significaría una “senda hacia la desaparición”, mientras González Reyes lo interpreta como una pérdida de complejidad en la red de nodos que

El “colapsismo” está cobrando cada vez más relevancia dentro del ámbito de la sostenibilidad.

conforma la sociedad (González Reyes 2021). Por su parte, Santiago (2023) apunta a que, en general, quienes utilizan este término se están refiriendo de forma más o menos explícita a

una sociedad que sobrevive, pero en unas condiciones materiales y políticas que podríamos equiparar a las que presenta un “estado fallido” en el que, entre otros muchos problemas, puede haber dificultades o estrecheces para satisfacer las necesidades básicas de la población.

Sea cual sea el significado preciso que queramos otorgar al concepto de colapso, lo cierto es que el “colapsismo” está cobrando cada vez más relevancia dentro del ámbito de la sostenibilidad. En ocasiones, se habla de colapso como un escenario plausible al que se llegaría bien por la acelerada modificación del clima (Wallace-Wells 2019), por el agotamiento de la energía (Fernández Durán y González Reyes 2018b), o por el agotamiento de todo tipo de recursos de los que requiere la especie humana (Meadows et al. 1972).

Pero hay más versiones. Por ejemplo, en el ámbito de los materiales, Valero, Valero y Calvo (2021) plantean un

La humanidad, con su producción intensiva en el uso de materiales para bienes de consumo de una vida útil muy corta, estaría gastando esta pila sin ser consciente de que, en algún momento, deberá invertir muchos más recursos (¡energéticos y materiales!), mucha más “baja entropía”, para poder extraer estos minerales que ya no serán tan fácilmente accesibles.

escenario futuro denominado Thanatia, en el que los minerales estarían homogéneamente distribuidos por la corteza terrestre. Es decir, no existirían ya “depósitos” de mineral concentrado con baja entropía de donde obtener materiales que necesitamos con un coste reducido (como ocurre ahora). Para estos autores, Thanatia no constituye un vaticinio, sino más bien un escenario de referencia con respecto al cual poder medir, en términos de exergía,

cuán valiosa es la “pila de baja entropía” de la que todavía disfrutamos actualmente por el hecho de poder extraer minerales que se encuentran concentrados en determinados lugares. La humanidad, con su producción intensiva en el uso de materiales para bienes de consumo de una vida útil muy corta, estaría gastando esta pila sin ser consciente de que, en algún momento, deberá invertir muchos más recursos (¡energéticos y materiales!), mucha más “baja entropía”, para poder extraer estos minerales que ya no serán tan fácilmente accesibles.

El colapso también admite una aproximación histórica, en dos sentidos. Por una parte, ya hay distintas sociedades humanas que colapsaron, como documenta Diamond en su libro Colapso (Diamond 2005). Se trata de un análisis muy interesante, porque los retos a los que se enfrentaron, sin éxito, aquellos grupos humanos, comparten sugestivas similitudes con los que afrontamos en la actualidad, aunque la analogía no es total, porque el papel de la tecnología nos coloca en una posición distinta a la de aquellos grupos que no lograron subsistir. Ahora bien, ¿tenemos garantizada nuestra supervivencia gracias a nuestro superior desarrollo tecnológico si nos comparamos con los grupos humanos que colapsaron en el pasado? ¿Nos salvará, si es que lo hace, nuestro superior nivel científico-tecnológico o nuestra superior capacidad de incrementarlo, o ambos?

Por otra parte, existe una historia del propio concepto de colapso de la humanidad, entendido como vaticinio, que se remonta al menos a las predicciones de Malthus sobre la imposibilidad de que una humanidad que crecía exponencialmente pudiera alimentarse de unos recursos comestibles que, como mucho, podrían crecer linealmente.

¿Qué podemos aprender de la historia del colapso humano como vaticinio? ¿Por qué fallaron las versiones anteriores? ¿Qué hay de distinto, si es que lo hay, en la actual versión del vaticinio colapsista?

El análisis del colapso admite también una discusión radicalmente distinta. El colapso no sería un escenario hipotético del futuro, fruto de unas restricciones “entrópicas” a las que, quizá, estamos abocados, sino una realidad actual para

La economía política define cómo se reparten las cartas en la sociedad en materia de oportunidades, y ese reparto ya está produciendo situaciones de colapso. Pero los límites medioambientales podrían imponer más restricciones aun al conjunto de sociedades humanas, reduciendo el número de naipes a repartir, y eso también es relevante.

una importante parte de la población mundial, resultado de una pugna de intereses, de una economía política en la que algunos, las personas desposeídas, llevan perdiendo la partida desde que existen registros históricos. Y todo sin necesidad de que se agudice el cambio climático o de que se agote el petróleo. Preocuparse del colapso futuro sería un lujo que solo la parte privilegiada de la población mundial puede

permitirse, aquella que no lo está viviendo ya de forma rutinaria. Este punto de vista es interesante, aunque la constatación de que el colapso presente es el día a día para una parte de la población mundial no niega la relevancia del posible colapso futuro por restricciones medioambientales globales. La economía política define cómo se reparten las cartas en la sociedad en materia de oportunidades, y ese reparto ya está produciendo situaciones de colapso, las ha producido siempre. Pero los límites medioambientales podrían imponer más restricciones aun al conjunto de sociedades humanas, reduciendo el número de naipes a repartir, y eso también es relevante.

Por último, en el campo de conocimiento colapsista se discuten también las posibilidades de escape de la distopía. Por ejemplo, ¿es realista pensar en colonizar otros planetas como salida a los dilemas medioambientales que tenemos en el nuestro? No parece algo viable. Pasando por alto la cuestión de quién podría acceder a abandonar el planeta (con la tecnología actual, está claro que solo podrían unas pocas personas), parece difícil que cualquier grupo humano pueda llevarse fuera de la Tierra, a modo de equipaje, todo lo que necesita para subsistir. ¡Necesitaría una pequeña versión de la biosfera! Teniendo que cuenta que la vida en la Tierra es un fenómeno absolutamente adaptado a las condiciones del planeta en que surgió, trasplantar esas condiciones a otro planeta no parece posible.

Preguntas de corto y medio plazo

En el corto y medio plazo, las cuestiones relevantes que hemos identificado se dividen en tres ámbitos: estrategias de análisis, estrategias de actuación técnica y estrategias políticas.

En cuanto a las estrategias de análisis, es interesante plantearse: ¿para qué sirve ahora manejar el concepto de colapso como escenario? Puede utilizarse como un escenario de referencia que permita una suerte de medición de un proceso

Habría otro tipo de colapsismo que entiende el colapso como indiscutible, pero como algo en cierto sentido esperanzador, pues un futuro a la fuerza más austero podría abrir opciones a una sociedad más justa.

de incremento entrópico, como es el caso del escenario Thanatia que ya se ha comentado en relación a la extracción de minerales (Valero, Valero, y Calvo 2021). Diamond, en cambio, utiliza el concepto como un aviso a navegantes: “¡Cuidado! Esto nos puede pasar

también a las sociedades actuales”, así que conviene aprender de nuestros errores pasados para no repetirlos (Diamond 2005). En esta misma línea, con vocación de movilizar el cambio social, estaría la advertencia sobre los devastadores efectos del cambio climático que plantea Wallace-Wells en su Planeta Inhóspito (Wallace-Wells 2019). Por último, habría otro tipo de colapsismo (Riechmann 2022; González Reyes 2022; 2021) que entiende el colapso, por una parte,

como indiscutible, pero por otro como algo en cierto sentido esperanzador, pues un futuro a la fuerza más austero podría abrir opciones a una sociedad más justa, planteamiento que también admite críticas decididas (Santiago 2023).

En cuanto a las estrategias de actuación técnica, la discusión es amplísima. Si nos centramos en la energía, las preguntas son tremendas: ¿cómo organizamos la sustitución de energía fósil por energías renovables? ¿es posible esta sustitución, cuando, de momento, las renovables no son realmente tan “renovables” porque requieren aun de un protagonismo importante de la energía fósil? (González Reyes 2022; Carpintero y Nieto 2022; Foxon 2017). Desde el punto de vista energético, surge también la cuestión del decrecimiento, como algo modelizable (Carpintero y Nieto 2022; Lallana 2022), que se discute si es inevitable (o sea, si llegaremos a decrecer por las buenas o por las malas) (Carpintero y Nieto 2022), o si es la solución a la cuestión de la sostenibilidad (Hickel 2021). Desde una posición muy diferente, Branco Milanovic, economista experto en evolución de la desigualdad, argumenta fuertemente sobre lo inviable que sería políticamente el decrecimiento en una democracia (Milanovic 2021).

En cuanto a los materiales, las preguntas surgen alrededor del reciclaje o, si ampliamos el foco, la economía circular, algo que para Valero et al. (2022) es una quimera. Plantear que, vía reutilización y reciclaje podríamos tener una economía realmente circular sería volver a la fantasía de la descripción económica estándar, en que la economía es un círculo cerrado que puede funcionar de forma perpetua sin ninguna restricción externa. Para estos autores, habría un “avance entrópico” inevitable provocado por el sistema económico, en cuanto a degradación de fuentes materiales de baja entropía. Nuestra sociedad actual estaría provocando un avance muy rápido, con una trayectoria recta, mientras que una (ilusoria) economía perfectamente circular detendría ese avance, haciendo que la economía no se moviera de su nivel entrópico. La realidad, sin embargo, podría situarse en el mejor de los casos en una trayectoria espiral, en que el avance entrópico es innegable, pero no tan rápido como en la actualidad, porque el reciclaje y la reutilización permiten que el entorno no se degrade tan rápidamente.

Los dos ámbitos anteriores, energía y polución, ofrecen también una interesante dimensión de análisis combinado: escapar de la dependencia a la energía fósil desarrollando las energías renovables implica adquirir una nueva dependencia, en este caso con determinados materiales (las “tierras raras”) de los que depende fuertemente la fabricación de dispositivos como paneles solares o aerogeneradores (Valero, Calvo, y Valero 2022). Esto no quiere decir que no debamos avanzar en esta dirección, simplemente que debemos ser conscientes de lo que implica.

En el ámbito de la polución, destaca la cuestión central de cómo abordamos el cambio climático y sus consecuencias. En primer lugar, autores como Lomborg (2021) defienden de forma contundente que no debiéramos dedicar demasiados recursos a tratar de mitigar algo que ya es, en gran medida, inevitable, y que sería muy complejo y costoso detener, si es que es posible lograrlo.¹¹

Sin embargo, otros autores asumen que merece la pena luchar contra el cambio climático, y entonces el abanico que se abre tiene que ver con cómo lograrlo y con qué políticas. La modelización del crecimiento económico para averiguar el impuesto al carbono que reduciría las emisiones de forma óptima (W. D. Nordhaus 2013; 1993; W. Nordhaus y Sztorc 2013), la discusión de políticas y áreas de trabajo (International Monetary Fund 2021; 2019), las relevantes implicaciones macroeconómicas que supondría una política realmente decidida de reducción de emisiones (Pisani-Ferry 2021), o las exigencias que tal enfoque impondría sobre la política monetaria (Daly 2021), son solamente algunos

¹¹ In 2008, Lomborg argued that it did not make sense to put all efforts into halting climate change when there were more pressing (and cheaper to solve) problems already plaguing poorer countries, such as hunger or lack of access to clean water (Lomborg 2008).

de los temas más debatidos. Para cerrar el bloque de cuestiones técnicas, vale la pena mencionar una enmienda a la totalidad: ¿sirve de algo “lo sostenible”? ¿o es un mero nicho de mercado con el que los movimientos sociales se entretienen y algunas empresas ganan prestigio y dinero, pero con resultados poco más que cosméticos? (Escrivà 2023).

El tercer bloque de cuestiones sobre las que pensar en el corto y medio plazo apunta a las estrategias de actuación política. Si llegamos a comprender lo que ocurre y lo que habría que hacer en materia de sostenibilidad: ¿cómo identificar las políticas que podrían ser útiles? ¿cuáles de estas serían realistas? ¿cuáles serían progresistas? Por ejemplo, la imposición verde (impuesto al carbón) indirecta es fiscalmente regresiva, y también hay mucho debate sobre si las ayudas al coche eléctrico tienen sentido medioambientalmente, y cuál es su efecto sobre la distribución de la renta.

Es también interesante preguntarse cómo se consiguen reunir fuerzas sociales que apoyen cambios políticos para no llegar a lo peor, al colapso. En este sentido, ¿el “colapsismo” es útil para movilizar en favor de frenar la degradación medioambiental? Para Santiago (2023) la respuesta es que no. La insistencia en una supuesta certeza de colapso futuro, lejos de suponer un reto para el sistema imperante, sería casi tranquilizador para el mismo, pues supondría que el propio movimiento ecologista ha asumido un planteamiento de que no existe alternativa posible, con lo que ¿para qué preocuparse?, ¿para qué protestar?

Los problemas para movilizar en favor de la sostenibilidad irían más allá del colapsismo. Incluso aunque el desánimo colapsista no cunda, no parece fácil motivar a la sociedad para que se mueva bajo el incentivo de “evitar futuros daños medioambientales”. No es un lema especialmente ilusionante, en esos términos. Es un reto cómo lograr un relato más seductor.

Imaginando que supiéramos no solo qué hacer y por medio de qué políticas, sino también que se contara con el apoyo social para convertir esas ideas en políticas reales, aún no hemos acabado con todos los problemas. ¿Cómo se gestiona políticamente la transición hacia una economía más sostenible, un proceso que genera inevitablemente sectores objetivamente perjudicados en sus intereses de corto plazo (o que, como mínimo, se percibirán a sí mismos como perjudicados)? ¿Cómo se compensa a esta parte de la ciudadanía por los costes que puede implicar la transición? ¿Cómo se le convence para que apoye esa transición, y no respalde en cambio opciones políticas que prometen detenerla o que incluso niegan la problemática de partida? Estamos viendo ya tensiones de ese tipo en la actualidad, siendo un ejemplo de manual el problema alrededor del acceso al agua para uso agrícola en la zona que circunda el Parque Nacional de Doñana, en Andalucía.

Ideas finales

En este documento se han aclarado algunas nociones básicas de física, como la entropía y el segundo principio de la termodinámica, así como su relevancia para el análisis del sistema económico y, en particular, de la sostenibilidad. También se ha ofrecido una panorámica de algunas cuestiones relevantes relacionadas con la sostenibilidad en las que el debate actual es más activo.

Como se advirtió en la introducción, el listado de temas planteados no ha pretendido ser exhaustivo, ni tampoco era el objetivo arrojar conclusiones claras al respecto. Ojalá algunas o muchas de las preguntas esbozadas estén ya resueltas en la abundante bibliografía que existe y en la que quien escribe este texto se propone profundizar de ahora en

adelante. Para acometer ese trabajo, pueden ser útiles cuatro ideas finales que surgen de todo lo discutido y que se exponen a continuación.

La primera condensa la importancia del tema que nos traemos entre manos. La sostenibilidad es relevante porque aborda la cuestión de si la humanidad será sostenible, es decir, viable en el largo plazo. Para alcanzar la sostenibilidad, que actualmente no está garantizada, deberemos averiguar: i) cómo debe ser la sociedad humana del futuro a fin de satisfacer las condiciones que impone la sostenibilidad (primera: utilizar exclusivamente fuentes energéticas renovables; segunda: no agotar el stock de materiales que nos ha regalado la geología terrestre; tercera: no esquilmar la biosfera ni hacer inviable su sostenimiento); y ii) cómo puede la humanidad llegar viva a ese escenario. Ambas preguntas, a cuál más compleja, permanecen de momento sin respuesta.

La segunda idea es que la interrelación entre energía, materiales y desechos es inherente a la naturaleza del sistema económico, en tanto que sistema entrópico que permite organizar la satisfacción de las necesidades de los seres humanos. En cada uno de estos tres ámbitos existen restricciones reales o potenciales para la sostenibilidad de la sociedad humana tal y como la conocemos, pero estas restricciones no son independientes entre sí, pues hay fuertes canales de influencia entre ellas. Así que debiéramos ser capaces de alcanzar una perspectiva de conjunto, imprescindible para lograr cierta coherencia en la acción por la sostenibilidad.

La tercera idea retoma el hilo anterior: la interrelación entre energía, materiales y desechos es a menudo desatendida cuando se analiza algo que tiene que ver con la sostenibilidad. Una parte mayoritaria de las contribuciones al conocimiento de la sostenibilidad y los dilemas que plantea proviene de ámbitos concretos, o bien la energía, o bien los materiales o bien la polución en alguna de sus versiones (cambio climático, microplásticos, otros contaminantes...). Todas estas contribuciones son imprescindibles, pero llama la atención la escasez de trabajos que exploren las implicaciones cruzadas de los distintos ámbitos, que permanecen bastante impermeables unos de otros, como si la conexión entre ellos fuera un elemento accesorio, cuando parece una cuestión central. Esto probablemente está limitando el alcance, relevancia y utilidad de las recomendaciones que se derivan de los análisis realizados.

La cuarta y última idea se refiere a qué hacer, desde un punto de vista metodológico. Si las cuestiones relevantes en materia de sostenibilidad (energía, materiales y residuos) están fuertemente interrelacionadas, quizá debamos apostar por una interdisciplinariedad que nos permita no solo rellenar de conocimiento todo el mapa de cuestiones pendientes, sino conectar esos elementos de conocimiento entre sí. La interdisciplinariedad no implica que cada cual deba analizarlo todo. Es necesaria la especialización para hacer contribuciones relevantes en cualquier ámbito, y de hecho necesitamos contribuciones relevantes en todos los ámbitos. Pero también precisamos poner en común todas las piezas.

Una posibilidad para avanzar en esta dirección es tomar ejemplo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), la organización intergubernamental de Naciones Unidas. El IPCC se ha erigido como la voz más autorizada en materia de ciencia sobre el cambio climático, fruto de un trabajo enormemente coral.

Tenemos que ser capaces de pensar en las implicaciones sociales y políticas de lo que nos traemos entre manos y de comprender cómo hemos llegado hasta aquí (lo cual responde a factores científicos y técnicos, pero también políticos, sociológicos e históricos).

Sin embargo, dada la complejidad y alcance de las preguntas que debemos responder, probablemente necesitemos un Panel de Sostenibilidad aun más coral de lo que es el IPCC. Todas las dimensiones de la sociedad humana se ven interpeladas por la cuestión de la sostenibilidad, más si tenemos en cuenta la magnitud de las transformaciones

(tecnológicas, económicas, sociales y políticas) que probablemente sean necesarias para transitar hacia una sociedad humana sostenible. Ello, unido a lo complicado que nos resulta a los seres humanos incorporar el futuro en nuestra toma de decisiones presentes, hace que la tarea de conocer los dilemas de la sostenibilidad desde un punto de vista científico y técnico (tarea en absoluto menor) no baste.

Tenemos que ser capaces de pensar en las implicaciones sociales y políticas de lo que nos traemos entre manos. Tenemos que ser capaces de comprender cómo hemos llegado hasta aquí (lo cual responde a factores científicos y técnicos, pero también políticos, sociológicos e históricos). Y si llegamos a determinar qué rumbo tomar, tenemos que encontrar la forma de sortear los obstáculos y resistencias que surgirán (que ya están surgiendo), como ocurre en cualquier proceso de transformación social.

Así que un panel de personas expertas en, por ejemplo, biología, física, química, ingeniería y economía (campos de conocimiento bien representados en el IPCC), aun siendo imprescindible, no estaría probablemente a la altura del reto que se plantea. Harán falta más voces de más ámbitos: sociología, historia, antropología, filosofía, relaciones internacionales...todas las voces posibles, de todas las disciplinas, con la única condición de querer contribuir a un debate constructivo, porque se trata previsiblemente de cambiar la sociedad tal y como la conocemos. El reto parece urgente, aunque es difícil determinar con precisión cuánto, y además la urgencia en cada una de las dimensiones implicadas será probablemente distinta.

Emular al IPCC parece un primer paso necesario en esta dirección, ya que se trata de replicar algo que ya hemos sido capaces de crear. Luego habrá que mejorarlo. Desde luego, no parece una buena alternativa confiar en que la cooperación interdisciplinar que se requiere vendrá de forma natural gracias a los incentivos que ofrece la academia, pues esta fomenta más bien una hiperespecialización en compartimentos estancos y claramente separables del resto. Sin negar la necesidad de especialización, necesitamos algo que la haga compatible con un mayor trabajo compartido.

Dedicarse a la sostenibilidad desde la biología puede sonar casi convencional. Hacerlo desde la ingeniería o la economía, desde la política, la sociología o la filosofía, resulta "alternativo", pero hacerlo desde la física o las matemáticas, la historia o las relaciones internacionales, es casi extravagante. Si promover el trabajo en común de personas de todas estas disciplinas suena a tarea difícil, pretender que ese trabajo interdisciplinar florezca espontáneamente es directamente utópico. El reto es que deje de serlo.

Referencias bibliográficas

- Bennett, Jeffrey. 2019. Calentamiento global. Ediciones Mensajero.
- Brodianski, V.M. 1990. Móvil perpetuo antes y ahora. Moscú: Mir.
- Carpintero, Óscar, y Jaime Nieto. 2022. «Transición energética y escenarios postcrecimiento». Papeles de relaciones ecosociales y cambio global 156.
- Daly, Mary C. 2021. «Climate Risk and the Fed: Preparing for an Uncertain Certainty». 2021-17. FRBSFEconomic Letter. <https://www.frbsf.org/economic-research/files/el2021-17.pdf>.
- Diamond, Jared. 2005. Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen. Barcelona: Debate.
- Escrivà, Andreu. 2023. Contra la sostenibilidad. Arpa.
- Fernández Durán, Ramón, y Luis González Reyes. 2018a. En la espiral de la energía (vol 1): Historia de la humanidad desde el papel de la energía. 2a. Ecologistas en acción. https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/adjuntos-spip/pdf/en-la-espiral-de-la-energia_vol-1.pdf. ———. 2018b. En la espiral de la energía (vol 2): Colapso del capitalismo global y civilizatorio. 2a. Ecologistas en acción. https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/adjuntos-spip/pdf/en-la-espiral-de-la-energia_vol-1.pdf.
- Feynman, Richard. 1963. Lectures on physics (vol 1). Caltech's Division of Physics, Mathematics and Astronomy and The Feynman Lectures Website. <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>.
- Foxon, Timothy J. 2017. Energy and Economic Growth. Routledge.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1971. The entropy law and the economic process. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press. ———. 2021a. «Bioeconomía: una nueva mirada a la naturaleza de la actividad económica». En Ensayos bioeconómicos, editado por Óscar Carpintero. Catarata. ———. 2021b. «La crisis de los recursos naturales». En Ensayos bioeconómicos, editado por Óscar Carpintero. Catarata. ———. 2021c. «La ley de la entropía y el problema económico». En Ensayos bioeconómicos, editado por Óscar Carpintero. Catarata. ———. 2021d. «Mitos sobre la energía y la materia». En Ensayos bioeconómicos, editado por Óscar Carpintero. Catarata.
- González Reyes, Luis. 2021. Sobrevivir al descalabro. <https://www.youtube.com/watch?v=gIBN3jZg6c>. ———. 2022. «Crisis energética». Papeles de relaciones ecosociales y cambio global 156.
- Hickel, Jason. 2021. Less is more. London: William Heinemann. International Monetary Fund. 2019. «The economics of climate». Finance and development. <file:///C:/Users/PA.5057166/Downloads/FD-12-2019.pdf>. ———. 2021. «No time to waste». Finance and development. <file:///C:/Users/PA.5057166/Downloads/fd0921.pdf>.
- International Panel for Climate Change. 2022. «IPCC Sixth Assessment Report». <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- Lallana, Martín. 2022. «Descenso energético: escenarios, estrategias y redistribución». Papeles de relaciones ecosociales y cambio global 156.
- Lomborg, Bjorn. 2008. En frío. Espasa. ———. 2021. Falsa alarma. Antoni Bosch Editor.
- Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, y William W. Behrens. 1972. The limits to growth. New York: Universe Books.
- Milanovic, Branko. 2021. «El pensamiento mágico de los decrecentistas». Letras libres, mayo de 2021. <https://letraslibres.com/economia/el-pensamiento-magico-de-los-decrecentistas/>.
- Nordhaus, William D. 1993. «Optimal greenhouse-gas reductions and tax policy in the "DICE" model». The American Economic Review 83 (2): 313-17. ———. 2013. The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world. Yale University Press.
- Nordhaus, William, y Paul Satoric. 2013. «DICE 2013R: Introduction and User's Manual». http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf.
- Pathria, R.K. 1996. Statistical mechanics. 2a. Butterworth-Heinemann.
- Pisani-Ferry, Jean. 2021. «Climate Policy is Macroeconomic Policy, and the Implications Will Be Significant». Policy brief. Peterson Institute for International Economics. <https://www.piie.com/publications/policy-briefs/climate-policy-macroeconomic-policy-and-implications-will-be-significant>.
- Riechmann, Jorge. 2022. «Autolimitarnos para que pueda existir el otro». Papeles de relaciones ecosociales y cambio global 156.
- Rockström, Johan, y et al. 2023. «Safe and just Earth system boundaries». Nature, mayo.
- Rovelli, Carlo. 2018. El orden del tiempo. Anagrama.
- Santiago, Emilio. 2023. Contra el mito del colapso ecológico. Arpa.
- Schneider, Erich E., y Dorion Sagan. 2008. La termodinámica de la vida. Tusquets.
- Schrödinger, Erwin. 1990. ¿Qué es la vida? Tusquets.
- Smil, Vaclav. 2021. Energía y civilización. Una historia. Arpa editores. ———. 2022. How the World Really Works. Viking Pr.

- Thunberg, Greta, ed. 2022. El libro del clima. Lumen.
- Tipler, Paul A. 1994. Física. 3a. Barcelona: Reverté.
- Turiel, Antonio. 2022. Sin energía. Alfabeto.
- Valero, Alicia, Guiomar Calvo, y Antonio Valero. 2022. «Thanatia. Límites minerales de la transición energética». Papeles de relaciones ecosociales y cambio global 156.
- Valero, Alicia, Antonio Valero, y Guiomar Calvo. 2021. The Material Limits of Energy Transition: Thanatia. Springer.
- Wallace-Wells, David. 2019. El planeta inhóspito. Debate.
- Zemansky, Mark W. 1973. Calor y termodinámica. Aguilar.

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
- Erald Kolasi: [La Física del Capitalismo](#)
- Erald Kolasi: [Energía, Crecimiento Económico y Crisis Ecológica](#)
- Erald Kolasi: [El Estado Ecológico](#)
- Johan Rockström et al: [Los Límites Seguros y Justos del Sistema Tierra](#)
- Will Steffen et al: [Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno](#)
- Alejandro Pedregal y Juan Bordera: [Hacia un Decrecimiento Ecosocialista](#)
- John Bellamy Foster: [Decrecimiento Planificado: Ecosocialismo y Desarrollo Humano Sostenible](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [La Insoportable Falta de Conciencia de Nuestra Crisis Ecológica Existencial](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [Transitando a Geocracia — Paradigma de la Gente y el Planeta y No el Mercado — Primeros Pasos](#)
- Giorgos Kallis: [La Alternativa del Decrecimiento](#)

❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un etos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.

❖ **Acerca del autor: Pablo Aguirre Carmona:** Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Estructura Económica y Economía del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Madrid desde 2020.



❖ **Acerca de este trabajo:** Entropía, economía y sostenibilidad: alguna aclaración conceptual y muchas preguntas fue publicado originalmente en castellano por la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad Autónoma de Madrid en octubre de 2023 con licencia Creative Commons, CC-BY-NC-ND 4.0.

❖ **Agradecimientos:** Este trabajo se ha beneficiado de los muchos comentarios e ideas que surgieron al discutir una versión preliminar con Ángel Vilariño, Rafael Padilla, Mariu Ruiz-Gálvez, Manuel Gracia, Fernando Luengo, Lucía Vicent, Nuria Alonso, Mario Rísquez y David Trillo. Gracias a todos y todas, pues vuestra curiosidad y constancia para proponer temas y plantear discusiones a lo largo de todos estos años están en la base de este documento. Gracias también a mi padre, Eduardo Aguirre, quien leyó un segundo borrador haciéndome numerosas sugerencias muy útiles. Por último, la identificación de la planta que aparece en la portada se la debo a Javier López Llorens (y a toda su red de contactos), de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural (Universidad Politécnica de Madrid). Por supuesto, las limitaciones, errores e imprecisiones del texto son responsabilidad exclusiva del autor.

❖ **Cite este trabajo como:** Pablo Aguirre Carmona: Entropía, economía y sostenibilidad: alguna aclaración conceptual y muchas preguntas – La Alianza Global Jus Semper, mayo de 2024. Este ensayo ha sido publicado bajo Creative Commons, CC-BY-NC-ND 4.0. Se puede reproducir el material para uso no comercial, acreditando a los autores y proporcionando un enlace al editor original.

❖ **Etiquetas:** Democracia, Capitalismo, entropía, energía, materiales, polución, sostenibilidad, colapso, decrecimiento.

❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

© 2024. La Alianza Global Jus Semper
 Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html
 Correo-e: informa@jussemper.org