



Jorge Riechmann

un poquito de física, un poquito de matemáticas, un poquito de economía política¹

“El fracaso inescapable de una sociedad basada en el crecimiento y en su destrucción de los sistemas vivos de la Tierra son los hechos apabullantes de nuestra existencia. Como resultado, casi no son mencionados en ninguna parte. Constituyen el gran tabú del Siglo XXI, los temas garantizados para enajenar a amigos y vecinos. Vivimos como si estuviésemos atrapados dentro de un suplemento dominical: obsesionados por la fama, la moda y los tres elementos básicos aburridos de la conversación de clase media: recetas culinarias, innovaciones tecnológicas y centros turísticos.”²

George Monbiot

Pero cómo puede ser, nos preguntamos una y otra vez, que en esta sociedad pomposamente autobautizada “del conocimiento”, donde ciertamente hemos acumulado más saber científico que en ningún momento anterior de la historia de la humanidad, toda esa masa de información y conocimiento no parezca servir de nada a la hora de evitar el colapso socioecológico hacia el que nos encaminamos... Quizá habría que comenzar aquí con un chiste, el de Groucho Marx en *Sopa de ganso*: “Claro que lo entiendo, incluso un niño de cuatro años podría entenderlo. ¡Que traigan a un niño de cuatro años: a mí esto me parece chino!”³

¹ Conferencia de apertura pronunciada en el XII Encuentro de Economía Alternativa y Solidaria, Córdoba, 30 de abril de 2015.

² George Monbiot, “La imposibilidad del crecimiento exige un nuevo sistema económico”, *Rebelión*, 5 de junio de 2014; puede consultarse en <http://www.rebelion.org/noticia.php?id=185597>

³ A propósito del uso de chistes para pensar, uno se ríe y piensa mucho con Slavoj Žižek, *Mis chistes, mi filosofía*, Anagrama, Barcelona 2015. Un extracto en “¿Sabían aquel que Žižek...?”, *El País*, 1 de marzo de 2015 (http://cultura.elpais.com/cultura/2015/02/27/actualidad/1425057639_993562.html)

¿Entendemos lo que deberíamos entender como niños de cuatro o diez años?

Necesitamos entender tres cosas

Creo que para entender el mundo en que vivimos (y donde probablemente moriremos la mayor parte de los seres humanos, por hambre, falta de asistencia sanitaria y violencia armada, consecuencias de la crisis ecológico-social, antes de que acabe el siglo XXI) hacen falta esencialmente tres conocimientos básicos. Un poquito de física, un poquito de matemáticas, un poquito de economía política.

El primero de estos conocimientos es la termodinámica básica, y especialmente el significado de la entropía (codificado en el segundo principio de la termodinámica).

El segundo es la dinámica de los crecimientos exponenciales (particularmente cuando se dan dentro de ambientes finitos: esto es matemática sencilla, pero habría que enmarcarla dentro de unas nociones básicas de teoría de sistemas).

El tercero de los conocimientos lo recogen las fórmulas de la *reproducción ampliada del capital* ($D - M - D + \Delta D$) que Marx explica al comienzo del libro primero del *Capital*.

Si falta alguna de las tres piezas, no entenderemos casi nada (al propio Marx le faltó comprensión de lo que significaban las piezas uno y dos funcionando dentro de un planeta finito; pero no podemos reprochárselo demasiado, los angustiosos problemas evidentes en la segunda mitad del siglo XX sólo eran perceptibles por indicios en la segunda mitad del siglo XIX). Si entendemos cabalmente las tres piezas en su conexión recíproca, yo diría que habremos dado pasos importantes para saber en qué tipo de mundo, de verdad, estamos viviendo. Habremos encajado tres piezas de conocimiento en el mosaico que hoy nos hace falta —en esa “ecología de los saberes” que preconiza Boaventura de Sousa Santos— para tratar de hacer frente a la crisis ecológico-social.

Un poquito de física: termodinámica básica⁴

⁴ Retomo aquí, actualizándolas, unas páginas de mi *Gente que no quiere viajar a Marte* (Catarata, Madrid 2004, p. 132-138).

Si –por la primera ley de la termodinámica-- la materia-energía no se pierde, sino que solamente se transforma, ¿no desaparecen como por ensalmo todos los problemas de *límites al crecimiento económico* que preocupan a los ecologistas? Pues no, a causa del segundo principio (o la segunda ley) de la termodinámica – entre otras razones--. *Los diversos tipos de energía no son igualmente convertibles en trabajo útil*. Si se quiere decir de otra forma: *existen formas de energía de “buena” y “mala” calidad para nosotros*. La segunda ley establece que, en un sistema aislado, la entropía (desorden atómico o molecular) aumenta inevitablemente.⁵

DOS CANTARES DE ANTONIO MACHADO PARA EXPLICAR TERMODINÁMICA

[Primer principio de la termodinámica]	[Segundo princ. de la termodinámica]
¿Dices que nada se crea? No te importe, con el barro de la tierra, haz una copa para que beba tu hermano.	¿Dices que nada se pierde? Si esta copa de cristal se me rompe, nunca en ella beberé, nunca jamás.

Antonio Machado: *Proverbios y cantares*, EL PAÍS/ Clásicos del siglo XX, Madrid 2003, p. 19 y 21.

La entropía es una medida de la disponibilidad de la energía: mide la cantidad de energía que ya no se puede aprovechar transformándola en trabajo. Un aumento de la entropía supone una disminución de la energía disponible: ni el carbón ni el petróleo pueden quemarse dos veces. Podemos vincular la idea de entropía con los recursos naturales que empleamos para nuestra subsistencia de la siguiente forma: *el recurso natural más básico y fundamental es la materia-energía de baja entropía* (vale decir: materia-energía con alto grado de orden y disponibilidad). El mineral de hierro con alta concentración de metal es un recurso precioso para nosotros, mientras que el hierro disuelto en el océano es prácticamente inutilizable.

En la Tierra existen de forma natural “depósitos de baja entropía”, islas de entropía negativa o “neguentropía” que desde los comienzos de la Revolución Industrial hemos ido agotando rápidamente: se trata de las reservas de combustibles fósiles, los yacimientos minerales, etc. Dilapidar de forma irresponsable la riqueza natural que constituyen estos “depósitos de baja entropía” restringe cada vez más las opciones vitales de los seres humanos que nos sucederán. En cierto sentido, el imperativo de una sociedad ecológicamente sustentable podría formularse como un *imperativo de minimización de entropía*.

⁵ La tercera ley de la termodinámica viene a decir, más o menos, que nada puede enfriarse hasta el cero absoluto. “Si, para un jugador, la primera ley equivaldría a *no puedes ganar*, la segunda ley sería *no puedes no perder* y la tercera *no puedes abandonar el juego*” (Eric D. Schneider y Dorion Sagan, *La termodinámica de la vida*, Tusquets, Barcelona 2008, p. 73).

La economía convencional ha tenido en cuenta, más o menos, la primera ley de la termodinámica (conservación de la materia-energía); pero no la segunda, *que es incomparablemente más importante que la primera a efectos prácticos*. Si uno observa la representación clásica del proceso económico en los manuales al uso, verá que en realidad se trata de una máquina de movimiento perpetuo, o sea, un objeto imposible. La termodinámica enseña que esos diagramas circulares, ese movimiento pendular entre producción y consumo en un sistema completamente autárquico, no corresponde a la realidad. El hecho de que el sistema económico se halle inserto dentro de sistemas biofísicos que forman una biosfera altamente compleja, y que dependa para su funcionamiento de *fuentes* de materiales de baja entropía y de *sumideros* para los desechos de alta entropía producidos; el hecho de que el principio de entropía gobierna todos los procesos del mundo material, sencillamente se ignora en la economía convencional.

En cierta ocasión, en una audiencia ante el Congreso estadounidense en 1973, el economista Kenneth E. Boulding (1910-1993) afirmó que “quien crea que el crecimiento exponencial puede durar eternamente en un mundo finito, o es un loco o es un economista”.⁶ Podríamos parafrasear la humorada del modo siguiente: quien crea que se puede violar la ley de la entropía, o es un loco o es un economista convencional. Pues, en efecto, los economistas convencionales tienen tantos problemas con la ley de la entropía como con los fenómenos de crecimiento exponencial en sistemas cerrados (y por razones parecidas).

La economía ecológica, por el contrario, sitúa la segunda ley de la termodinámica en el centro de sus reflexiones. Parte de la premisa de que *el proceso económico es entrópico en todas sus etapas materiales*.⁷ La segunda ley de la termodinámica tiene importantes implicaciones económico-ecológicas. Lo que muestra es esencialmente que la actividad económica está constreñida por ciertos límites insuperables:

(I) Límites al reciclado: el reciclado perfecto es imposible. Sólo se puede recuperar una parte; siempre hay un resto que se pierde irrecuperablemente. Los neumáticos pueden reciclarse; las partículas de neumático adheridas al asfalto no. El plomo de las baterías puede recuperarse en un alto porcentaje; el plomo

⁶ Se atribuye este dicho a Boulding en United States Congress House (1973), *Energy reorganization act of 1973: Hearings*, Ninety-third Congress, first session, on H.R. 11510. p. 248.

⁷ El hombre a quien se debe el mayor esfuerzo por integrar termodinámica y economía en una reflexión unitaria es el economista rumano exiliado a EEUU Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994). Una breve introducción a su vida y obra es “La economía ecológica de Nicholas Georgescu-Roegen” de Joan Martínez Alier, capítulo 1 de su libro *De la economía ecológica al ecologismo popular* (Icaria, Barcelona 1992). Óscar Carpintero nos brindó el soberbio estudio *La bioeconomía de Georgescu-Roegen* (Montesinos, Barcelona 2006) y preparó la edición de *Ensayos bioeconómicos* de Nicholas Georgescu-Roegen (Catarata, Madrid 2007).

emitido a la atmósfera junto con los gases de escape de los automóviles no. El cierre total de los ciclos es imposible, y las pérdidas de materia inevitables.

Por lo demás, el problema se desplaza pronto al terreno de la entropía energética (reciclar exige siempre utilizar energía, en cantidades que pueden ser muy grandes, inabordables); y a menudo lo que hacemos es “infraciclar” más que reciclar, como cuando rompemos en mil pedazos valiosos recipientes de vidrio (en vez de reutilizarlos), con la pérdida estructural y energética en que incurrimos entonces...

Algún optimista tecnológico insuficientemente consciente de los límites que las leyes de la termodinámica imponen a la ecologización de la economía ha postulado que “los elementos químicos que constituyen los recursos del planeta pueden ser reciclados y reutilizados indefinidamente, siempre y cuando la energía necesaria para recogerlos y refinarlos esté disponible”.⁸

Ahora bien: sin entrar en otros problemas que plantearía la extremosidad de este planteamiento, *el reciclado perfecto es un imposible termodinámico*, y por eso esta supuesta solución falla. Un ejemplo aducido a veces en este contexto prueba en realidad lo contrario de lo que se supone que tendría que probar. “A pesar de su enorme dispersión, más de la mitad del oro extraído hasta ahora sigue controlado hasta hoy día, siendo reunido cuando es necesario gastando energía”.⁹ El ejemplo se vuelve contra la intención de quien lo propuso: a pesar de que el oro ha sido un metal valiosísimo para todas las civilizaciones, y de que los seres humanos lo han reunido, atesorado y conservado (o sea, reciclado) como ningún otro material en toda la historia humana, *sólo algo más de la mitad* de todo el oro extraído en toda la historia humana está hoy disponible. ¡Piénsese lo que ha ocurrido y ocurrirá con materiales menos preciados! Y no vale replicar que, con las escaseces crecientes o con los nuevos impuestos ecológicos, el latón o el papel llegarán a ser tan valiosos como el oro: sería una salida por la tangente fraudulenta, que no tendría en cuenta hechos termodinámicos básicos, por no hablar de los supuestos irreales sobre la organización social y la psique humana.¹⁰

⁸ Aunque esto lo dice mi admirado Barry Commoner (*En paz con el planeta*, Crítica, Barcelona 1992, p. 142), en esta ocasión yerra...

⁹ Commoner, *En paz con el planeta*, p. 142.

¹⁰ El ejemplo anterior muestra que *lo valioso desaparece de donde debía estar*, pero la entropía crea igualmente problemas de signo contrario: *lo dañino aparece donde no debía estar*. Así, un estudio de la FDA estadounidense (Agencia Alimentaria y del Medicamento) hecho público en marzo de 2004 muestra que la acrilamida —un potente cancerígeno— está presente en el 27,7% de los alimentos en la cesta de la compra promedio en EE.UU. (en cantidades superiores a 10 microgramos por kilo de alimento). Véase Emilio de Benito, “Hallada acrilamida en el 27% de los alimentos de EE.UU.”, *El País*, 27 de marzo de 2004.

En definitiva, el reciclado perfecto es imposible; y precisamente podríamos enunciar el segundo principio de la termodinámica también de la siguiente forma: *la energía no puede reciclarse, y la materia no puede reciclarse nunca al 100%*.¹¹

(II) Límites al aprovechamiento de los recursos naturales. Detrás de las distintas *leyes de rendimientos decrecientes* con que tropieza el género humano se halla por lo general la estructura entrópica de nuestro mundo. Por ejemplo, en lo que se refiere a los recursos naturales: a medida que consumimos los mejores yacimientos minerales, los depósitos de combustibles fósiles más accesibles, sólo nos van quedando (en una corteza terrestre progresivamente más desorganizada) depósitos de materia-energía con mayor entropía, y por ello menos disponibles, menos útiles, menos aprovechables y cada vez más caros de explotar. “Cada vez nos acercamos más al momento en que la obtención de una tonelada de petróleo implique el consumo de tanta energía como la que contiene ese petróleo. En esa tesitura de nada sirve ya la sabiduría del economista, según la cual todo es sólo una cuestión de precios, pues el precio debe ser pagado en la única divisa fuerte de este mundo, a saber, en energía”.¹² Si la civilización minera que ha desarrollado el capitalismo fosilista prosigue su loca huida hacia adelante, y seguimos desorganizando la corteza terrestre de nuestro planeta y único hogar cósmico, cada vez nos acercaremos más al estadio de ese “puré póstumo” o crepuscular que con humor negro ha evocado en más de una ocasión José Manuel Naredo.¹³

PRODUCCION Y CONSUMO A LA LUZ DE LA TERMODINAMICA

"Producir es para los economistas [convencionales] llevar a cabo actividades que generen ingresos o valor añadido; se habla de *producir petróleo* como se habla de producir trigo sin tener en cuenta que las dos actividades son totalmente diferentes respecto a la periodicidad, es decir, a su relación con la naturaleza, a la relación entre el tiempo biogeoquímico y el tiempo económico. Una consiste en extraer una parte de un *stock*, de un fondo ya existente, mientras que la otra consiste básicamente, en el caso de la agricultura tradicional, en captar energía solar, que llega como un flujo renovable, y

¹¹ Herman E. Daly: *Steady-State Economics* (Island Press, Washington 1991), p. 8.

¹² Christian Schütze: "La incompatibilidad entre economía y ecología", *Debats* 35/36 (monográfico sobre *Crisis ecológica y sociedad*; Valencia 1991), p. 44.

¹³ El modelo de gestión capitalista de la economía, precisa Naredo, “conduce hacia estados de mayor entropía planetaria. La evolución de la Tierra, que arranca de esa *sopa primigenia* de la que empezó a surgir la vida, se ve impulsada con fuerza por este modelo hacia una especie de *puré crepuscular*, cuya composición química ya ha sido precisada” (José Manuel Naredo, *Raíces económicas del deterioro ecológico y social*, Siglo XXI, Madrid 2006, p. 220).

Los estudios pioneros de Antonio Valero y Alicia Valero sobre el agotamiento, en términos *exergéticos*, del capital mineral de la Tierra, arrojan una luz profunda sobre estos fenómenos. Dos obras esenciales: José Manuel Naredo y Antonio Valero (dirs.), *Desarrollo económico y deterioro ecológico*, Fundación César Manrique 1999; el libro puede descargarse en <http://www.fcmanrique.org/publiDetalle.php?idPublicacion=113>. Y Antonio Valero/ Alicia Valero: *Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources: A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment*, World Scientific Publishing Company 2014, que está pidiendo su pronto publicación en castellano.

transformarla en la energía de los alimentos. O se afirma que la agricultura de los EE.UU. es más productiva que la de México, aunque utilice mucho los recursos energéticos no renovables, y a pesar de que la agricultura del sur de México --en peligro por culpa del NAFTA-- es energéticamente más eficiente y además ha conservado mucha más biodiversidad.

(...) [Para los economistas convencionales] todo es escaso únicamente a corto plazo, porque a largo plazo se cree ciegamente en el cambio técnico, en la posibilidad de la sustitución sin límites: de apropiarse cada vez de nuevos recursos naturales, de utilizarlos sin crear problemas ambientales, y además de sustituir recursos naturales por capital --sin tener en cuenta el hecho elemental de que el capital es también fruto del trabajo y los recursos naturales.

El concepto de *consumo* como destino final de los bienes producidos también puede cuestionarse si tenemos en cuenta que, por la ley de conservación de la materia, todo lo utilizado por las empresas y los consumidores, antes o después, o bien es reciclado o bien vuelve a la naturaleza.

(...) Por consiguiente no se justifica la distinción habitual de los economistas entre los bienes producidos, que tienen un valor de cambio, y los bienes que se suponen *libres* --como el aire que respiramos-- de los que se considera que se dispone de una cantidad determinada independientemente de cuál sea la actividad económica. En realidad, los bienes considerados libres se ven afectados a menudo --y a veces de forma irreversible-- por las actividades de extracción, de producción, de consumo y de generación de residuos, aunque las *externalidades* o *costes ecológicos y sociales* de estas actividades no entran dentro de la contabilidad de las empresas y de los consumidores."¹⁴

(III) Límites al crecimiento. Los productivistas suelen argumentar que la preocupación por el medio ambiente más bien refuerza que debilita la necesidad de crecimiento económico, pues --según ellos-- la protección y la restauración del medio ambiente exigen recursos económicos que previamente deben conseguirse mediante más crecimiento. (Obsérvese que todas las políticas ecokeynesianas y socialdemócratas salpimentadas de verde presuponen este argumento.) Pero este argumento, en primer lugar, encierra una petición de principio, pues el medio ambiente no sólo puede conservarse mediante la reparación del daño causado, sino evitando las actividades que ocasionan el daño. El ecólogo Antoni Farràs equiparaba el proceder del productivista con el de un hombre que se deja cortar un dedo a cambio de dinero para pagar con ese dinero los trabajos de un cirujano y un ortopedista fabricante de dedos artificiales, que le implantan la prótesis correspondiente: prótesis que naturalmente nunca hubiese necesitado si no se hubiese dejado cortar el dedo.

¹⁴ Joan Martínez Alier y Jordi Roca Jusmet: "El valor de la natura", en *Medi ambient* 9 (monográfico sobre *La porta verda de l'economia*, Barcelona 1994), p. 84.

Y en segundo lugar, se trata de un completo contrasentido cuando nos hallamos ya —como es el caso— en situación de *overshoot* o extralimitación. Podemos fechar, con cierta exactitud, el momento en que las demandas colectivas de la humanidad superaron por vez primera la capacidad regenerativa de la Tierra: según un grupo de científicos dirigidos por Mathis Wackernagel —uno de los creadores del concepto de “huella ecológica”— eso sucedió hacia 1980, y ya treinta años más tarde nuestras demandas excedían esa biocapacidad de la Tierra en un 50% aproximadamente.¹⁵ Usar los recursos y las capacidades regenerativas de una Tierra y media es vivir de manera abismalmente nihilista, como si no hubiera un mañana.

Pretender que para proteger el medio ambiente lo que necesitamos es más crecimiento económico constituye un absurdo que sólo se mantiene mientras se mantenga la desconexión entre la economía monetaria (el “cajón de sastre de la producción de valor”, lo llama José Manuel Naredo) y su soporte biofísico. Desde la perspectiva de una economía ecológica consciente de los rudimentos de la termodinámica es un disparate: equivale, directamente, a negar el principio de entropía.¹⁶

“La fórmula mágica 'necesitamos crecimiento económico para poder pagar la protección del medio ambiente' es una manifestación fundamental de la *ignorancia de la entropía*. Las consecuencias negativas para el medio ambiente de la correspondiente adición al crecimiento serían superiores a los beneficios derivados de esa protección técnica del medio ambiente, aun cuando esa adición se dedicase en su integridad a protección técnica. Así lo determina el segundo principio de la termodinámica.”¹⁷

Aquí topamos, de nuevo, con una ley de rendimientos decrecientes de fundamento entrópico. Podemos verlo bien con un ejemplo: la eliminación de contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre.¹⁸ Es relativamente barato eliminar hasta el 75% de las emisiones por medio de tecnologías “de final de tubería”: a partir de ahí los costes se disparan

¹⁵ Mathis Wackernagel y otros, “Tracking the ecological overshoot of the human economy”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 9 de julio de 2002, p. 9266-9271. De mucho interés también es la actualización del clásico informe al Club de Roma *Los límites del crecimiento* (originalmente publicado en 1972): Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows y Jorgen Randers, *Limits to Growth: The 30 Year Update*, Chelsea Green Publishing 2004. Véase también Ugo Bardi, *Los límites del crecimiento retomados*, Los Libros de la Catarata, Madrid 2014.

¹⁶ Pero también podemos ejemplificar. Chernóbil por ejemplo: “En el estudio más detallado y comprehensivo que se ha realizado hasta la fecha sobre el accidente de Chernóbil, Yuri Koriakin, economista jefe del Instituto de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Energética de la Unión Soviética en el momento del accidente, valoró las pérdidas para la ex-URSS entre el año 1986 y el 2000 en una cantidad que puede oscilar entre los 170.000 y los 215.000 millones de rublos. Esta suma equivale, al cambio oficial de la época, a unos 40 billones de pesetas, cantidad muy superior a la suma total de las inversiones del programa nuclear civil soviético desde 1954” (Carlos Bravo/ Antxon Olabe: “Chernóbil”, *El País* 24 de abril de 1996, p. 12). ¡Y eso sin contar el medio millón de muertes que estima la OMS se producirán en los tres decenios posteriores a la fecha fatídica del 26 de abril de 1986!

¹⁷ Schütze, “La incompatibilidad entre economía y ecología”, *Debats* 35/36, p. 45. Esencialmente, podemos contrarrestar a escala local la tendencia universal al aumento de entropía con las mismas estrategias que identificamos en la vida terrestre, es decir, con estrategias de *biomímesis*.

¹⁸ Véase Donella H. Meadows/ Dennis L. Meadows/ Jorgen Randers: *Más allá de los límites del crecimiento* (El País/ Aguilar, Madrid 1992), p. 219-220.

exponencialmente, hasta hacerse literalmente impagables, y es imposible eliminar el 100% de la contaminación. Queda siempre, por tanto, un resto ineliminable por razones económicas en primer término y entrópicas en última instancia (puede ser entre un 5 y un 15% en el ejemplo que nos ocupa); en un nivel alto de emisiones, este 5-15% puede estar por encima de los niveles asumibles. Más crecimiento económico no puede mejorar el problema, sino sólo empeorarlo.

Por otro lado, *es sencillamente falso que todos los efectos perniciosos del crecimiento económico sean reversibles*: no lo son la erosión del suelo, ni la eliminación de especies vivas, ni la concentración de tóxicos organoclorados en las cadenas tróficas, ni el agotamiento del petróleo u otros recursos energéticos; ninguna cantidad adicional de recursos permitirá convertir los desechos radiactivos en isótopos fisionables. Siendo la contaminación en lo esencial un amasijo de elementos en intrincada mixtura, su reversión resulta muchas veces desesperadamente costosa o simplemente imposible: pues vivimos en un mundo en el que tiene vigencia el principio de entropía.

(IV) Límites al progreso técnico. Algunos adictos al crecimiento económico reaccionaron a las malas noticias contenidas en el informe al Club de Roma *Los límites del crecimiento* (1972) y otros estudios semejantes postulando un hipotético *crecimiento exponencial de la tecnología* que nos sacaría siempre las castañas del fuego. Pero se trata de una ilusión. Las leyes de la termodinámica también imponen límites inflexibles a la eficiencia de nuestra tecnología.

El teorema de Carnot --bautizado con el nombre del descubridor de la termodinámica, el ingeniero francés Sadi Carnot-- impone límites últimos a la eficiencia de los motores. En esencia, lo que afirma este importantísimo resultado es que el rendimiento de una máquina¹⁹ es igual a la unidad menos el cociente entre la temperatura de la fuente fría y la temperatura de la fuente caliente. Es decir, hay una fracción máxima de energía térmica que se puede transformar en energía mecánica, y esta fracción sólo depende de la diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y la fuente fría (entre el estado inicial y el estado final), con independencia del tipo de motor que consideremos y del tipo de sustancia con que opere. Cuanto menor sea la diferencia de temperaturas entre el estado inicial y el final, menor será la eficiencia del motor.

“La mayoría de las modernas centrales eléctricas utilizan vapor a temperaturas de aproximadamente 800 K (527 grados centígrados) y fuentes frías de aproximadamente 373 K (100 grados centígrados). Su rendimiento límite se sitúa por tanto alrededor del 54%, aunque otras pérdidas lo reducen hasta el 40%. Los rendimientos mejorarían si se usaran temperaturas

¹⁹ Con más precisión: una máquina de Carnot, es decir, una máquina que aprovecha la diferencia de temperaturas entre una fuente fría y una fuente caliente para obtener trabajo mecánico.

más altas en la fuente caliente, pero esto introduciría nuevos problemas, ya que los materiales empezarían a fallar. Por razones de seguridad, los reactores nucleares operan con temperaturas de la fuente caliente más bajas (unos 620 K, 350 grados centígrados) que limitan su rendimiento teórico al 40%, e incluso al 32% si contamos las pérdidas. Por citar ejemplos de otros sistemas relacionados con la vida cotidiana, el motor de automóvil funciona con una temperatura de entrada de más de 3300 K (alrededor de 3000 grados centígrados) mantenida durante un tiempo muy corto, y expulsa los gases a una temperatura de alrededor de 1400 K (1000 grados centígrados) con un rendimiento teórico del 56%. En realidad, los motores de automóvil siguen un diseño ligero para conseguir buenas prestaciones de facilidad de respuesta y movilidad, por cuya razón alcanzan un rendimiento de menos del 25%”.²⁰

La importancia del teorema de Carnot es que establece un límite absoluto para el rendimiento de las máquinas, un límite independiente de la inventiva de nuestros científicos e ingenieros.

“Una ilustración de la fuerza de las leyes de la termodinámica es que en muchas situaciones se pueden usar para predecir la eficiencia máxima que se puede lograr con una máquina perfecta, sin especificar detalle alguno de ella. (La eficiencia se puede definir en este caso como la proporción entre el trabajo útil y el flujo total de energía.) Así, se puede especificar, por ejemplo, la cantidad *mínima* de energía necesaria para separar la sal del agua marina, los metales de sus minerales y los contaminantes de los escapes de los automóviles sin conocer detalles de lo que se podría inventar en el futuro para lograr estos propósitos. De manera similar, si se conoce la temperatura de una fuente de energía termal (como, por ejemplo, una roca caliente en las profundidades de la corteza terrestre) se puede calcular fácilmente la eficiencia máxima con que esta energía térmica se puede convertir en trabajo aplicado, independientemente de la habilidad de los inventores futuros. En otras palabras, *existen límites fijos a la innovación tecnológica, colocados allí por las leyes fundamentales de la naturaleza*”.²¹

Es hora de ir concluyendo este apartado. En buena medida, la crisis ecológica actual puede interpretarse como un salto en el aumento de entropía dentro de la biosfera, y un debilitamiento de los mecanismos de reducción de entropía de la propia biosfera (que proceden, esencialmente, de la capacidad de conversión de energía solar en energía bioquímica que todos los habitantes de la biosfera debemos a los organismos fotosintetizadores); salto y debilitamiento producidos por la actividad humana. Como ha sintetizado magistralmente Daly:

“Una característica de la Revolución Industrial cuyas implicaciones no se aprecian suficientemente es el cambio al uso de los combustibles fósiles y los materiales minerales. Este es un cambio de la explotación de la superficie de la Tierra a la explotación del subsuelo; o como dice Georgescu-Roegen (1971), es un cambio de la dependencia de la energía proveniente a cada momento del sol a la energía almacenada en la Tierra. (...) La Revolución Industrial ha cambiado la dependencia, de un fuente relativamente abundante [la luz solar] a otra relativamente escasa del recurso final: la materia-energía de baja entropía.”²²

Para superar la crisis ecológica y reconstruir nuestras sociedades de forma que resulten sustentables (es decir, ecológicamente compatibles con la biosfera en el

²⁰ P.W. Atkins, *La segunda ley*, Prensa Científica --colección Biblioteca Scientific American--, Barcelona 1992, p. 41.

²¹ Paul R. Ehrlich/ Anne H. Ehrlich/ John P. Holdren: "Disponibilidad, entropía y las leyes de la termodinámica", en Herman E. Daly: *Economía, ecología y ética* (FCE, México 1989), p. 59.

²² Herman E. Daly y John B. Cobb *Para el bien común*, FCE, México 1993, p. 18

largo plazo) es necesario un gran esfuerzo colectivo para invertir la tendencia al desbordamiento de entropía que hoy impera. Esquemáticamente, se trataría de *aprovechar la energía disponible de la luz solar para reducir la entropía material de nuestro mundo*. Para ello es necesario conservar o regenerar la productividad natural de la biosfera, basada en la fotosíntesis de las plantas verdes, la preservación de la biodiversidad y el correcto funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos del planeta; realizar la transición desde el sistema energético actual (basado en los combustibles fósiles y la energía nuclear) a un sistema energético basado en las energías renovables; y “cerrar los ciclos” de la producción industrial y agrícola, alimentándola con energías renovables.

Finalmente, una observación general: un aspecto de mucho interés en relación con la entropía es que *no deberíamos verla sólo como factor limitante, sino también capacitante*.²³ La entropía no es sólo, o esencialmente, una fuerza destructiva: también es creativa. “La naturaleza aborrece los gradientes”, vale decir las diferencias naturales de temperatura, presión y concentración química: así reza el que quizá sea el lema principal de la comprensión de la “termodinámica de la vida” que se desarrolló en la segunda mitad del siglo XX. La reducción de los gradientes energéticos es lo que crea diversas clases de sistemas complejos en el universo y, a la postre, la vida; por eso la segunda ley no es sinónimo de movimiento inexorable hacia la muerte térmica o el equilibrio (contra las metáforas que empleó la termodinámica del siglo XIX). “La vida, como el universo, fluye termodinámicamente corriente abajo. Somos remolinos en un mar termodinámico, parte del proceso de un universo lleno de energía vivificadora”.²⁴ O como dice animosamente Carlos de Castro: “El universo aborrece los gradientes energéticos, la desigualdad. Lo importante no es la meta, lo importante es el largo y creativo camino hacia esa muerte térmica en el lejanísimo futuro (una vez más física y Tao parecen conectar)”.²⁵

²³ Hay aquí una analogía interesante con la libertad humana. “Suelo decir que no sé lo que es la libertad, pero como en muchas otras cosas el argumento más sólido que tengo no es más que una alegoría: la de las cuerdas de la marioneta: cuantas más, más libertad.” Rafael Sánchez Ferlosio, *Campo de retamas*, Random House, Barcelona 2015, p. 31.

Aceptar límites no es la negación de la libertad: es la condición de la libertad. “Limitarse no es renunciar: es conseguir”, decía el escritor español José Bergamín. “Se trata de jugar dentro de los condicionamientos, incluso fortísimos, pero para alcanzar determinados fines gracias al conocimiento detallado de los mismos.” Remo Bodei, *El doctor Freud y los nervios del alma*, Pre-Textos, Valencia 2004, p. 109.

²⁴ Eric D. Schneider y Dorion Sagan, *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, ecología y evolución*, Tusquets, Barcelona 2008, p. 130. La termodinámica de la vida se llama también *termodinámica del no equilibrio* o termodinámica de sistemas disipativos.

²⁵ Carlos de Castro, “Cuatro cosas básicas sobre entropía que todo ecologista y/o interesado en el pico del petróleo, los límites del crecimiento y el colapso de la civilización debería conocer”, entrada en el blog del Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid, 8 de febrero de 2015; puede consultarse en <http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?p=2725>

Un poquito de matemáticas: crecimientos exponenciales en ambientes finitos Se supone que el comportamiento de las funciones exponenciales se aprende en las matemáticas del bachillerato, ¿verdad? O a lo más tardar en un primer curso universitario de análisis matemático... Pero entonces ¿es posible que nuestras sociedades productivistas/ consumistas avancen con la decisión con que lo hacen hacia la catástrofe preprogramada porque no acaban de entender lo que es una función exponencial? ¿Tan mal andamos de matemática básica?

En lo que hace a nuestro *mundo de las muchas crisis*, hemos de recordar algunos hechos básicos sobre *crecimientos exponenciales en ambientes finitos*. Nos servirá un apólogo francés que ya se usó, en su momento, en los primeros informes del Club de Roma: hay un estanque con nenúfar que tiene una sola hoja. Cada día se duplica el número de hojas, o sea, dos hojas el segundo día, cuatro el tercero, ocho el cuarto, y así sucesivamente. Ahora, si el estanque está lleno el día treinta, podemos preguntar, ¿en qué momento está lleno hasta la mitad?

Respuesta: el día veintinueve. Reparemos además en que en el día 26 apenas 1/16 de la superficie del lago (poco más del 6%) está cubierto de nenúfares... El colapso parece lejano, y sin embargo la rapidísima dinámica de crecimiento lo ha situado ya muy cerca de nosotros. Y lo terrible es que hoy, en realidad, nosotros ya estamos en el día treinta y uno... aunque mayoritariamente nos seguimos negando a reconocerlo. Los psicólogos han mostrado que la gente tiende a subestimar en gran medida las dinámicas de crecimiento exponencial.²⁶

Veamos un ejemplo, que George Monbiot toma del banquero de inversiones Jeremy Grantham.²⁷ Imaginemos que en 3030 a. de C.²⁸ las posesiones totales del pueblo de Egipto llenaban un metro cúbico; no es gran cosa, en realidad podríamos pensar en las propiedades de un solo egipcio... Propongamos que esas posesiones crecieron al 4,5% por año.

“¿Qué tamaño hubiera tenido esa pila al llegar la Batalla de Actium en 30 a. de C.? (La trayectoria de la tasa de crecimiento compuesto muestra que la erosión del planeta solo acaba de comenzar. Simplemente no podemos seguir por el mismo camino.) Continuemos, adivina. ¿Diez veces el tamaño de las pirámides? ¿Toda la arena del Sahara? ¿El Océano Atlántico? ¿El volumen del planeta? ¿Un poco más? Es 2.500 trillones (10^{18}) de sistemas solares. No se precisa mucho tiempo, al considerar ese resultado, para llegar a la paradójica posición de que la salvación reside en el colapso. Tener éxito sería destruirnos. Fracasar es destruirnos. Es el atolladero que hemos creado. (...) La trayectoria del crecimiento [según tasas de interés] compuesto muestra que la erosión del planeta acaba sólo de comenzar. A medida que el volumen de la economía global se expande, todo sitio que contenga algo concentrado, poco

²⁶ W.A. Wagenaar/ H. Timmers: “The pond-and-duckweed problems: three experiments on the misperception of exponential growth”, *Acta Psychologica* vol. 43, 1979.

²⁷ Jeremy Grantham, “Time to Wake Up: Days of Abundant Resources and Falling Prices Are Over Forever”, publicado en *The Oil Drum* el 29 de abril de 2011: puede consultarse en <http://www.theoil Drum.com/node/7853>

²⁸ Ésta es la edad de los restos humanos más antiguos encontrados en Stonehenge (Gran Bretaña).

usual, precioso, será buscado y explotado, sus recursos extraídos y dispersados, las diversas y diferenciadas maravillas del mundo reducidas al mismo rastrojo gris.”²⁹

El “tema de nuestro tiempo”, no me canso de repetirlo,³⁰ es *el choque de las sociedades industriales contra los límites biofísicos del planeta*. Crecimientos exponenciales en el uso de los recursos naturales y de los servicios ecosistémicos son imposibles de mantener, pero las políticas dominantes –al servicio de la reproducción ampliada del capital-- se empeñan en ello³¹...

LA IRRACIONALIDAD DEL CRECIMIENTO PERMANENTE DE CUALQUIER MAGNITUD RELACIONADA CON EL MUNDO FÍSICO

(A) Si la población humana siguiera creciendo a una tasa cercana al 2% actual, en menos de dos milenios alcanzaría una masa similar a la de la Tierra. De continuar el crecimiento exponencial, en pocos milenios más su masa se aproximaría a la estimada para el conjunto del universo.³²

(B) Como planteaba elocuentemente George Monbiot en 2002: “El capitalismo es un culto milenarista, elevado al rango de religión mundial. (...) Igual que los cristianos imaginan que su Dios los salvará de la muerte, los capitalistas creen que los suyos los librarán de la finitud. A los recursos del mundo, aseveran, les ha sido garantizada la vida eterna. Basta una reflexión breve para mostrar que esto no puede ser verdad. Las leyes de la termodinámica imponen límites intrínsecos a la producción biológica. Incluso la devolución de la deuda, el pre-requisito del capitalismo, resulta matemáticamente posible sólo a corto plazo. Heinrich Haussmann ha calculado que un simple *pfennig* invertido al 5% de interés compuesto en el año cero de nuestra era sumaría hoy un volumen de oro de 134.000 millones de veces el peso del planeta. El capitalismo persigue un valor de producción conmensurable con el reembolso de la deuda...”³³ La producción material no puede crecer al ritmo del interés compuesto con que se acumulan las deudas (o los retornos de las inversiones): pero ese imposible es un supuesto básico del capitalismo.

(C) Si el consumo de energía siguiese creciendo al 2'3% anual (eso supone un incremento de “factor diez” cada cien años), ¿cuánto tardaríamos en alcanzar el máximo posible de captación de energía solar, por ejemplo con células fotovoltaicas? Suponiendo para éstas un rendimiento del 20% (actualmente no supera el 15%), y teniendo en cuenta que las tierras emergidas suponen el 28% de la superficie del planeta, se podría aspirar a captar un máximo de 7.000 terawatios (Tw; esto es, unas 600 veces el consumo actual de unos 12 Tw). Parece un margen grande... pero creciendo el consumo al 2'3% anual, ¿se alcanzaría en apenas 275 años! Y eso ¿cubriendo cada metro cuadrado de tierra con paneles fotovoltaicos –suponiendo implausiblemente que existiesen en el planeta suficientes materiales para fabricarlos! No quedaría tierra disponible

²⁹ George Monbiot, “La imposibilidad del crecimiento exige un nuevo sistema económico”, *Rebelión*, 5 de junio de 2014; puede consultarse en <http://www.rebelion.org/noticia.php?id=185597>

³⁰ Lo he argumentado por extenso en obras anteriores: véanse sobre todo *Biomímesis* y *La habitación de Pascal*, publicadas por Libros de la Catarata en 2006 y 2009 respectivamente.

³¹ También el gran geólogo estadounidense Marion K. Hubbert –el descubridor del “pico de Hubbert”– llamó la atención sobre estas cuestiones en los años setenta: MK Hubbert, “Exponential growth as a transient phenomenon in human history”, en M.A. Strom (ed.), *Societal Issues, Scientific Viewpoints*, Inst. of Physics, Nueva York 1974.

³² José Manuel Naredo, *Raíces económicas del deterioro ecológico y social*, Siglo XXI, Madrid 2010 (segunda edición actualizada), p. 22; a partir del cálculo de Isaac Asimov en *Las amenazas de nuestro tiempo*, Plaza y Janés, Barcelona 1980, p. 314-315.

³³ George Monbiot, “Our quality of life peaked in 1974. It’s all downhill now”, *The Guardian*, 31 de diciembre de 2002.

para cultivar alimentos o construir viviendas, ni aunque se tratase apenas de minipisos para minieuristas...³⁴

D) Otro cálculo sobre energía. "Todo científico afirmará que el crecimiento indefinido de cualquier parámetro físico es imposible. La utilización de energía en todo el mundo ha aumentado aproximadamente un 3% anual durante los dos últimos siglos. A este ritmo, las actuales 16 teravatios (TW) de demanda energética global se dispararían hasta igualar la producción total del sol en unos mil años, y en el plazo de dos mil años igualarían la energía de los 100.000 millones de estrellas que existen en nuestra galaxia. Pero mucho antes de eso -en los próximos cuatrocientos años- el calor directo generado en la Tierra sería suficiente para incrementar su temperatura superficial hasta los cien grados centígrados, la del agua hirviendo. Se podrían hacer cálculos parecidos sobre incremento de la población, consumo de recursos o cualquier otro parámetro que haya experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos siglos. Evidentemente, el mundo 'normal' del crecimiento es una anomalía pasajera condenada a autodestruirse de forma natural."³⁵

Entre 1950 y 2000 la economía mundial se multiplicó aproximadamente por cinco. Pero si continuase creciendo al mismo ritmo ¡en 2100 sería ochenta veces mayor que en 1950! Como señala Tim Jackson, "esta extraordinaria aceleración de la actividad económica no tiene ningún precedente histórico, y está completamente reñida con nuestro conocimiento científico relativo a la base finita de recursos y a la frágil ecología de la que depende nuestra supervivencia".³⁶

Como en otras dimensiones de la crisis socioecológica, en lo referente al calentamiento climático se nos escapa la rapidez de los cambios movidos por dinámicas de crecimiento exponencial: nuestra intuición no está a la altura. No nos damos cuenta de lo que está pasando... y además hay poderosos grupos de interés que hacen cuanto pueden para que sigamos sin darnos cuenta.

"En los últimos treinta años [1980-2010, aproximadamente] se ha emitido a la atmósfera una cantidad de GEI equivalente a la mitad de la emitida en toda la historia de la humanidad. Es muy probable que, veinte o treinta años antes del final del siglo pasado, hubiéramos estado a tiempo de encontrar una trayectoria colectiva en términos de emisiones que hubiera impedido llegar hasta aquí, cuando las respuestas ya no pueden ser incrementales y no se producirán, en su caso, sin severos sacrificios. (...) Que todo esto podía ocurrir se sabe desde hace más de cincuenta años, pues ya el presidente Lyndon B. Johnson advirtió del peligro en el Congreso de los EEUU en los años sesenta [del siglo XX]. Sin embargo, décadas de negacionismo sofisticadamente organizado y de freno al pensamiento sistémico como elementos de la expansión ultraliberal programada nos han llevado hasta aquí."³⁷

³⁴ Tom Murphy, "Energía a escala galáctica", publicado en Rebelión el 13 de diciembre de 2011 (puede consultarse en <http://www.rebelion.org/docs/141173.pdf>). El texto inglés procede de <http://www.energybulletin.net/stories/2011-07-18/galacticscale-energy>. Aconsejo vivamente una exploración minuciosa del blog de Murphy, "Do the math", a cualquiera interesado en límites biofísicos... Su ubicación: <http://physics.ucsd.edu/do-the-math/>

³⁵ T.W. Murphy, "Más allá de los combustibles fósiles: una valoración de las alternativas energéticas", en Worldwatch Institute: *¿Es aún posible lograr la sostenibilidad?*, Icaria/ FUHEM Ecosocial, Madrid 2013, p. 265.

³⁶ Tim Jackson, *Prosperidad sin crecimiento. Economía para un planeta finito*, Icaria, Barcelona 2011, p. 37.

³⁷ Ferrán Puig Vilar, "¿Reducir emisiones para combatir el cambio climático? Depende", en *mientras tanto* 117 (monográfico sobre *Los límites del crecimiento: crisis energética y cambio climático*), Barcelona 2012, p. 113.

La reducción en el uso de energía y materiales necesaria para que las economías de los países ricos fuesen más o menos sostenibles (paliando las desigualdades Norte/ Sur) está alrededor del 90% (según los cálculos del proyecto *Towards Sustainable Europe* en 1993-1996).³⁸ Si esto se quisiera lograr con medidas de ecoeficiencia, sería posible —comenta Joachim Spangenberg— en medio siglo, operando con un “factor 10”. Pero si en este tiempo la economía siguiera creciendo al 2% necesitaríamos un “factor 27”, y si creciera al 3% —¡el umbral que suele aducirse para la creación neta de empleo en una economía como la española!— un “factor 45”... El crecimiento exponencial dentro de ambientes finitos plantea problemas que sencillamente no tienen solución.

En un planeta finito, con seres finitos como somos los humanos, la sustentabilidad es incompatible con un sistema económico que necesita vender cantidades siempre crecientes de mercancías —sin límite— para subsistir. Puedes tener sustentabilidad, o puedes tener capitalismo, pero no puedes tener ambos a la vez. Para terminar de entender esto, nos hace falta asomarnos a la economía política.

Un poquito de economía política: reproducción ampliada del capital

Numerosos filósofos, a lo largo de la historia del pensamiento, alabaron las virtudes del comercio como práctica pacificadora y civilizadora de las relaciones humanas. Para llegar a tales conclusiones se centraban en el intercambio de bienes equivalentes, donde cada una de las dos partes remediaba una carencia con el bien que recibía de la otra parte, y ambas anudaban así un vínculo social. Pero importa aquí subrayar que *los intercambios comerciales que no buscan satisfacer necesidades, sino amasar capital, no conducirán a esa socialidad enriquecida*. Aquí hay que recordar el clásico análisis de Marx al comienzo del libro primero del *Capital*: el trueque (intercambio de un bien por otro diferente) representa el método más simple y antiguo de intercambio (podemos simbolizarlo así: M-M*).

El uso del dinero como medio de intercambio supera las limitaciones del trueque, dando lugar a la *producción simple de mercancías* (“vender para comprar”): M-D-M*. Aquí la suma de dinero D es instrumental para lograr una mejora en la satisfacción que procuran los valores de uso.³⁹

³⁸ Joachim H. Spangenberg (ed.): *Towards Sustainable Europe. A Study from the Wuppertal Institute for Friends of the Earth Europe*, segunda edición revisada, Wuppertal, junio de 1996. Puede consultarse en http://www.academia.edu/1874332/Towards_sustainable_Europe._A_study_from_the_Wuppertal_Institute_for_Friends_of_the_Earth_Europe

³⁹ Karl Marx, vol. I de *El Capital*, ed. de Pedro Scaron, Siglo XXI, Madrid 1984, p. 127-139.

Pero el cambio crítico ocurre con el siguiente paso histórico, que Marx llama *circulación mercantil capitalista* (“comprar para vender”): D-M-D*, donde D* representa una suma de dinero mayor que D (es decir, $D^* = D + \Delta D$).⁴⁰ *Aquí el objetivo no es lograr mejor valor de uso, sino la expansión del valor monetario de cambio.* La dinámica ya no es la satisfacción de necesidades humanas, sino la valorización del valor –que en su esencia carece de todo límite. “El dinero que con su movimiento se ajusta a ese último tipo de circulación se transforma en capital” (p. 180). Y comenta el economista Herman Daly:

“La desviación del enfoque del valor de uso al valor de cambio [que acontece con la circulación mercantil D-M-D*] es crucial. La acumulación de bienes y valores de uso es autolimitante. (...) [Pero] el valor de cambio de los bienes en general, abstraído en forma de dinero, se torna el centro de la acumulación. No hay nada que limite el valor de cambio abstracto que se puede tener.

A diferencia de los valores de uso concretos, que se arruinan o se deterioran cuando se acaparan (debido a la entropía), el valor de cambio abstracto se puede acumular indefinidamente sin costes de deterioro o de almacenamiento. De hecho, el valor de intercambio abstracto crece por sí mismo, dando intereses, y luego intereses sobre los intereses. Marx, y Aristóteles antes que él, señalaron el peligro de este *fetichismo del dinero*. (...) En nuestra época este proceso histórico de abstraerse cada vez más del valor de uso ha sido llevado quizás al límite en la así llamada ‘economía de papel’ [o de apuntes electrónicos, más bien: J.R.], que puede ser simbolizada como D-D*, la conversión directa de dinero en más dinero sin referencia a los bienes ni siquiera como un paso intermedio.”⁴¹

En los mercados capitalistas se produce, vende e invierte con el objetivo de maximizar los beneficios, y la rueda de la acumulación de capital no cesa de girar. (En una economía ecosocialista se perseguiría, por el contrario, el equilibrio: habría que pensar en algo así como una economía de subsistencia modernizada, con producción industrial pero sin crecimiento constante de la misma.)⁴²

La ciega dinámica valorización del valor es la fuerza que hoy nos está impulsando con tanta fuerza hacia el colapso socio-ecológico. El capitalismo es la civilización de la *hybris*. Su dinámica lleva a la destrucción de cualquier clase de barreras que pongan trabas a la generación de beneficios y la acumulación de capital. Si las características fisiológicas de los organismos vivos obstaculizan las

⁴⁰ Karl Marx, capítulo 4 del vol. I de *El Capital* (ed. de Pedro Scaron), Siglo XXI, Madrid 1984, p. 179 y ss..

⁴¹ Herman Daly, “Dinero, deuda y riqueza virtual”, *Ecología Política* 9, Barcelona 1995, p. 53.

⁴² “La alternativa a una economía de crecimiento estriba de hecho en una economía de subsistencia, es decir, una economía en la que la gente produce para satisfacer necesidades estables y no para acumular riqueza. En sociedades tribales, campesinas, antiguas y medievales, así como en muchas comunas de hoy en día, se producen artículos no para venderlos con el fin de beneficiarse, de acumular dinero con el tiempo. (véase la discusión de Polanyi en *La Gran Transformación*, 1944). Se producen para intercambiarlos por otros artículos necesarios de igual ‘valor’. Los días de mercado nos permiten a todos adquirir las cosas que necesitamos, a cambio de una aportación a la satisfacción de las necesidades de los otros. Nadie intenta sacar beneficios del intercambio, todo el mundo intenta sólo intercambiar artículos de un cierto ‘valor’ por otros del mismo ‘valor’ (medido habitualmente en el tiempo de trabajo necesario para producirlos). La gente no va al mercado a hacerse rica (...).” Ted Trainer, “¿Entienden bien sus defensores las implicaciones políticas radicales de una economía de crecimiento cero?”, publicado en *sin permiso* (www.sinpermiso.info) y antes de ello en *real-world economics review* el 6 de septiembre de 2011.

estrategias de maximización que se valen de la ingeniería genética, el capital aliado con la tecnociencia tratará de dar el salto a la biología sintética (construyendo organismos nuevos desde su misma base molecular). Si el carácter finito de la biosfera terrestre limita la expansión económica, tratarán de dar el salto al cosmos, escapando del planeta Tierra. Si las capacidades físicas y psíquicas del ser humano son factores limitantes, tratarán de dar el salto más allá de *Homo sapiens*, promocionando un “transhumanismo” que se valdrá de herramientas cibernéticas, informáticas, biotecnológicas, nanotecnológicas... La cultura capitalista es un grito de guerra contra los límites. La sabiduría de la autocontención le resulta por completo ajena.

La conclusión de este mínimo apunte de “ecología de saberes” podría ser entonces: I) hemos de asimilar de verdad la dimensión entrópica de los procesos económicos. II) Necesitamos con urgencia transitar hacia formas de economía que no precisen el crecimiento constante, y no sólo eso: ha de decrecer el “transumo” o flujo metabólico (la materia-energía de baja entropía) que estamos empleando para generar bienes y servicios. III) Para ello resulta imperativo superar el capitalismo.

Mínimo apunte sobre teoría de sistemas

Los seres humanos somos (igual que los demás seres vivos) *interdependientes y ecodependientes*. Formamos parte de *sistemas complejos adaptativos* (ecosistemas)⁴³ y del “sistema de ecosistemas” que es la biosfera, con múltiples bucles de retroacción. ¿Qué son estos?

Una noción básica y central en teoría de sistemas es la de los *bucles de retroalimentación* o retroacción o realimentación (*feedback loops*). La idea viene de la cibernética...

“Estamos acostumbrados por la experiencia de la vida a aceptar que existe una relación entre causa y efecto. Algo menos familiar es la idea de que un efecto puede, directa o indirectamente, ejercer influencia sobre su causa. Cuando esto sucede, se llama realimentación (*feedback*). Este vínculo es a menudo tan tenue que pasa desapercibido.

La causa-efecto-causa, sin embargo, es un bucle sin fin que se da, virtualmente, en cada aspecto de nuestras vidas, desde la homeostasis o autorregulación, que controla [entre

⁴³ Nosotros mismos, como organismos, somos sistemas complejos adaptativos... La naturaleza está formada por multitud de sistemas complejos adaptativos: células, organismos, ecosistemas, la biosfera en su conjunto. La noción de *sistema complejo adaptativo* proviene de Murray Gell-Mann y sus colaboradores en el Instituto de Santa Fe, institución estadounidense consagrada a la investigación interdisciplinar que centra sus esfuerzos en el estudio de la complejidad. De forma intuitiva, el conjunto de los sistemas complejos adaptativos es coextensivo con el fenómeno de la vida: la naturaleza animada “A diferencia de la naturaleza inanimada, todas las formas de vida tienden a adaptarse al mundo exterior, aunque a menudo traten de acomodar el mundo exterior a sus propias necesidades. Desde este punto de vista [evolutivo], la adaptación a las cambiantes circunstancias del entorno se produce fundamentalmente a través de los procesos de eliminación no aleatoria [selección natural, en términos darwinianos].” Fred Spier, *El lugar del hombre en el cosmos. La Gran Historia y el futuro de la humanidad*, Crítica, Barcelona 2011, p. 184.

otros parámetros] la temperatura de nuestro cuerpo, hasta el funcionamiento de la economía de mercado.”⁴⁴

Si son *bucles positivos*, tienden a hacer crecer un sistema y desestabilizarlo (en esa medida, y si se me permite la broma, los bucles positivos resultan negativos). Si se trata de *bucles negativos* tienden a mantener la integridad de un sistema y estabilizarlo. Los primeros son “revolucionarios” y los segundos “conservadores”.

“La realimentación positiva sin límite, al igual que el cáncer, contiene siempre las semillas del desastre en algún momento del futuro. [Por ejemplo: una bomba atómica, una población de roedores sin depredadores...] Pero en todos los sistemas, tarde o temprano, se enfrenta con lo que se denomina realimentación negativa. Un ejemplo es la reacción del cuerpo a la deshidratación. (...) En el corazón de todos los sistemas estables existen en funcionamiento uno o más bucles de realimentación negativa.”⁴⁵

Al estar inmersos en estas clase sistemas complejos donde “todo está conectado con todo” (o casi) mediante bucles de realimentación, sucede que --como intuyeron muchas sabidurías tradicionales-- los efectos de nuestras acciones acaban por volver sobre nosotros mismos (aquí cabría evocar incluso la noción hindú de *karma*). Por lo demás, es la misma dinámica de los sistemas complejos adaptativos la que conduce a las ideas de autolimitación y suficiencia:

“Los sistemas autoorganizados existen en situaciones en las que consiguen *suficiente* energía, pero *no demasiada*. Si no consiguen suficiente energía de suficiente calidad (por debajo de un umbral mínimo), las estructuras organizadas no tienen base y no se da auto-organización. Si se suministra demasiada energía, el caos se adueña del sistema, pues la energía sobrepasa la capacidad disipativa de las estructuras y éstas se derrumban. De forma que los sistemas autoorganizados existen en el terreno intermedio entre lo suficiente y lo no demasiado.”⁴⁶

Ay... cuatro gatos

“Primero hay que dar de comer a la gente, luego ya nos ocuparemos del medio ambiente”. Esta manera de razonar ya era falaz hace siete decenios, cuando escribía Aldo Leopold su *Sand County Almanac*; y hace cuatro decenios, en los debates mundiales que siguieron a la publicación de *The Limits to Growth*. Pues, amigos y amigas, nos pongamos como nos pongamos ¡somos interdependientes y ecodependientes!

(Por lo demás, para la mayoría de quienes así argumentan lo que de verdad está en juego no es dar de comer a la gente, sino vender mercancías obteniendo su buena tajada de beneficio.)

⁴⁴ Jane King y Malcolm Slessor, *No sólo de dinero... La economía que precisa la Naturaleza*, Icaria, Barcelona 2006, p. 54.

⁴⁵ *No sólo de dinero... La economía que precisa la Naturaleza*, op. cit., p. 56.

⁴⁶ James J. Kay y Eric Schneider, “Embracing complexity: the challenge of the ecosystem approach”, *Alternatives* 20/3, julio-agosto de 1994, p. 35.

La mayor parte del (muy minoritario) movimiento ecologista/ ambientalista no es anticapitalista.

La mayor parte del (muy minoritario) movimiento anticapitalista no es ecologista.

A unos les falta comprensión de lo que es la acumulación de capital, y cómo condiciona casi todo. A otros les falta comprensión de lo que es el cenit del petróleo, el calentamiento climático y la Sexta Gran Extinción, y cómo condicionan casi todo.

En la intersección de esas dos pequeñas minorías tenemos un minúsculo grupo de ecologistas anticapitalistas (que deberían ser también feministas y animalistas) con una comprensión más o menos adecuada de dónde estamos en realidad, de en qué mundo vivimos de verdad. Los llamamos, para abreviar, ecosocialistas.

Somos cuatro gatos. Entre la realidad y la anestesia prefiero la anestesia, sigue diciendo la mayoría.

Anejo: nociones básicas de teoría de sistemas⁴⁷

En el decenio de los años cuarenta del siglo XX emerge un nuevo punto de vista o "paradigma" (si empleamos este término en sentido laxo) dentro de las ciencias: el *enfoque sistémico*. Frente al talante analítico y reductivo de la ciencia clásica, *el enfoque sistémico pone a la orden del día el estudio de las totalidades complejas*.

"La ciencia clásica procuraba aislar los elementos del universo observado --compuestos químicos, enzimas, células, sensaciones elementales, individuos en libre competencia y tantas cosas más--, con la esperanza de que volviéndolos a juntar, conceptual o experimentalmente, resultaría el sistema o totalidad --célula, mente, sociedad-- y sería inteligible. Ahora hemos aprendido que *para comprender no se requieren sólo los elementos sino las relaciones entre ellos* --digamos, la interacción enzimática en una célula, el juego de muchos procesos mentales conscientes e inconscientes, la estructura y dinámica de los sistemas sociales, etc. (...) *La teoría general de los sistemas es la exploración científica de 'todos' y 'totalidades'* que no hace tanto se consideraban nociones metafísicas que salían de las lindes de la ciencia"⁴⁸.

⁴⁷ Retomo y actualizo aquí unas páginas de la segunda edición de mi libro *Un mundo vulnerable* (Catarata, Madrid 2005, p. 124-127).

⁴⁸ Ludwig von Bertalanffy: *Teoría general de los sistemas*, FCE, Méjico 1981, p. xiii-xiv; los subrayados son míos (J.R.). La primera edición inglesa de este libro seminal --que sigue siendo la introducción clásica a la teoría de sistemas-- es de 1968, pero alguno de los escritos más antiguos que reelabora se publicó en fecha tan temprana como 1940. Von Bertalanffy avanzó la idea de una *teoría general de sistemas* en 1945-47, y la *Sociedad para la Investigación General de Sistemas* se fundó en 1954.

Frente a la concepción mecanicista del *mundo como caos* dominante en la ciencia del siglo XIX y de los primeros decenios del siglo XX (según la cual la vida es un producto accidental de procesos físico-químicos, y la mente mero epifenómeno; se trata del paradigma analítico, positivista, mecanicista y unidireccionalmente causal de la ciencia clásica), surge desde este enfoque sistémico una interpretación del *mundo como gran organización*: como una jerarquía de niveles complejamente organizados. En suma, una interpretación en términos de sistemas. ¿Pero qué son sistemas?

Como primera aproximación, y si se quiere una definición muy sencilla pero no trivial, *sistema es un conjunto de elementos en interacción*⁴⁹. Explicitemos: *sistema es una totalidad, compuesta por elementos y relaciones entre estos elementos, en la que las relaciones entre los elementos son más importantes que los elementos mismos*. Precisamente éste es el punto de vista que adopta la ciencia ecológica. Así, Ramón Margalef señala que en el estudio de los ecosistemas

"interesa más el conocimiento de las relaciones entre los elementos interactuantes que la naturaleza exacta de estos elementos, los cuales son estudiados por alguna otra ciencia que explica sus características en función de las relaciones entre componentes de un orden inferior. En ecología no hay que preocuparse demasiado por la organización de los seres que forman los ecosistemas y la biosfera entera, y si se desea saber sobre ellos suele acudir a la información que proporcionan las ciencias que los estudian expresamente como la botánica, la zoología o la bacteriología."⁵⁰

Por todo ello, podrían enunciarse las siguientes tres propiedades definitorias de un sistema:

(I) está constituido por elementos que mantienen entre sí relaciones de interdependencia, y estos elementos son potencialmente *sustituibles* por otros de naturaleza similar (sin que cambie por ello la naturaleza del sistema);

(II) la totalidad formada por el conjunto de los elementos no es reducible a la suma de esos elementos (expresado con la vaguedad tradicional, "el todo es más que la suma de las partes");

(III) las relaciones de interdependencia entre los elementos, y la totalidad resultante, son regidos por reglas susceptibles de ser expresadas en términos lógicos, es decir: las relaciones son interpretables bajo un *modelo* igualmente aplicable a otros sistemas. Se dan *isomorfismos* entre sistemas que pertenecen a ámbitos a veces muy distintos de la realidad, y por ello los sistemas son

⁴⁹ Von Bertalanffy, op. cit., p. 38.

⁵⁰ Ramón Margalef: *Ecología*, Planeta, Barcelona 1981, p. 16.

esencialmente *modelizables* (es posible una formulación matemático-axiomática de la teoría general de sistemas).⁵¹

Esta definición es equivalente a la siguiente, ofrecida por el conocido filósofo argentino Mario Bunge:

"Un *sistema* es un todo complejo cuyas partes o componentes están relacionadas de tal modo que el objeto se comporta en ciertos respectos como una unidad y no como un mero conjunto de elementos. Y un *sistema concreto* es un sistema cuyos componentes son objetos concretos o cosas. Cada uno de los componentes de un sistema concreto influye sobre algunos otros componentes del sistema."⁵²

Bunge prosigue distinguiendo diversos géneros de sistemas concretos, cada uno de los cuales constituye un nivel de organización de la realidad:

(A) FISIOSISTEMAS como una roca y un campo magnético;

(B) QUIMIOSISTEMAS como una hoguera y una batería eléctrica;

(C) BIOSISTEMAS tales como una bacteria y un banco de coral (recordemos la definición de *ecosistema* que ofrecimos antes, y la de *biosfera* como el sistema de los ecosistemas);

(D) PSICOSISTEMAS tales como un pájaro y un mamífero;

(E) SOCIOSISTEMAS tales como una tropa de macacos y una comunidad humana (podemos definir la *sociosfera* como el conjunto de los sociosistemas);

(F) TECNOSISTEMAS tales como una fábrica y un hospital (y podemos definir la *tecnosfera* como el conjunto de los tecnosistemas).⁵³

En ecología suele emplearse la noción de *ecosistema* más que la de biosistema. Un ecosistema es el conjunto formado por comunidades vivientes de muchas plantas y animales que interactúan en un ambiente físico, el cual proporciona un escenario de características definibles. Todo ecosistema puede interpretarse en términos de la superposición de un ciclo y un flujo: un ciclo cerrado de materia y un flujo abierto de energía, ambos regulados por los organismos vivos a través de los eslabones tróficos (productores, consumidores y descomponedores). El conjunto de los ecosistemas forman la *biosfera*. Al conjunto de los sociosistemas

⁵¹ Matemáticamente, en teoría general de sistemas, los sistemas se definen como conjuntos de ecuaciones diferenciales simultáneas, en general no lineales. Véase el capítulo 3 de la obra citada de von Bertalanffy.

⁵² Mario Bunge: *Epistemología*, Ariel, Barcelona 1980, p. 101.

⁵³ Sobre las nociones de ecosfera, sociosfera, antroposfera, tecnosfera, etc., véase el artículo de William Clark "Ecología humana y cambios en el medio ambiente planetario" en *Revista Internacional de Ciencias Sociales* 121, Barcelona 1989, p. 337 y ss.

humanos podemos llamarlo *sociosfera*. El conjunto de los tecnosistemas humanos es la *tecnosfera*.

Bunge sugiere dos criterios para reconocer si una cosa u objeto concreto es un sistema:

"Para reconocer si una cosa u objeto concreto es un ente simple, o bien un mero agregado (o conglomerado), o bien un sistema, se puede recurrir a uno u otro de los criterios siguientes. *Primer criterio*: una cosa es un sistema si y sólo si se comporta como un todo en ciertos aspectos, o sea, si tiene leyes propias en cuanto totalidad. *Segundo criterio*: una cosa es un sistema si y sólo si su comportamiento cambia apreciablemente cuando se quita uno de sus componentes o se reemplaza por otro de clase diferente."⁵⁴

Muy característico de los sistemas es la aparición de *propiedades emergentes*. Podemos definir las del siguiente modo:

P es una *propiedad resultante o hereditaria* de x si y sólo si también algunos componentes de x poseen P;

P es una *propiedad emergente o colectiva* de x si y sólo si ningún componente de x posee P⁵⁵.

Lo que importa resaltar aquí es que *algunas de las propiedades de cualquier sistema son emergentes*. Así, por ejemplo, los seres vivos son emergentes respecto de los sistemas bioquímicos, éstos respecto de los químicos, y a su vez éstos lo son respecto de los físicos.

No hay que pensar que la perspectiva o el análisis sistémico se limite a las ciencias llamadas naturales. En sociología, por ejemplo, cabe denominar *análisis sistémico* a toda investigación, teórica o empírica, que, partiendo del postulado según el cual *la realidad social ofrece las características de un sistema*, interprete y explique los fenómenos sociales por los lazos de interdependencia y que hacen de ellos una totalidad.⁵⁶ En ciencias sociales, el enfoque sistémico conduce a descartar un *atomismo* que descuida el estudio de las relaciones, o la "física social" que desprecia la especificidad de los sistemas.

"El análisis sistémico (...) ha sido objeto de una importante crítica, formulada por varios autores. Se le ha reprochado --y se le reprocha aún-- el hecho de ser demasiado exclusivamente estático, de situarse fuera del tiempo, de no tener en cuenta el cambio social, las contradicciones y los conflictos inherentes a la vida social; en resumen, de ignorar la dialéctica social. Es cierto que buen número de sociólogos y antropólogos han utilizado el análisis sistémico de una manera susceptible de ser criticada. En sus investigaciones, muchos sociólogos y antropólogos han subrayado hartamente exclusivamente las relaciones de interdependencia 'armoniosas', las complementariedades entre los diferentes elementos de la

⁵⁴ Bunge, op. cit., p. 102.

⁵⁵ Bunge, op. cit., p. 120.

⁵⁶ Véase Guy Rocher, *Introducción a la sociología general*, Herder, Barcelona 1973, p. 363.

sociedad. Pero, como han precisado no pocos autores, no debe achacarse esto al análisis sistémico en sí mismo, sino al uso demasiado restringido que haya podido hacerse del mismo."⁵⁷

La teoría de sistemas arroja luz sobre objetos de distintas ciencias, y se nutre de resultados alcanzados en diversas ciencias: cibernética, teoría de la información y de la comunicación, diversas disciplinas matemáticas (como por ejemplo la teoría de juegos, la topología, la teoría de grafos, etc), ciencias de la computación, investigación operativa, teoría de la decisión, ciertas ramas de la física, biología, psicología. La ambición es muy grande: se trataría de aplicar el mismo tipo de análisis científico a todos los niveles de la realidad, desde la célula orgánica hasta el universo sociocultural; conseguir la unidad del saber científico sobre la base de un mismo método en todo el ámbito de las ciencias (tanto las ciencias naturales como las ciencias sociales). Esta unificación se derivaría del principio heurístico según el cual *encontramos organización en todos los niveles de la realidad*.

Como señalé al principio, la teoría de sistemas tiende a generar un *punto de vista* particular, un punto de vista sistémico: se concibe al mundo como un haz de pautas de comportamiento interrelacionadas que se desarrollan dinámicamente. La atención del investigador familiarizado con la teoría de sistemas se dirige a las interconexiones, las causaciones y los vínculos recíprocos, las retroalimentaciones. Un desarrollo de la teoría de sistemas que seguramente resultará familiar a cualquier lector o lectora preocupados por cuestiones ecológicas es la *dinámica de sistemas* creada por Jay W. Forrester y otros investigadores a partir de los años cincuenta del siglo XX: su trabajo está en la base del modelo *Mundo 3* que sirvió para elaborar el primer informe al Club de Roma, *Los límites del crecimiento* (1972).⁵⁸

⁵⁷ Rocher, op. cit., p. 358.

⁵⁸ Una actualización de estas reflexiones en Ferran Puig Vilar, *¿Hasta qué punto es inminente el colapso de la civilización actual?*, libro publicado en varias entregas en su blog *Usted no se lo cree*; índice en <http://ustednoselocree.com/background-climatico/otros/hasta-que-punto-es-inminente-el-colapso-de-la-civilizacion-actual-indice-tentativo/>; texto completo en <http://ustednoselocree.com/2015/01/25/hasta-que-punto-es-inminente-texto-completo-descargable/>