

**Capítulo 5 de *Gente que no quiere viajar a Marte*
Jorge Riechmann
Los Libros de la Catarata, Madrid 2004**

ÍNDICE

Prólogo de José Manuel Naredo

Nota previa: la utopía negativa del capital

1. El arte de la fuga –hacia la bestia, hacia la máquina
 2. ¿Aún no somos humanos?
 3. ¿Límites al crecimiento económico?
 4. Sobre la ecología y la conquista del espacio exterior
 5. De límites, sólo de límites
 6. Bromas aparte, lo sencillo es hermoso
 7. El proyecto de autolimitación
 8. Por una ética de la imperfección
 9. Tiempo para la vida. La crisis ecológica en su dimensión temporal
 10. Reflexión final: el doble asalto. Inmanencia, trascendencia, espacio y tiempo
- Sobre la “trilogía de la autocontención”

De límites, sólo de límites

“Debemos hacer todo lo posible para desarrollar nuestra racionalidad, pero en ese mismo desarrollo la racionalidad reconoce los límites de la razón, y realiza el diálogo con lo no racionalizable.”

Edgar Morin¹

“Hay óptimos imposibles, hay situaciones deseables pero irrealizables, hay límites insuperables a lo que podemos hacer o saber.”

Jesús Mosterín²

“Porque un filósofo habla siempre/ de límites, sólo de límites...”

Enrique Mújica³

¹ Edgar Morin, *Amor, poesía, sabiduría*, Seix y Barral, Barcelona 2001, p. 10.

¹ Jesús Mosterín: “Límites del conocimiento y de la acción”, en Javier Muguerza y Pedro Cerezo (eds.), *La filosofía hoy*, Crítica, Barcelona 2000, p. 267.

¹ Poema en *Poesía* 131, Carabobo (Venezuela), noviembre-diciembre 2001. El poeta venezolano Enrique Mújica nació en 1945.

¹ Edgar Morin, *Amor, poesía, sabiduría*, Seix y Barral, Barcelona 2001, p. 10.

² Jesús Mosterín: “Límites del conocimiento y de la acción”, en Javier Muguerza y Pedro Cerezo (eds.), *La filosofía hoy*, Crítica, Barcelona 2000, p. 267.

³ Poema en *Poesía* 131, Carabobo (Venezuela), noviembre-diciembre 2001. El poeta venezolano Enrique Mújica nació en 1945.

El carácter limitado de la ciencia y la tecnología

Los enormes logros alcanzados en los últimos siglos por la ciencia y la tecnología modernas alientan una creencia difusa en la omnipotencia de las mismas: como si todo, a través de nuestro poderío tecnocientífico, se hallase al alcance de nuestra mano. Cualquier proyecto de vida sería tecnológicamente posible, si no ahora mismo, sí en la prolongación del mundo en el que ya vivimos.

Es una terrible ilusión. Ya en 1968, Georg Picht advertía: “las naciones industriales aún siguen dominadas por la manía de que el mundo técnico es un mundo de posibilidades ilimitadas. Pero en realidad, y a causa de las repercusiones de la ciencia y la técnica, ya experimentamos hoy de manera cruel la existencia de barreras absolutas que se oponen al desarrollo de la existencia humana en nuestro planeta.”⁴ En nuestros días, el pensador estadounidense Nicholas Rescher⁵ ha insistido especialmente en el *carácter limitado de la ciencia y tecnología humanas*. Ello se echa de ver en cuatro ámbitos diferentes:

- (A) La ciencia es –más que un conjunto de teorías– un quehacer humano, y, como tal, está *marcado por la finitud*: el sujeto humano conoce teóricamente, y actúa con medios técnicos, siempre con categorías y capacidades que son limitadas.
- (B) Por otro lado, el *carácter entrópico del Universo*⁶ impone limitaciones a un proyecto cognitivo que depende cada vez más del progreso tecnológico.
- (C) En las ciencias formales aparecen *límites intrínsecos de la racionalidad*, como hemos visto en el siglo XX con la demostración del teorema de Gödel y otros teoremas de imposibilidad.
- (D) Finalmente, la finitud humana se enfrenta con la *complejidad de lo real*, que plantea a la razón retos que ésta nunca puede afrontar de manera plenamente satisfactoria.

Abordemos a continuación los tres primeros aspectos –finitud humana, entropía, límites intrínsecos de la racionalidad formal–, para tratar con más detalle el tercero –complejidad de lo real– en el capítulo siguiente (“Bromas aparte, lo sencillo es hermoso”).

Límites de la ciencia y la tecnología determinados por la finitud humana

Así, para Rescher, “reconocemos y debemos reconocer las limitaciones de nuestra actividad cognitiva. No podemos, de modo justificable, equiparar la realidad con lo que puede, en principio, ser conocido por nosotros; ni cabe equiparar la realidad con lo que pudiéramos, en principio, expresar mediante nuestro lenguaje. Y lo que es verdadero aquí

⁴ Georg Picht: *Frente a la utopía*, Plaza y Janés, Barcelona 1971, p. 31.

⁵ Nicholas Rescher es autor de una obra copiosísima, pero su pensamiento está sistematizado en tres volúmenes aparecidos en los primeros noventa con el título general de *A System of Pragmatic Idealism*. Se trata de *Human Knowledge in Idealistic Perspective* (1992), *The Validity of Values: Human Values in Pragmatic Perspective* (1993) y *Metaphilosophical Inquiries* (1994). Una introducción sucinta a sus ideas sobre ciencia, tecnología y ética se hallará en *Razón y valores en la era científico-tecnológica* (ed. de Wenceslao J. González), Paidós, Barcelona 1999.

⁶ Lo abordé con cierto detalle en “Por qué los muertos no resucitan y el reciclado perfecto es imposible”, en Francisco Fernández Buey y Jorge Riechmann, *Ni tribunales –Ideas y materiales para un programa ecosocialista*, Siglo XXI, Madrid 1996, p. 207 y ss. He reproducido una parte de aquel texto en el apéndice situado al final de este capítulo.

para nuestro tipo de mente es también verdadero para cualquier otro tipo de mente finita. Cualquier tipo de ser cognitivo físicamente factible puede sólo conocer una parte o aspecto de lo real.”⁷ Aquí Rescher sistematiza su argumentación en cuatro pasos:

- *Los datos empíricos infradeterminan las teorías*: las observaciones de que disponemos son siempre discretas, episódicas y finitamente enumerables; siempre habrá varios modos alternativos de acomodar los datos dentro de teorías generales. “Los datos observados son finitos, las hipótesis posibles son infinitas, y lo finito no puede forzar lo infinito”⁸
- Pero también *las teorías infradeterminan los hechos*: cualquier teoría formalizada de modo preciso admite una variedad de realizaciones concretas, puede ser representada por una variedad de modelos diferentes. Ninguna teoría puede prescribir su propia interpretación.
- *La realidad supera los recursos descriptivos del lenguaje*: “Las teorías están acotadas por el lenguaje, pero los hechos exceden estos límites lingüísticos. Y una vez más funciona el mismo principio: los enunciados son enumerables; los hechos son, en cambio, potencialmente no enumerables.”⁹ Habrá siempre hechos acerca de una cosa que no conozcamos porque no podemos ni siquiera concebirlas dentro del orden conceptual vigente.
- *La realidad excede los recursos explicativos de la teorización científica*. Se trata, en este caso, de la vieja constatación de que no cabe ciencia de lo particular, sino sólo de lo general: las cosas concretas tienen siempre características particulares individualizadas que podemos contrastar mediante nuestra experiencia personal, pero que resultan imposibles de captar por una ciencia que procede siempre en el nivel de la generalidad. “Este estado de cosas lo pone ante nosotros de un modo vivo la moderna teoría cuántica. Ya que ésta brinda un espectro de posibilidades estructurado de forma probabilística-estadística, cuyos detalles concretos no están en modo alguno establecidos por las leyes físicas sino que quedan abiertos al resultado contingente de los procesos históricos de desarrollo de la naturaleza. Las experiencias reales concretas que suministra el curso de la naturaleza (las observaciones cuánticas que hacemos) incluyen un nivel de particularidad al que la teoría cuántica es renuente e incapaz de descender.”¹⁰

Aquí cabría traer además a colación el asunto de la *carga teórica de la observación*, de inspiración kantiana pero revitalizado por filósofos contemporáneos como N.R. Hanson: no hay datos brutos, sino que toda observación está cargada teóricamente. Lo que percibimos depende tanto de las impresiones sensibles como del conocimiento previo, las expectativas, los prejuicios y el estado interno general del observador.¹¹

⁷ Rescher, “Razón y realidad: la infradeterminación de las teorías y los datos”, en *Razón y valores en la era científico-tecnológica* (ed. de Wenceslao J. González), Paidós, Barcelona 1999, p. 56.

⁸ Rescher, “Razón y realidad: la infradeterminación de las teorías y los datos”, op. cit., p. 52. Más matices de la importante cuestión de la infradeterminación de la teoría por la experiencia en Marta I. González García/ José A, López Cerezo/ José Luis Luján López: *Ciencia, tecnología y sociedad*. Tecnos, Madrid 1996, p. 43 y ss.

⁹ Rescher, “Razón y realidad: la infradeterminación de las teorías y los datos”, p. 54.

¹⁰ Rescher, “Razón y realidad: la infradeterminación de las teorías y los datos”, p. 57.

¹¹ Marta I. González García/ José A, López Cerezo/ José Luis Luján López: *Ciencia, tecnología y sociedad*. Tecnos, Madrid 1996, p. 41 y ss.

De estas constataciones sobre límites el propio Rescher extrae –con mucho acierto a mi entender– no una conclusión escéptica, sino un importante mensaje de *modestia* y *autolimitación*. No hay que pedir peras al olmo científico-tecnológico. Éste es un árbol potente y capaz, pero dentro de sus propios límites. La ciencia es falible: cualquier información sobre el mundo que nos proporcione será siempre imperfecta y mejorable. No cabe aspirar a una ciencia perfecta¹², de alguna forma coextensiva con la realidad: la segunda siempre excederá a la primera. Mal que le pese a Jorge Luis Borges, el mapa nunca llegará a coincidir con el territorio.

Por otra parte, *el criterio de evaluación último se halla en la práctica*. Puesto que nuestra visión científico-tecnológica de lo real necesariamente es inadecuada e imperfecta, será el encuentro con lo real en la acción –la puesta en práctica de nuestros modelos y teorías— lo que en definitiva nos permitirá evaluar la adecuación teórica de nuestro conocimiento. En la segunda mitad del siglo XX, la mejor epistemología ha subrayado cada vez más este momento *praxeológico* de la razón científica.

Y por último hay que extraer una consecuencia ético-política importante: *si las teorías científicas y los proyectos tecnológicos están infradeterminados*, si en general no hay una sola explicación verdadera ni una sola vía tecnológica correcta, *entonces cobra aún más importancia la participación democrática en los asuntos que afectan a todos*.¹³

“Reconocer las fuentes de infradeterminación inherentes a la actividad tecno-científica no significa afirmar que una ciencia o tecnología determinada sea ‘mala ciencia’ o ‘mala tecnología’. La infradeterminación es una característica intrínseca de toda actividad científico-tecnológica, y no es algo que sea posible resolver con más conocimiento especializado. (...) El reconocimiento de esta limitación natural del ‘poder’ de científicos y tecnólogos debería, en nuestra opinión, favorecer la apertura social de los procesos de innovación científico-tecnológica.”¹⁴

Límites de la ciencia y la tecnología determinados por la entropía

Ya en *Scientific Progress* (1978) Rescher argumentó que, en las ciencias de la naturaleza, la fuerte dependencia del progreso cognitivo respecto de la tecnología (que actúa directamente sobre la realidad) lleva a un típico fenómeno de *rendimientos decrecientes*: a medida que avanzamos en el conocimiento los costes aumentan, mientras que disminuyen los beneficios (cognitivos)¹⁵. Veámoslo con algún detalle.

Las ciencias de la naturaleza y las tecnologías no pueden ir lejos las unas sin las otras; los límites a su progreso respectivo son interdependientes, y en última instancia, no tanto

¹² Asunto al que este autor ha consagrado un ensayo en particular: Rescher, “El carácter imperfecto de la ciencia”, en *Razón y valores en la era científico-tecnológica* (ed. de Wenceslao J. González), Paidós, Barcelona 1999, p. 138-148.

¹³ Algunas reflexiones al respecto en Jorge Riechmann, “Ciencia, tecnología y democracia”, capítulo 7 de *Cultivos y alimentos transgénicos: una guía crítica*, Los Libros de la Catarata, Madrid 2000.

¹⁴ Marta I. González García/ José A. López Cerezo/ José Luis Luján López: *Ciencia, tecnología y sociedad*, op. cit., p. 49.

¹⁵ Rescher, *Scientific Progress; A Philosophical Essay on the Economics of Research in Natural Science*, Blackwell, Oxford 1978.

teoréticos como prácticos. Al desarrollarse la investigación de la naturaleza a través de sucesivos refinamientos de la tecnología correspondiente a la observación y experimentación, se alcanzan límites estrictamente tecnológicos al desarrollo del conocimiento teórico. “El aspecto clave de esta situación es que, una vez alcanzados los hallazgos fundamentales accesibles a determinado nivel de tecnología de datos, el logro de mayor progreso en esa área de problemas requiere ascender a un nivel más alto en la escala tecnológica. Cada nivel de tecnología de datos está sujeto a *saturación de descubrimientos*: el cuerpo de hallazgos científicos significativos obtenible a cualquier nivel es *finito* (y, en verdad, no sólo finito sino también relativamente pequeño).”¹⁶ Rescher ofrece dos analogías ilustrativas¹⁷.

La primera de ellas se apoya en la tercera ley de Newton, el principio de acción y reacción. Puesto que sólo podemos aprender acerca de la naturaleza interactuando con ella, dice Rescher, todo depende de cómo y *con qué fuerza* podamos enfrentarnos a la naturaleza en situaciones de interacción observacional y de detección; la naturaleza – como ya señalara Bacon en *Novum Organum*— nunca nos dirá más de lo que podamos extraer de ella a la fuerza, a través de los medios de interacción a nuestra disposición. Se daría una situación de “carrera de armamentos tecnológica” contra la naturaleza en la que el hombre –finito contra infinito— necesariamente ha de acabar perdiendo.

Rescher observa que la naturaleza opone de hecho unas barreras de resistencia cada vez mayores, tanto intelectuales como a la penetración física, y ofrece su segunda analogía: la extracción de aire para crear vacío. El primer 90% del aire sale con facilidad, el siguiente 9% cuesta tanto como todo lo extraído anteriormente, el posterior 0'9% es proporcionalmente tan difícil como el paso anterior, y así sucesivamente.

Cada paso sucesivo implica costes crecientes para obtener un progreso menor: precisamente esta es una situación típica de rendimientos decrecientes, y el ejemplo de Rescher nos pone sobre la pista de que *en última instancia, los límites al progreso tecnocientífico se deben a la naturaleza entrópica del universo que habitamos*¹⁸. “La dependencia explícita de datos adicionales –el aspecto empírico ineliminable de la disciplina— es exactamente lo que sitúa a las ciencias de la naturaleza como algo aparte no sólo de las ciencias formales (lógica y matemáticas), sino también de las ciencias hermenéuticas que, como las humanidades, buscan incesantemente la interpretación y reinterpretación imaginativa de los viejos datos a partir de las nuevas perspectivas conceptuales.”¹⁹ El razonamiento sería el siguiente:

¹⁶ Rescher, “La perfección como ideal regulativo”, en *Razón y valores en la era científico-tecnológica* (ed. de Wenceslao J. González), Paidós, Barcelona 1999, p. 125.

¹⁷ Rescher, “El limitado campo de la ciencia”, en *Razón y valores en la era científico-tecnológica* (ed. de Wenceslao J. González), Paidós, Barcelona 1999, p. 102-103.

¹⁸ Recordemos que el núcleo esencial de la termodinámica –esa parte de la física que estudia las transformaciones de la materia-energía (en particular, las relaciones entre energía térmica y trabajo)– desarrollada en el siglo XIX por Sadi Carnot, Rudolf Clausius y Lord Kelvin estriba en las dos leyes de la termodinámica. La *primera ley de la termodinámica* dice que la energía se conserva en todos los procesos (*ley de conservación de la energía*), y por tanto no puede haber “móviles perpetuos” del primer tipo, es decir, motores que suministren trabajo indefinidamente sin recibir aportes de energía externa. La *segunda ley de la termodinámica*, o *ley de la entropía*, establece que la energía se degrada (es decir, la entropía aumenta) en todos los procesos irreversibles. Implica que no puede haber “móviles perpetuos” del segundo tipo, es decir, máquinas que extraigan calor del agua o del aire y lo conviertan en trabajo mecánico.

¹⁹ Rescher, “La perfección como ideal regulativo”, en *Razón y valores en la era científico-tecnológica* (ed. de Wenceslao J. González), Paidós, Barcelona 1999, p. 128.

1. El progreso de las ciencias naturales requiere el de la tecnología (y viceversa). En particular, el progreso científico exige un continuo mejoramiento de la capacidad tecnológica de extracción y extrapolación de datos.
2. La tecnología interactúa directamente con el mundo, para lo cual exige recursos cognitivos, sociales y materiales de diverso tipo (energía en particular).
3. El tiempo y los recursos materiales a nuestra disposición son limitados.
4. Por ello, la ciencia y la tecnología, y en particular nuestra capacidad de control sobre la naturaleza, están destinadas a permanecer imperfectas e incompletas.

Sólo quien pretenda escapar a la premisa tercera mediante la dudosa maniobra antropófuga de la huida al cosmos puede escapar de la fuerza de este razonamiento, puesto que las dos primeras son inatacables y vivimos en un universo entrópico. Por el contrario, una ciencia y tecnología terrestres serán siempre limitadas.

Límites intrínsecos de la racionalidad: el teorema de Gödel

Si, en el caso de las ciencias de la naturaleza, en última instancia es el carácter entrópico de la realidad material lo que pone límites al conocimiento (vía la creciente dependencia de éste con respecto a la tecnología), resulta que las ciencias formales como la lógica y las matemáticas topan con importantes limitaciones internas. Éste fue el descubrimiento – no poco traumático-- realizado por el lógico Kurt Gödel a comienzos de los años treinta del siglo pasado.

“Es cierto que a principios del siglo XX las paradojas de la teoría de conjuntos introdujeron cierta preocupación entre los matemáticos, pero los problemas detectados fueron pronto resueltos mediante la introducción de la teoría de tipos y la axiomatización de la teoría de conjuntos. El más famoso matemático de aquella época, David Hilbert, formuló el luego llamado *programa de Hilbert*: para asegurar la matemática de una vez por todas se trataba de 1) axiomatizar de un modo completo y exacto todas las teorías matemáticas, y 2) probar –por medios finitarios indudables— que todas las teorías matemáticas así axiomatizadas son consistentes. La aplicación del programa empezaría por la teoría más básica de todas, la aritmética elemental, y se iría extendiendo a otras teorías más potentes y avanzadas. Por todo ello cayó como una bomba la demostración por Kurt Gödel en 1931 del llamado teorema de incompletud de Gödel, que en especial implicaba que la teoría aritmética perfecta no puede existir. Ni siquiera en el mundo ideal de la matemática son posibles todos los óptimos deseables.”²⁰

El teorema de incompletud de Gödel establece que *una teoría aritmética no puede ser a la vez consistente, axiomatizable y completa* (tres requisitos que intuitivamente exigiríamos a cualquier aritmética “perfecta”). En particular, si una determinada teoría aritmética es consistente (esto es, no incluye contradicciones, no incluye dos teoremas tales que uno sea la negación del otro) y axiomatizable, entonces será incompleta (esto es, habrá

²⁰ Jesús Mosterín: “Límites del conocimiento y de la acción”, en Javier Muguerza y Pedro Cerezo (eds.), *La filosofía hoy*, Crítica, Barcelona 2000, p. 272.

expresiones formulables en el lenguaje axiomatizado de la teoría de las que no podremos saber si son o no teoremas de la teoría).

La limitación así revelada por Gödel vale no sólo para la aritmética elemental, sino para cualquier otra teoría matemática que la contenga, es decir, para casi todas las teorías matemáticas interesantes (incluyendo la teoría de conjuntos, el análisis matemático, etc.). Como subrayó Manuel Sacristán, lo que el teorema de incompletud de Gödel de viene a señalar es que *no resulta posible buscar fundamentos definitivos y absolutos del conocimiento científico*, ni siquiera en el ámbito de las ciencias formales²¹. En este sentido, se trata de un hito en el proceso de autodisciplina de la razón: una vez superado el *shock* traumático inicial habría que valorar los resultados de Gödel como un avance en el proyecto de autocontención.

Por otra parte, esta limitación intrínseca de la razón matemática no fue sino la primera de una larga serie de limitaciones, descubiertas a partir de entonces en forma de sucesivos teoremas de imposibilidad.

Otros teoremas de imposibilidad

Dos importantes teoremas de imposibilidad que desbordan con mucho el ámbito de las ciencias formales se establecieron para la teoría de la comunicación y la teoría política. El primero, probado por Claude Shannon en 1948, dice que no es posible transmitir señales a un ritmo superior a C/H , donde C es la capacidad del canal (en bits por segundo) y H es la entropía de la fuente (en bits por símbolo): lo cual implica que *el canal perfecto de comunicación no puede existir*. El segundo es el famoso teorema de imposibilidad de Kenneth Arrow, probado por primera vez en 1952 y perfeccionado en 1983, que establece límites a la posibilidad de perfeccionar la democracia, mostrando que *el sistema perfecto de votación no existe*.²²

Pero la cosa no acaba aquí. Vale la pena examinar con más detalle otras limitaciones que afectan a la actividad humana, y por tanto a todos los desarrollos tecnológicos. Se trata, en este caso de los límites que impone la estructura biofísica de la realidad, y en particular la estructura de ese “sistema de sistemas” que es la biosfera.

Imposibilidades termodinámicas

Las leyes de la termodinámica, establecidas a mediados del siglo XIX (por Sadi Carnot en 1824, y después por Rudolf Clausius en 1865), fueron las primeras leyes físicas que pusieron límites absolutos a lo que se puede hacer. Según la primera de ellas (ley de conservación de la energía), *no puede haber móviles perpetuos del primer tipo*, es decir, motores que suministren trabajo mecánico indefinidamente sin recibir aporte de energía. Según la segunda (ley de la entropía), *no puede haber móviles perpetuos del segundo tipo*, es decir, motores que extraigan calor del agua o del aire y lo conviertan en trabajo mecánico.

²¹ Sobre la fundamentación en ética reflexioné al comienzo del capítulo 3 de *Todos los animales somos hermanos*, Eds. de la Universidad de Granada 2003.

²² Jesús Mosterín: “Límites del conocimiento y de la acción”, op. cit., p. 274-276.

La termodinámica tiene una importancia epistemológica excepcional. A partir de aquí, en vez de la eternidad encontramos historia, y en vez de la reversibilidad de la mecánica clásica tenemos irreversibilidad termodinámica y evolución biológica. En particular, *las implicaciones de la segunda ley (el principio de entropía) para la problemática socioecológica de nuestra época son enormes*: abordé algunas de ellas en un capítulo de un libro anterior que reproduzco más abajo como anexo (TERMODINÁMICA, ECONOMÍA Y ECOLOGÍA).²³

ALGUNOS ARGUMENTOS CONTRA EL OPTIMISMO TECNOLÓGICO DESBOCADO

1. La confianza en que los problemas que genera la moderna tecnociencia se resolverán a base de *más de los mismo* es irracional y obstruye el proceso de percepción social de los graves riesgos e incertidumbres a que la especie humana se halla actualmente expuesta. En lo que atañe al desarrollo futuro de nuestros conocimientos estamos necesariamente en la incertidumbre: pues si hoy ya supiésemos a ciencia cierta lo que sabremos mañana, entonces los conocimientos de mañana serían ya los de hoy. Transmitir a nuestros descendientes problemas gravísimos que nosotros hemos creado y sobre cuya solución no tenemos ni la más remota idea (el ejemplo de los residuos nucleares viene al caso) delata una irresponsabilidad abismal.

2. Es arriesgado postular límites para los conocimientos futuros; pero aún más arriesgado es suponer que los nuevos conocimientos no contendrán el descubrimiento de nuevos límites, sino sólo la superación de los antiguos límites. De hecho, el nuevo conocimiento a menudo descubre nuevos límites con mayor rapidez que elimina límites antiguos. El descubrimiento del uranio fue un conocimiento nuevo que incrementó nuestra base de recursos naturales, pero el descubrimiento posterior de los peligros de la radiactividad no incrementó la utilidad del uranio, sino que la redujo. El descubrimiento de que las microfibras de amianto provocan cáncer de pulmón limita, en lugar de aumentar, la utilidad de las reservas de amianto.

3. Casi todas las leyes básicas de la ciencia son enunciados de imposibilidad: es imposible viajar más deprisa que la velocidad de la luz, o tener un movimiento perpetuo, o la generación espontánea de seres vivos, o la creación de materia de la nada... Es probable que los nuevos conocimientos incorporen nuevos enunciados de imposibilidad.

4. Es cierto que el desarrollo futuro de la tecnociencia depende en parte de los recursos que se asignen a su cultivo. Pero como el gran científico Max Planck indicó en sus memorias, sucede que "con cada nuevo progreso crece también la dificultad de la ulterior tarea investigadora". Se da una especie de ley de rendimientos decrecientes en la investigación científica: para cantidades iguales de recursos invertidos en investigación, los rendimientos de ésta descienden. Esto no implica que el progreso científico tope con límites completamente infranqueables en todas direcciones, pero sí que implica la ralentización inevitable del ritmo de progreso científico en un mundo de recursos limitados.

5. El mero conocimiento significa poco para el sistema económico si no está incorporado en estructuras físicas. Kenneth Boulding observa que el capital es esencialmente conocimiento impuesto al mundo físico en forma de arreglos improbables. Pero el conocimiento no puede operar sobre cualquier clase de materia mediante

²³ Un buen libro de divulgación científica sobre termodinámica es P.W. Atkins, *La segunda ley*, Biblioteca Scientific American/ Prensa Científica, Barcelona 1992. Para abordar las implicaciones socioecológicas puede servir Enzo Tiezzi, *Tiempos históricos, tiempos biológicos*, FCE, México 1990.

cualquier clase de energía. (Si no fuese así, podríamos construir un molino de viento de arena empleando para ello la energía de las mareas y emplearlo luego para extraer el oro disuelto en el océano.) El ojo de aguja por el que el conocimiento "entra" en el mundo físico para darle forma es la disponibilidad de materia-energía de baja entropía, y si no existen fondos de materia-energía de baja entropía tampoco habrá capital por mucho conocimiento que tengamos. Así nos lo garantiza la segunda ley de la termodinámica.

Podemos mejorar el bienestar humano que obtenemos de una cantidad dada de recursos naturales, y aquí el margen de maniobra es afortunadamente muy amplio; pero no podemos eludir los límites impuestos a la escala física de la economía por la finitud de la biosfera, la entropía y la interdependencia ecológica.

Extractado de Herman E. Daly y John B. Cobb, *Para el bien común* (FCE, Méjico 1993), p. 183-184; y de Antoni Domènech, "La ciencia moderna, los peligros antropogénicos presentes y la racionalidad de la política de la ciencia y la tecnología", *Arbor* (enero de 1986). Aquí lo reproduzco de mi ensayo "Por qué los muertos no resucitan y el reciclado perfecto es imposible", en Francisco Fernández Buey y Jorge Riechmann, *Ni tribunales – Ideas y materiales para un programa ecosocialista*, Siglo XXI, Madrid 1996, p. 225-226.

Límites biológicos al rendimiento de los organismos

La fotosíntesis --proceso bioquímico de las plantas verdes que emplean la energía solar para transformar agua, dióxido de carbono y los nutrientes que obtienen del suelo en hidratos de carbono— es el proceso que constituye la base de toda la productividad de los sistemas naturales y en última instancia sustenta a toda la vida de nuestro planeta. Pues bien, en tierra, el promedio de la producción primaria vegetal es de unos 750 grs. de materia orgánica seca por metro cuadrado y año; en el océano, la tercera parte aproximadamente. *El límite superior de producción de cualquier ecosistema (ya sea natural o cultivado por el hombre) es de unos 25 gramos por metro cuadrado y día.*

Las plantas sólo aprovechan directamente el 0'2% de la energía solar incidente sobre el planeta; pero más del 25% se consume para evaporar el agua y causar la lluvia, influyendo así también sobre la vida vegetal. Como la capacidad fotosintética del planeta es finita, la pérdida de ésta (por degradación de los ecosistemas) acaba afectando a los sistemas humanos construidos sobre esos ecosistemas.

La energía solar entra en las cadenas alimentarias de un ecosistema (las redes tróficas) por medio de la fotosíntesis, y fluye a través de los distintos niveles tróficos. Al pasar por cada uno de ellos sólo una pequeña parte (aproximadamente el 10%) se invierte en producción neta, crecimiento y reproducción; la mayor parte de la energía se disipa en la respiración (energía usada en realizar trabajo o perdida como calor) y en las cadenas tróficas laterales (organismos comensales, simbioses, parásitos...). Como la energía disponible va disminuyendo, el número de niveles tróficos posibles es limitado: no supera los cinco o seis en los casos más complejos²⁴.

²⁴ Esta división de la biomasa por diez en cada paso de un nivel trófico a otro tiene una consecuencia

Mediante la mejora genética se ha podido incrementar el "índice de cosecha" o parte del grano en relación con la biomasa aérea total, que en las primeras variedades domesticadas del trigo era del 20%, hacia 1920 pasó al 30% y *en 1990 alcanzó el 50%. Con ello se está cerca del límite absoluto alcanzable, postulado por los biólogos en un 62%: como no puede sobrepasarse ese porcentaje sin privar al resto de la planta de la energía que necesita para vivir, comprobamos que también en los procesos de mejora vegetal todo tiene un límite...* que a finales del siglo XX estamos muy cerca de alcanzar.²⁵

"Si bien es cierto que en los comienzos los campesinos no conocían más que el estiércol orgánico, el cual, durante decenas de años, ha sido factor de selección de las plantas que se aprovechaban mejor de él, más tarde las industrias dieron con el sistema de producir suficiente abono {inorgánico} para aportar al suelo no sólo 30 kilos de nitrógeno por hectárea, sino 50, después 100, 200 kilos... Aunque era caro. Para rentabilizar esos abonos, era preciso seleccionar nuevas variedades, capaces de absorber tales dosis y ser lo bastante productivas para que fuera rentable la inversión. Para ello se ha comenzado una selección voluntaria, racional, metódica, aplicando todo lo que se sabía de genética. Y se ha llegado al final. (...) Se ha tropezado con los rendimientos decrecientes del abono. Más allá de cierto umbral, el nutriente se convierte en tóxico para la planta. De todos modos no se podrá empujar a las especies más allá de los límites que corresponden a las capacidades que tienen de fotosíntesis."²⁶

Hay que concluir, con Jesús Mosterín, que "desde los dominios más abstrusos de las matemáticas puras hasta los campos prácticos de la política y de los sistemas de votación, pasando por las eficiencias de los motores y la precisión de las mediciones cuánticas, todo lo que podemos saber y lo que podemos hacer está estrechamente acotado por una serie de límites u horizontes de nuestro conocimiento y nuestra acción. El descubrimiento paulatino de esos límites nos ha situado en una situación intelectual menos ingenua y optimista que la que compartían los intelectuales decimonónicos, tan dados al utopismo."²⁷

Creo que se impone concluir –en sintonía con las tesis de fondo de Rescher y Mosterín— subrayando la *limitación del proyecto cognitivo humano, y de nuestras pretensiones de dominación "racional" sobre la naturaleza*. Nunca sabremos todo ni podremos todo –por más ilusiones que nos hagamos al respecto.

práctica importante para nosotros: la agricultura rinde unas diez veces más por unidad de superficie captadora de la energía solar que la ganadería. Un kilo de carne (biomasa animal) procede, en promedio, de 10 kilos de biomasa vegetal. Por ello, los sistemas agropecuarios sustentables incluyen ganadería extensiva (los rumiantes pueden digerir la celulosa de los pastizales, mientras que los estómagos humanos no pueden) pero no animales alimentados con productos agrícolas como los cereales, que los humanos podemos aprovechar directamente. He explorado esta cuestión en el capítulo VIII de *Todos los animales somos hermanos* (Universidad de Granada 2003).

²⁵ Lester R. Brown: "Alimentar a 9.000 millones de personas", en *La situación del mundo 1999*, p. 242.

²⁶ Marcel Mazoyer en Jean-Marie Pelt/ Marcel Mazoyer/ Théodore Monod/ Jacques Girardon: *La historia más bella de las plantas*. Anagrama, Barcelona 2001, p. 167.

²⁷ Mosterín, "Límites del conocimiento y de la acción", op. cit., p. 277.

Dejemos resonar el imperativo pindárico: en lugar de perseguir lo imposible, acotemos una acción eficaz en el campo de lo posible. También éste será un momento importante de la *ética de la autocontención*.

¿Nanotecnologías para escapar de la entropía?

En páginas anteriores de este libro —especialmente en el capítulo 3— he argumentado que la construcción de una sociedad ecológica va de consuno con la aceptación de los límites terrestres, y que por el contrario, si uno es un productivista consecuente, no le queda otro remedio que situarse ante un horizonte de “conquista del espacio”. Las razones, en última instancia, se derivan del *principio de entropía*: al ser la Tierra un sistema cerrado que no intercambia materiales con su entorno (excepto cantidades de meteoritos por lo general despreciables), y que recibe continuamente la energía radiante del Sol, la única estrategia que a la larga —es decir, de forma sostenible— garantiza la supervivencia y el bienestar humano es *emplear ese suministro constante de energía solar para contener la degradación entrópica de nuestro entorno*. Y la única forma de escapar a esta conclusión sería el salto al cosmos, que equivale a abrir el sistema cerrado: organizar intercambios de materia entre la Tierra y el resto del sistema solar, y luego quién sabe con qué otros lejanos sistemas planetarios...

¿Pero se trata realmente de la única forma? Desde hace algunos años, los “tecnoentusiastas” sugieren otra vía para sortear los límites infranqueables que imponen las leyes de la termodinámica: las nanotecnologías.

¿De qué se trata? Las nanotecnologías son *tecnologías para manipular la materia a escala de un nanómetro*, es decir, la millonésima parte de un milímetro. Nanotecnología es la manufactura a escala atómica, y también la “replicación” o copia de máquinas y productos finales construidos a esa escala (lo cual resulta mucho más difícil). De alguna forma, las nanotecnologías representan el estadio final en la búsqueda de dominio y manipulación de la materia que ha caracterizado a la tecnociencia occidental.²⁸

Richard Feynman y Eric Drexler, del MIT (Massachusetts Institute of Technology) propusieron la idea en 1959, cosechando burlas y desprecios²⁹; pero en 1992 tuvo lugar el primer congreso científico sobre nanotecnologías. Desde entonces, se ha convertido en un sector importantísimo de I+D. Bill Clinton lanzó su National Nanotechnology Initiative en enero de 2000, y la UE y Japón no van a la zaga. En cada una de las tres zonas se destinaron más de 700 millones de euros de fondos públicos para estimular la investigación nanotecnológica en el año 2003.

²⁸ Como introducción, se hallará una monografía con varios artículos sobre nanotecnologías en *Investigación y Ciencia*, noviembre de 2001. Otra en *Encuentros interdisciplinares* vol. 4 número 12, septiembre-diciembre de 2002.

²⁹ Aquella conferencia pionera de Feynman en el CalTech (California Institute of Technology), el 29 de diciembre de 1959, se titulaba “There’s plenty of room at the bottom”; luego, Eric Drexler publicó en 1986 el libro *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*.

En cierto sentido, las nanotecnologías son a la materia inanimada lo que las biotecnologías a la materia animada, y se estima que hoy se encuentran, más o menos, donde se encontraban las biotecnologías hace veinticinco años.³⁰

¿Milagros nanotecnológicos?

Según los profetas nanotecnológicos, su panacea podrá extraer de los vertederos o del aire (vale decir, de los sumideros de contaminación) los átomos necesarios para fabricar bienes más duraderos y resistentes que los que hoy se pueden encontrar en el mercado. En apariencia, se trataría de un milagro antientrópico: reconstruir orden (y con él, posibilidades de vida) a partir de cualquier “sopa tóxica” creada por nuestros desmanes industriales. La clave de estos milagros sería diseñar miles de millones de “nanorrobots” o “nanobots” que se puedan programar para construir productos determinados; para que eso funcione a nivel industrial, además, deben ser capaces de construirse a sí mismos. Si se logra manufacturar “nanobots” autorreplicantes, se crearía –según estos profetas– una insospechada Cornucopia tecnológica, muy en la línea de autotranscendencia “antropófuga” que hemos explorado en capítulos anteriores de este libro.

LAS PROMESAS DE LAS NANOTECNOLOGÍAS

- Satisfacer las necesidades del mundo por medio de una oferta casi infinita de moléculas manufacturadas (con impactos decisivos en sectores como la aeronáutica, la automoción, la microelectrónica, la cosmética y muchos otros).
- Diversos tipos de nanosensores y sistemas de detección.
- Nuevos tratamientos médicos (por ejemplo, microbombardadores que permiten administrar dosis regulares de medicinas en lugares muy precisos, o nanopartículas recubiertas de moléculas quimioterapéuticas para atacar el cáncer en órganos específicos).
- Combinaciones biónicas de materiales vivos y nanotecnológicos, para avanzar hacia una humanidad *cyborg*.
- Eliminación del envejecimiento (se nos promete que los nanocirujanos reconstruirán el cuerpo y sus órganos).
- Erradicación de la contaminación del aire y el agua (extrayendo los desechos átomo a átomo).
- Fin del hambre (y de la agricultura) a través de la nanoproducción de alimentos.
- Materiales especiales para uso militar: por ejemplo, uniformes reforzados con nanotubos de carbono, que con menos de dos centímetros de grosor podrán resistir impactos de balas de 9 mm. (El gobierno norteamericano ha creado un *Institute of Nanotechnology Soldiers*.)

Fuentes: Pat Roy Mooney, *El siglo ETC. Erosión, Transformación tecnológica y Concentración corporativa en el siglo XXI*. Nordan/ Comunidad, Montevideo 2002.
Joan Carles Ambrojo, “EE.UU. prueba las primeras versiones del cibernado del siglo XXI”, *Ciberpaís*, 11 de octubre de 2001.

³⁰ Pat Roy Mooney, *El siglo ETC. Erosión, Transformación tecnológica y Concentración corporativa en el siglo XXI*. Nordan/ Comunidad, Montevideo 2002, p. 53.

Al lado de estas radiantes promesas, aparecen también ominosos peligros. Uno obvio –a tenor de lo que hemos visto con las biotecnologías, en estos últimos años— es el peligro del *control social obtenido gracias al poderío tecnológico monopolizado por unos pocos*: como ha señalado Pat Roy Mooney, uno de los principales investigadores sobre este asunto, mientras que las transnacionales biotecnológicas luchan por obtener el control del 40% de la economía mundial que se basa en biomateriales, los proponentes de la nanotecnología están buscando nuevas maneras de controlar el restante 60%, más lo que puedan del primer 40%.

También despuntan riesgos sanitarios en el horizonte. En marzo de 2002, la EPA estadounidense (Agencia de Protección Medioambiental) informó que se han encontrado nanopartículas en el hígado de animales de laboratorio, y que se ha comprobado que éstas pueden penetrar en células, o adherirse a bacterias y así entrar en la cadena alimentaria. Con una buena dosis de humor negro, compararon el uso comercial de carbono a nanoescala con “lo mejor que se ha inventado después del amianto mejorado”³¹.

Pero el riesgo mayor que se avista en el horizonte tiene que ver con la capacidad de autorreplicación de las nanomáquinas (sin la cual es difícil que llegue a haber nunca aplicaciones industriales interesantes). Cualquier fallo en el control de esta capacidad podría llevar a una verdadera pesadilla de tipo “aprendiz de brujo”: la producción de nano-objetos y maquinarias invisibles e increíblemente duraderas, acelerada en progresión geométrica. Está claro que el potencial de daños es enorme: el mismo Eric Drexler, uno de los fundadores de la nanotecnología, se refirió a este escenario de pesadilla como *la plaga gris*. Un talentoso informático, Bill Joy –fundador de la empresa Sun Microsystems y nada sospechoso de tecnofobia–, alertó sobre estos problemas en un resonante artículo que publicó la revista *Wired* en abril de 2000: los “nanobots” autorreplicantes fuera de control podrían arrasarse la biosfera en cuestión de días... “Estamos abriendo la caja de Pandora más terrible, aunque casi nadie haya empezado a considerar esta posibilidad. Estamos diseñando tecnologías capaces de consumir, literalmente, ecosistemas enteros.”³² Y más cerca que esta “plaga gris” podría estar una “plaga verde”, como resultado de la fusión entre nano y biotecnologías.³³

“La capacidad central, la de autorreplicación, requiere una diligencia sin igual para evitar riesgos similares o mayores que los asociados con la energía atómica. Por entusiasmante que la nanotecnología pueda ser para la humanidad, si no es controlada, podría resultar más devastadora que cien bombas de Hiroshima o mil accidentes de Chernobil.”³⁴

³¹ “¡No es poca cosa! Partículas nanotecnológicas penetran en las células vivas y se acumulan en las células animales”, comunicado del grupo ETC, 6 de agosto de 2002. Puede consultarse en su página web www.etcgroup.org, que contiene numerosos documentos en castellano.

³² Zac Goldsmith: “¿Tecnoutopía o tecnodesastre?”, entrevista a Bill Joy, *The Ecologist* (edición española), julio de 2001, p. 31.

³³ “La nanotecnología y el príncipe precautorio”, comunicado del grupo ETC, mayo de 2003.

³⁴ Richard H. Smith II: “Molecular nanotechnology: Research funding”, *Science & Technology Policy*, Virginia Tech Graduate School Science and Technology Studies, 6 de diciembre de 1995.

NANOTECNOLOGÍA: EL EJÉRCITO INVISIBLE

«El más formidable de los ejércitos jamás visto sobre la Tierra está formado por una suerte de soldados que, por su pequeño tamaño, resultan invisibles». Sir William Perry se refirió así a los microbios en 1640, pero Eric Drexler, el padre de la nanotecnología, recuperó la cita en su libro *Engines of creation* (Máquinas creadoras). Desde la publicación de esta obra, en 1986, las investigaciones dedicadas a la manipulación de átomos han aumentado descontroladamente, como puso de manifiesto el historiador de la Ciencia Paul Forman en una conferencia ofrecida el pasado viernes en Madrid. Lo nano está de moda y el potencial militar de la ciencia de lo diminuto no ha pasado desapercibido.

En EE.UU., está en marcha desde la primavera pasada un centro para la aplicación bélica de los últimos avances en nanotecnología, gestionado por el ejército estadounidense y el prestigioso Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT). Entre sus logros se encuentra un nuevo chaleco antibalas más ligero y resistente, gracias a que su tejido está trabajado a nivel molecular. Forman, partidario de la cautela ante el vertiginoso desarrollo de lo nano, se refiere irónicamente a estas investigaciones como "trabajos en la línea Star Trek".

En cualquier caso, EEUU no es la única potencia que ha mostrado un reciente interés por el uso militar de la nanotecnología. Paul Hirst, catedrático de Teoría Social en la Universidad de Londres, describió hace unos meses al Instituto de Defensa británico cómo podrían ser las guerras del futuro, y habló de «máquinas biológicas mortales de vida limitada que podrían ser lanzadas como munición para duchar al enemigo con millones de nanorobots que, literalmente, se comerían vivos a los humanos», según informa *The Guardian*.

(...) Para Forman, vivimos en la época de la tecnociencia, en la que la técnica ya no se considera una mera aplicación práctica de la ciencia, sino que, por el contrario, «es la tecnología la que aporta sentido a la ciencia, que ya no establece su propia dirección».

FUENTE: Ángel Díaz en *El Mundo*, 6 de octubre de 2003.

Diablillos nanotecnológicos

“Si la nanotecnología alcanza los objetivos expresados por sus proponentes, ese complejo de tecnologías nuevas cambiará el mundo más que cualquier otro avance tecnológico previo, incluyendo la biotecnología”³⁵. Razón de más para preguntarnos si las nanotecnologías pueden verdaderamente derrotar al principio de entropía, la ley más básica del universo al decir de muchos físicos (entre ellos Albert Einstein).

En mi opinión, *se trata de una ilusión*. Para ver por qué, podemos razonar analógicamente a partir de una figurilla familiar para los físicos: el diablo de Maxwell. En 1871, el renombrado físico J.C. Maxwell propuso una paradoja que parecía poner en cuestión la segunda ley de la termodinámica. Imaginemos un sistema que consta de dos recipientes, A y B, que contienen un gas a la misma temperatura, comunicados sólo por un orificio microscópico que horada la pared de separación. Apostado junto al agujero (tan pequeño que sólo deja pasar las moléculas de una en una: nanoescala, diríamos hoy) tenemos a un diablillo que separa las moléculas veloces (que son las moléculas calientes, ya que la

³⁵ Mooney, *El siglo ETC*, op. cit., p. 55.

temperatura es una medida del movimiento) de las lentas (frías), haciendo pasar las primeras al recipiente A, y las segundas al B. Al final, el sistema presentará una diferencia de temperatura, contradiciendo en apariencia la segunda ley.

¿Dónde está el error? Como señaló Nicholas Georgescu-Roegen, lo que sucede es que el diablillo de Maxwell, como toda criatura viviente, *consumirá energía al separar las moléculas calientes de las frías*, y por ello no se viola en realidad la segunda ley (es el gasto energético del diablillo el que explica la diferencia final de temperaturas entre A y B). Sólo suponiendo un diablillo inmaterial, una pura fuerza del espíritu, tendríamos una auténtica violación del principio de entropía: pero está claro que las puras fuerzas del espíritu podrían obrar no sólo este milagro, sino muchos otros... (Georgescu-Roegen añadía con sorna que “no hay que maravillarse de que muchas teorías sobre la renovabilidad ilimitada de los recursos materiales impliquen, fraudulentamente, un diablo dotado de facultades milagrosas”³⁶).

Pues bien: *el diablillo de Maxwell no es sino un nanorrobot*, y la razón por la que las nanotecnologías no podrán vencer el principio de entropía es la misma por la que la aparente paradoja de Maxwell al final no resulta paradójica. Sólo si los “nanorrobots” autorreplicantes fuesen mágicos seres inmateriales estaría en entredicho la segunda ley: pero está claro que se trata de máquinas —aunque invisibles— construidas con átomos de materia, y por tanto emplearán energía en todas sus nano-operaciones, energía que tendrá que venir de alguna parte. Seguirán sometidos a las leyes físicas, y en particular al principio de entropía: sólo podrán producir orden en un lugar a costa de causar desorden en otro lugar.

No cabe esperar, por tanto, que las nanotecnologías sean el Santo Grial destructor de los límites últimos que constriñen lo humano: una razón más para propugnar modestia, autocontención y aceptación de la finitud. Es sabido que *humilde* y *humano* comparten su etimología.

Eficiencia, suficiencia e insolencia

Como vimos en el capítulo 3, en 1972 la publicación del informe al Club de Roma *The Limits of Growth* tuvo los efectos de un aldabonazo de conciencia de alcance mundial. Hoy seguimos teniendo que preguntarnos: ¿aprenderemos a “no vivir por encima de nuestros medios” en sentido biosférico, vale decir: a vivir dentro de nuestros límites? Hay dos opciones básicas en este sentido:

1. Para evitar la extralimitación, cabe *reducir la producción*: es la cuestión de la *suficiencia*. Aquí las preguntas son: ¿cuánto es suficiente? ¿Cómo se relaciona la producción mercantil con la buena vida?
2. Cabe también “desmaterializar” la producción, haciendo más con menos, y “desacoplando” el bienestar del incremento del *transumo* (*throughput*) de energía y materiales que atraviesa la economía. Es la cuestión de la *eficiencia*.

³⁶ Citado en Enzo Tiezzi, *Tiempos históricos, tiempos biológicos*, FCE, México 1990, p. 53.

A través de estas estrategias, preveía el socialista holandés Sicco Mansholt (miembro de la Comisión de la CEE desde su fundación en 1958 hasta 1974, y presidente de la misma en 1972-74), se abriría

“la posibilidad de un nuevo mundo, unas estructuras que hay que inventar para nosotros, hombres de hoy, y para nuestros hijos de mañana. Es la creación de un nuevo arte de vivir sólo posible ahora, cuando conocemos la limitación de los recursos naturales y a sabiendas de que la técnica y el crecimiento económico no son suficientes para el desarrollo del individuo y su bienestar. (...) Estamos de tal manera inmersos en la fabricación y el uso de productos materiales, que no nos queda lugar para interesarnos en la parte de la vida propiamente humana. (...) Hay que seguir una política que nos conduzca a la reducción de las necesidades artificiales e inútiles, y compensar esta reducción del consumo actual con un estilo de vida, unos medios de vida, que aporten una satisfacción afectiva, intelectual y espiritual. Idear un nuevo arte de vivir”.³⁷

Desafortunadamente, las sociedades industriales, en el último cuarto de siglo, no han emprendido ninguna de estas dos vías que serían eficaces (por separado o en combinación) para abordar nuestros problemas, sino una tercera: la estrategia del avestruz, adobada con una cínica *insolencia*. Hablar, hablar y hablar para no hacer; hacer lo contrario de lo que se dice. *Public relations* en lugar de transformaciones ecosociales. Cumbres mundiales, subcomisiones, CD-roms y páginas web, en lugar de poner manos a la obra para detener el ecocidio. Hay que invertir esta insoportable situación.

APÉNDICE: TERMODINÁMICA, ECONOMÍA Y ECOLOGÍA³⁸

La economía convencional ha tenido en cuenta, más o menos, la primera ley de la termodinámica; 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

³⁷ Sicco Mansholt: *La crisis de nuestra civilización*, Euros, Barcelona 1974, p. 44, 131 y 133. Mansholt, impresionado por el estudio *The Limits of Growth* que analizamos en el capítulo 2, proponía en su resonante “Carta Mansholt” las siguientes condiciones para enderezar el rumbo de las naciones industrializadas: “1. *Prioridad a la producción de alimentos*, con inversiones destinadas también a productos agrícolas considerados como no rentables. 2. *Fuerte reducción del consumo de bienes materiales* por habitante, que se compensará con la ampliación de la oferta de bienes inmateriales (previsión social, desarrollo intelectual, organización del ocio y de las actividades recreativas, etc.). 3. *Notable alargamiento de la duración de la vida de todos los bienes de equipo*, previendo el derroche y evitando la producción de bienes no esenciales. 4. *Lucha contra la contaminación y política de conservación de materias primas*, reorientando las inversiones hacia el reciclaje y las medidas anticontaminación” (AA.VV., *La lettre Mansholt*, Jean-Jacques Pauvert, París 1972, p. 13-14.).

³⁸ Reproducido con leves modificaciones de mi ensayo “Por qué los muertos no resucitan y el reciclado perfecto es imposible”, en Francisco Fernández Buey y Jorge Riechmann, *Ni tribunales –Ideas y materiales para un programa ecosocialista*, Siglo XXI, Madrid 1996, p. 219 y ss.

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.

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.

En cierta ocasión Kenneth Boulding afirmó que "quien crea que el crecimiento exponencial puede durar eternamente en un mundo finito, o es un loco o es un economista". 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*³⁹. 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. (Por lo demás, el problema se desplaza al terreno de la entropía energética: reciclar exige siempre utilizar energía, en cantidades que pueden ser muy grandes, inabordables.) 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 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.

Algún optimismo 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

³⁹ 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. 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).

reutilizados indefinidamente, siempre y cuando la energía necesaria para recogerlos y refinarlos esté disponible"⁴⁰.

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 "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"⁴¹. 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 humana⁴².

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%*.⁴³

(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"⁴⁴.

⁴⁰ Barry Commoner: *En paz con el planeta* (Crítica, Barcelona 1992), p. 142.

⁴¹ Commoner, *En paz con el planeta*, p. 142.

⁴² 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.

⁴³ Herman E. Daly: *Steady-State Economics* (Island Press, Washington 1991), p. 8.

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

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 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."⁴⁵

(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 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.

⁴⁵ 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.

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 entropía⁴⁶.

"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"⁴⁷.

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 azufre⁴⁸. 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 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 concentración de tóxicos organoclorados en las cadenas tróficas, ni el agotamiento del petróleo; 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: 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*

⁴⁶ 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 Brevo/ Antxon Olabe: "Chernóbil", *El País* 24.4.96, 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!

⁴⁷ Schütze, "La incompatibilidad entre economía y ecología", *Debats* 35/36, p. 45.

⁴⁸ Véase Donella H. Meadows/ Dennis L. Meadows/ Jorgen Randers: *Más allá de los límites del crecimiento* (El País/ Aguilar, Madrid 1992), p. 219-220.

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 máquina⁴⁹ 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 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%"⁵⁰.

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

⁴⁹ 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.

⁵⁰ P.W. Atkins, *La segunda ley*, Prensa Científica --colección Biblioteca Scientific American--, Barcelona 1992, p. 41.

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*⁵¹.

Es hora de ir concluyendo. 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; 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"⁵² (24).

Para superar la crisis ecológica y reconstruir nuestras sociedades industriales de forma que resulten sustentables (es decir, ecológicamente compatibles con la biosfera en el 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. Si algún tema merece ser llamado el tema de nuestro tiempo, yo diría que es éste.

⁵¹ 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, Méjico 1989), p. 59.

⁵² Herman E. Daly y John B. Cobb *Para el bien común*, FCE, México 1993, p. 18