

Eric D. Schneider y Dorion Sagan

LA TERMODINÁMICA DE LA VIDA

Física, cosmología, ecología y evolución

TQE

Eric D. Schneider y Dorion Sagan
LA TERMODINÁMICA DE LA VIDA

Traducción de Ambrosio García Leal

TUSQUETS
EDITORES

Título original: *Into the cool. Energy flow, Thermodynamics and life*

1.ª edición: febrero de 2008

© Eric D. Schneider y Dorion Sagan, 2005



© de la traducción: Ambrosio García Leal, 2008
Diseño de la colección: Lluís Clotet y Ramón Úbeda
Diseño de la cubierta: Estudio Úbeda
Reservados todos los derechos de esta edición para
Tusquets Editores, S.A. - Cesare Cantù, 8 - 08023 Barcelona
www.tusquetseditores.com
ISBN: 978-84-8383-052-9
Depósito legal: B. 403-2008
Fotocomposición: David Pablo
Impresión: Limpergraf, S.L. - Mogoda, 29-31 - 08210 Barberà del Vallès
Encuadernación: Reinbook
Impreso en España

R. 127.505

Índice

P.	13	Agradecimientos
	15	Prefacio
	25	Introducción: Problemas en la Agencia de Protección Medioambiental
		Primera parte: Lo energético
	37	1. La paradoja de Schrödinger
	54	2. Simplicidad
	64	3. Ojos de fuego: la energética clásica
	78	4. El casino cósmico: la mecánica estadística
	107	5. La naturaleza aborrece los gradientes
	114	6. El río debe fluir: sistemas abiertos
	131	7. Demasiado, demasiado poco: ciclos
		Segunda parte: Lo complejo
	151	8. El mundo de los remolinos
	166	9. Los «organismos» propios de la física
	172	10. Remolinos y tiempo atmosférico
		Tercera parte: Lo vivo
	185	11. Termodinámica y vida
	205	12. Comienzos sulfurosos
	234	13. <i>Blues</i> para un planeta azul
	258	14. Regresión bajo tensión
	269	15. El secreto de los árboles
	278	16. Del calor al frío
	289	17. Tendencias evolutivas
		Cuarta parte: Lo humano
	319	18. Salud, vigor y longevidad

334	19. Economía
362	20. El diseño de la vida
395	Postfacio: Principios de la termodinámica de sistemas abiertos
	Apéndices
403	Notas
415	Bibliografía
433	Índice onomástico

A tres maravillosas mujeres
que apreciaron el potencial de este libro:
Carol, Jessica y Lynn

En consecuencia: el que quiera tener acierto sin error,
Orden sin desorden,
Es que no entienda los principios
Del cielo y la tierra.
No sabe cómo
Encajan las cosas.

Chuang Tzu, *Grande y Pequeño*

Negar la sucesión temporal, negar el yo, negar el universo astronómico, son desesperaciones aparentes y consuelos secretos. Nuestro destino [...] no es espantoso por irreal; es espantoso porque es irreversible [...]. El tiempo es la sustancia de que estoy hecho. El tiempo es un río que me arrebata, pero yo soy el río; es un tigre que me destroza, pero yo soy el tigre; es un fuego que me consume, pero yo soy el fuego. El mundo, desgraciadamente, es real.

Jorge Luis Borges, *Otras inquisiciones*

Bueno, pensó Rick, en la vida real no hay campanillas mágicas que hagan desaparecer a tu enemigo sin esfuerzo. Una pena. Y Mozart había muerto de una enfermedad renal poco después de escribir *La flauta mágica*, a los treinta y cinco años, y había sido enterrado en una fosa común.

En éstas se preguntó si Mozart tuvo alguna intuición de que el futuro no existía, de que su corto tiempo ya se había agotado. Quizá también el mío, pensó Rick mientras contemplaba el ensayo. Este ensayo se acabará, la representación se acabará, los cantantes morirán, al final la última partitura de la música se destruirá de un modo u otro; el nombre «Mozart» se esfumará, y el polvo habrá ganado. Si no en este planeta, en algún otro. Podemos eludirlo por un tiempo, igual que los androides pueden eludirme y seguir existiendo un rato más. Pero al final, si no los atrapo yo, lo hará algún otro cazador de recompensas. En cierto modo, advirtió, soy parte del proceso de destrucción entrópica de las formas. La Asociación Rosen crea y yo destruyo. O así debe de parecerse a ellos.

En el escenario, Papageno y Pamina entablaban un diálogo. Rick interrumpió su reflexión para escuchar.

PAPAGENO: Mi niña, ¿qué deberíamos decir ahora?

PAMINA: La verdad. Eso es lo que diremos.

Philip K. Dick, *¿Sueñan los androides con ovejas eléctricas?*

La energía es deleite eterno.

William Blake, *El matrimonio de Cielo e Infierno*

AGRADECIMIENTOS

Este libro está en deuda con todos aquellos que nos han precedido. Las ideas de hoy se erigen sobre hombros de gigantes. Entre los gigantes con quienes hemos tenido el privilegio de trabajar están James J. Kay, Jeffrey Wicken y Gene Yates. Buena parte de la aplicación de la termodinámica del no equilibrio a la ecología fue obra de Kay durante una década de colaboración con Schneider. Kay falleció hace poco, a la prematura edad de cuarenta y nueve años. Jeffrey Wicken, también fallecido, puso los cimientos teóricos para nuestra aplicación de la termodinámica a la biología. El físico teórico Gene Yates ha sido para nosotros un mentor científico y una fuente inagotable de ideas fértiles. El profesor Gordon Brittan sufrió la lectura de muchos borradores del manuscrito y los mejoró. Sin el infatigable apoyo de Lynn Margulis este libro no habría visto la luz. La estrecha colaboración con Olivier Toussaint, Don Mikulecky, Robert Ulanowicz, Lothar Koschmieder y Walter Bortz tiene un valor incalculable. Las discusiones con Eugene y Howard Odum, Folke Gunter, Jack Cumberland, Harold Morowitz, Jorge Wagensberg, John Norman, Jeffrey Luvall, Luis Rico, Christine Maurer, Terry Bristo, John Collier Paul Stamets, Clifford Mathews, Steve Shavel, Andrew Blais, Louis Brynes, Arne Jernelov, Jack Corliss, Bruce Weber, Mae-Wan Ho, Tim Cahill y Jim Brown han sido especialmente gratificantes. Asimismo, damos las gracias al artista Robert Spanning por sus ilustraciones, y a Jack McShea y David Walker por los años de apoyo informático.

Incontables colegas nos han ayudado durante los doce años de gestación de este libro. Estamos muy agradecidos a nuestro agente Georges Borchardt. Ha sido un placer trabajar con el personal de University of Chicago Press, incluyendo a nuestra gentil editora, Christie Henry. Junto a ella había profesionales muy competentes, como Jennifer Howard y la correctora Joann Hoy. Estamos en deuda con todos ellos por este libro. Gracias.

Prefacio

Cuando encendemos una vela, la llama crece; pero pronto se instala en un estado estacionario, y se mantiene encendida mientras quede mecha y cera. La vida es un fenómeno similar: una combustión controlada, un flujo de energía estructurado. Esto es más que una analogía. En efecto, los animales obtienen su energía de la reacción del oxígeno con compuestos ricos en hidrógeno, del mismo modo que la llama de una vela se mantiene «viva» siempre que haya oxígeno para la combustión de la cera rica en hidrógeno. Por supuesto, hay diferencias fundamentales. Para empezar, los organismos «queman» su combustible a temperaturas mucho más bajas, y este «fuego» implica no sólo el mantenimiento de una estructura concreta durante un tiempo relativamente corto, sino la reproducción de su forma y función antes de extinguirse (por culpa de un accidente fatal o el inevitable deterioro). La vida, como el fuego, se propaga. Sin embargo, a diferencia de las llamas, los organismos vivos se reproducen. Y, puesto que varían en su reproducción (que nunca es un proceso perfecto) y no todas las variantes sobreviven, la vida evoluciona. También exhibe, en conjunto, una suerte de prudencia, que le ha permitido mantenerse durante más de 3500 millones de años, en lugar de arder como un fugaz meteorito en la noche. Las formas de vida demasiado glotonas agotan sus fuentes de energía y declinan, mientras que las dotadas de inteligencia natural para racionar sus recursos o explotar otros nuevos quizá no brillen como una estrella fugaz, pero sobreviven. Se estima que la gran explosión, el *big bang*, que dio origen al universo, se produjo hace 15.000 millones de años. La vida tiene alrededor de un tercio de esa edad. Como escribió, con licencia poética, Joseph Brodsky, estamos más cerca de la gran explosión que de Roma. Si buscamos nuestros orígenes en las transformaciones naturales, en el ciclo de la materia asociado al flujo de energía, no hace falta ninguna licencia poética para dar la razón a Brodsky. La ciencia que desarrollaremos en este libro trata de la energía y sus transformaciones en los sistemas complejos.

La ciencia en cuestión es una amalgama situada en la frontera entre dos importantes disciplinas modernas, la física y la biología. Es posible que el lector ni siquiera haya oído hablar de ella, o que, si lo ha hecho, sólo la conozca en su forma general y en relación con su principio más famoso, la segunda ley de la termodinámica.

La termodinámica —ciencia que se ocupa del flujo de energía, cuya denominación procede de los términos griegos que designan el calor y el movimiento— comenzó con el estudio de las máquinas de vapor. Pero la disciplina de la que tratamos aquí es, al menos a primera vista, más especializada. Estudia la manera en que los flujos de energía dan lugar a estructuras complejas, es decir, aquellas estructuras que parecen diferenciarse de su entorno, en las que se producen ciclos internos de los fluidos, gases y líquidos de que están compuestas, y que tienden a cambiar y crecer. Tales estructuras, como cualquiera puede reconocer, incluyen a los seres vivos, por lo que esta ciencia es conocida como «termodinámica de la vida». Sin embargo, no sólo comprende la vida, ya que virtualmente se ocupa de todas las estructuras complejas naturales, desde los remolinos hasta los obreros de la construcción. En virtud de los sistemas de flujo que parecen autoorganizarse o que, milagrosamente, están de hecho organizados por los flujos de su entorno, a los que están abiertos y conectados, también se emplea el nombre de «termodinámica de sistemas abiertos». Por si fuera poco, técnicamente la termodinámica de sistemas abiertos es más conocida por la imponente denominación de «termodinámica del no equilibrio», porque los sistemas que centran su interés, esto es, los centros de flujo, crecimiento y cambio, no son estáticos ni inertes, sino que se apartan del equilibrio termodinámico. Para emplear un término menos engorroso (y, de este modo, integrarlo en nuestro propio flujo narrativo), nos referiremos a la termodinámica del no equilibrio con las siglas TNE, siempre que la ocasión lo permita.

Históricamente, la TNE es una ampliación de la termodinámica tradicional, que se ocupaba de sistemas relativamente simples. Sin embargo, puesto que los sistemas estudiados por la TNE están abiertos al flujo de energía, puede afirmarse que la ciencia más básica y general es la TNE, no la termodinámica del equilibrio. Después de todo, se interesa por sistemas que son la norma en el universo, no la excepción. El universo es un lugar complejo, y sus sistemas más comunes e interesantes, incluida la vida, son sistemas abiertos. Sellémoslos, enclaustrémoslos, y se vendrán abajo. Somos una pauta material particular de flujo de energía, con una larga historia y una función natural. Nuestra naturaleza esencial tiene más que ver con el cosmos y sus leyes que con Roma (o cualquier otra sociedad humana) y sus reglas.

La materia de la vida, sus átomos de carbono y oxígeno, se forjó en los núcleos de estrellas que luego explotaron, en un proceso de reciclado más viejo que el Sol. Pero la vida no es sólo materia: también es un proceso. Como Kant observó con perspicacia, un organismo es «a la vez causa y efecto de sí mismo».¹ Esto lo convierte en algo diferente a cualquier otra cosa en el universo; literalmente, en algo más centrado en sí mismo. Las razones de este hecho, y del origen mismo de la vida, pueden retrotraerse a los flujos de energía de un universo energético, muy probablemente una Tierra de hierro fundido, acribillada y caliente, en cuya superficie estallaban burbujas de azufre y silbaban chorros de vapor de agua.² Resulta verosímil pensar que fue en esta caldera donde evolucionaron las primeras maquinarias de copiar naturales, que al principio no eran unas virtuosas de la reproducción como lo son las mariposas y abejas que podemos ver actualmente. En lo más profundo de los ciclos bioquímicos de las bacterias actuales, existen vías metabólicas, reliquias químicas, que repiten, con mayor o menor variación, los pasos que siguió la materia hasta cobrar vida.³ El reciente descubrimiento de ecosistemas abisales que no se sustentan de luz o materia orgánica, sino de energía química, sugiere, de un modo tan paradójico como poético, que el origen de la vida hay que buscarlo en el fuego y el azufre —como corroboran, asimismo, los experimentos que demuestran que en tales clausuras energéticas es posible sintetizar aminoácidos y péptidos.

El descubrimiento de bacterias resistentes al calor y capaces de alimentarse de compuestos de azufre en el fondo del océano y en el interior de las rocas —bacterias agrupadas por el criterio de secuencias comunes de ARN ribosómico— nos revela un escenario en el que la materia, rica en energía, se mantiene y produce más de sí misma antes de que los genes evolucionen. Si la vida dependiese únicamente de los genes, y hubiera evolucionado en primera instancia como ARN o ADN, nunca habría dado lugar a cuerpos complejos que retardan la replicación genética. Los cuerpos e identidades considerados vivos derivan de ciclos complejos de transformación de energía, que sólo más tarde desarrollaron genes.⁴ Sin ánimo alguno de desmerecer las grandes intuiciones de la biología evolutiva, esperamos que este libro contribuya a ampliar la visión científica de la vida más allá de su estrecho enfoque como fenómeno meramente genético. La vida exhibe procesos direccionales, como la expansión, el incremento de taxones o el consumo creciente de energía, difíciles de conciliar con la teoría predominante, que la reduce a un proceso básicamente aleatorio. El incremento evolutivo de la complejidad de la vida (véase el capítulo 17) que tiende a ser arrinconado por no tener cabida en la teoría evolutiva ortodoxa, adquiere sentido cuando se considera la vida

junto con otros sistemas naturales de flujo de energía. Pese a no ser genéticos, estos «sistemas hermanos» revelan pautas características del flujo de energía, incluyendo el incremento de tamaño y complejidad con el paso del tiempo. En el fondo, la vida debe contemplarse como una cuestión tanto de transformación energética como de replicación genética.⁵

En rigor, el término es inadecuado: *vida* es un sustantivo, mientras que el fenómeno al que se refiere es un proceso. Y el término en sí mismo es vitalista: cuando empleamos la palabra *vida*, creemos saber de qué estamos hablando, pero lo cierto es que a menudo no hacemos más que aplicar una etiqueta con la que categorizamos el fenómeno, en lugar de examinarlo de cerca. Desde el punto de vista evolutivo, el proceso que llamamos vida no es estable. Con el paso del tiempo, cada vez más elementos y compuestos químicos se van incorporando al extraño proceso cíclico de transformación energética, hasta llegar a hoy, cuando no sólo ADN y proteínas, sino también plásticos, metales e isótopos radiactivos recorren el globo en un torbellino cada vez más frenético, poderoso y peligroso.⁶ A medida que la vida acapara y pone en juego más energía, incrementa sus capacidades, sus potenciales de crecimiento y destrucción, así como de percepción y autorreflexión. Formas exquisitas que canalizan la energía para el crecimiento (fermentación, metanogénesis, fotosíntesis purpúrea basada en el azufre en lugar del agua) evolucionaron miles de millones de años antes de que los seres humanos comenzaran a explotar la riqueza natural de la madera, el carbón y el petróleo. Estas tendencias, que nos parecen misteriosas cuando interpretamos la vida como un proceso mecánico, adquieren sentido cuando consideramos la vida como un sistema abierto integrado en el flujo de energía. Siempre ha existido una relación entre energía y riqueza, energía y vida, energía y exuberancia. Las economías, las reacciones químicas, los ecosistemas y los sistemas solares se organizan en torno a gradientes energéticos, diferencias naturales de temperatura, presión y potencial químico que establecen las condiciones para el flujo de energía. Los genes constituyen una parte fascinante de una más amplia, la de los flujos de energía que organizan las totalidades en las que los genes están inmersos, y a las que, en última instancia, están subordinados. Incluso los objetos inanimados (los «organismos de la física», como se les ha llamado) comienzan a individualizarse en regiones de flujo de energía. Estas agregaciones inducidas exhiben coherencia, complejidad y, en algunos casos, tendencia a reproducirse. Observarlas de cerca arroja luz sobre procesos diversos, desde el metabolismo y la memoria hasta la economía y la búsqueda de formas de vida ultraterrenas.

En la primera parte de este libro, «Lo energético», seguimos el desarrollo de la termodinámica basada en gradientes desde sus humildes comienzos, cuando se realizaban observaciones de objetos calientes inevitablemente enfriados. Comenzamos nuestro primer capítulo con Schrödinger, cuyo librito *¿Qué es la vida?* tuvo una influencia capital en Watson y Crick, los descubridores de la estructura helicoidal del ADN. Schrödinger acentúa dos cuestiones: la presencia en la vida de un «código químico» (cuya sede resultaron ser los ácidos nucleicos) y la capacidad de la vida para concentrarse en una «corriente de orden», lo cual permite refrenar la tendencia universal de las cosas a descomponerse, a caer en la aleatoriedad termodinámica y el caos atómico.⁷

Es esta segunda cuestión la que nos interesa aquí, aunque no es el asunto principal del libro de Schrödinger, y éste se equivocó en uno de sus aspectos esenciales. La capacidad de la vida para automantenerse, expandirse y reproducirse en un mundo sometido a la segunda ley de la termodinámica es una paradoja, que se explica por el hecho de que los seres vivos, sistemas abiertos y dependientes de la energía de la luz o las reacciones químicas, liberan calor y otros desechos termodinámicos en su entorno. Los organismos no adquieren ni mantienen su complejidad en el vacío. Su elevada organización y baja entropía queda compensada por la polución, el calor y la entropía que desprenden a su alrededor. Si bien la proporción de entropía que aportan, que no estaría ahí sin su intervención, es pequeña en comparación con la enorme cantidad que se produciría en cualquier caso, aun sin su presencia, su capacidad para comportarse como máquinas naturales que producen entropía ayuda a explicar su —nuestra— existencia.

La tendencia de la naturaleza a reducir gradientes, es decir, la tendencia de la energía a disiparse conforme a la segunda ley de la termodinámica, es asistida por organizaciones complejas, vivas y no vivas.⁸ Así pues, la segunda ley nos ayuda a comprender quiénes y qué somos y por qué estamos aquí. Integralmente ligados al entorno del que están separados, pero del que obtienen la energía para crecer, los organismos encuentran nuevas maneras de mantener y expandir su forma. Se turnan en la explotación y agotamiento de fuentes finitas de energía. Su inteligencia, sea consciente y mental o inconsciente y fisiológica, les ayuda a hacerlo. Al consumir energía, al realizar trabajo y construirse a sí mismos, desempeñan una función natural: la producción de entropía prescrita por la segunda ley de la termodinámica, que describe la tendencia al incremento de desorganización y a la generación de caos atómico en cualquier proceso real. Pero no se limitan a obedecer dicha ley, sino que promueven activamente su cumplimiento. Cuando medimos las intermediaciones de

organismos complejos y ecosistemas, observamos que mantienen su temperatura a base de disipar su calor interno, para así acelerar la producción natural de entropía. Irónicamente, o paradójicamente desde cierto punto de vista, aunque de manera bastante natural desde una perspectiva «holística», un sistema complejo cumple de manera más efectiva el objetivo natural de producir entropía que un sistema más simple y menos organizado. Este punto crucial conduce inevitablemente a la sospecha de que los seres vivos tienen una función natural, similar a la fisiología del corazón o de los pulmones, pero en relación con el medio ambiente mismo. Aunque no podemos afirmar categóricamente que el propósito de la vida es fomentar el caos, producir entropía, tal como parece ser la función natural de otros sistemas energéticamente organizados, como los huracanes y las reacciones químicas cíclicas, examinaremos esta controvertida idea. Continuando con el despiadado ataque a nuestro orgullo acometido por la ciencia, que nos ha mostrado una y otra vez que no somos entes especiales, distintos del resto del universo, quizá deberíamos abandonar nuestro último bastión, la convicción de que nuestra inteligencia y designio están por encima del resto de la naturaleza. Si la ciencia ha desmontado las ideas de que nos hallamos en el centro del universo, de que estamos hechos de una materia especial y de que no poseemos vínculos con los demás animales, sino con Dios, entonces el propósito de la vida quizá también sea vulnerable al ataque científico. Tal vez la vida, que tiene tanto en común con otros sistemas complejos energéticamente organizados, tenga en el fondo la prosaica función de transformar energía. Sabíamos que no éramos *tan* especiales. Pero el terrible espectro, la oscura sombra de la termodinámica nos amenaza ahora con revelarnos que podríamos ser aún *menos* especiales de lo que creíamos. Puede que seamos, parafraseando a Tallulah Bankhead, «tan puros como el agua de cloaca».

Pero la fuerza de la TNE apenas depende de la tesis radical, herética tanto para la ciencia como para la religión, de que una de las funciones primordiales de la vida es la producción óptima de entropía. La TNE arroja luz sobre una amplia variedad de temas, desde la ecología y la economía hasta la búsqueda de vida extraterrestre (lo que la NASA llama ahora «astrobiología»). Alimentada por la luz del Sol, la biosfera ha organizado la atmósfera planetaria mediante su intercambio de gases; tanto es así que unos alienígenas que analizaran la atmósfera de la Tierra con un interferómetro extraterrestre podrían inferir nuestra presencia a partir de la química atmosférica, que se encuentra lejos del equilibrio termodinámico.⁹ Las «ciencias de la complejidad» basadas en simulaciones por ordenador son muy prometedoras y han recibido mucha atención, pero tienden a una insularidad e idealización matemática que puede hacerles

perder contacto con los hechos que pretenden modelar.¹⁰ Esto vale especialmente para la ecología y la evolución, que, según nuestra concepción, son fenómenos basados en el flujo de energía. Las pautas basadas en algoritmos de ordenador, aunque agradables a la vista y cautivadoras para la mente, guardan poca relación con la realidad que supuestamente simulan. Llevado al límite, puede decirse que la «vida artificial» es a la vida lo que una muñeca es a una mujer, es decir, un remedo superficial y no una recreación integral. Así pues, a diferencia de otros libros recientes sobre el tema de la complejidad —aunque sin desmerecer una matemática experimental con grandes perspectivas de futuro—, estamos mucho menos interesados en las simulaciones de la realidad biológica que en la realidad biológica misma. Con un enfoque centrado en las conferencias de Schrödinger, que pusieron los cimientos del programa de investigación que condujo a la biología molecular, la TNE puede revelarse a largo plazo más importante para nuestra comprensión de la aparición y persistencia de la complejidad en la naturaleza que la biología molecular o las simulaciones insulares.¹¹ Para los seres vivos, el equilibrio termodinámico equivale a la muerte, por lo que es imperativo comprender la TNE, el camino menos tomado en la bifurcación del «legado dual» de Schrödinger.¹²

En la segunda parte, «Lo complejo», investigamos sistemas complejos no vivos, entre los que se incluyen las células convectivas de Bénard, las reacciones químicas autoorganizadas espontáneamente y los tornados. Aunque más simples que la vida, estos sistemas muestran comportamientos cíclicos y una coherencia masiva entre sus partes. «Viven» por un tiempo, es decir, se individualizan y diferencian del caos relativo circundante. Surgidos de forma espontánea (como seguramente también la vida), estos sistemas complejos son establecidos por un *gradiente*, una diferencia medible de presión, temperatura o concentración química. Los gradientes inducen un flujo de energía y, si las condiciones son favorables, surgen sistemas complejos —y, en algunas ocasiones, como en el caso de los vórtices de Taylor y otras estructuras hidrodinámicas complejas, incluso se «reproducen»— que contribuyen a reducir los gradientes medioambientales.¹³ ¿Podemos ver en estos sistemas relativamente simples a los precursores de la fisiología, la capacidad de regular y resistir las perturbaciones, que se desarrollaría plenamente con el advenimiento de la vida?

La tercera parte, «Lo vivo», presenta la sustancia científica del libro. Los gradientes de temperatura y presión en el interior de estrellas masivas constituyeron el crisol donde se cocieron los elementos de la vida, y los gradientes cósmicos también organizaron la química del sistema so-

lar, enviando los materiales más densos al centro y los más ligeros a la periferia. Si la vida surgió en la Tierra —lo cual es más que probable, teniendo en cuenta los incrementos naturales de organización en regiones expuestas a flujos de energía—, puede que se originara en el fondo de los océanos, en asociación con capas de minerales¹⁴ precipitados por fumarolas submarinas que proporcionaban gradientes de temperatura y sulfuro.¹⁵ Estas fumarolas, muy habituales en la Tierra geológicamente joven, habrían proporcionado el metabolismo basado en el sulfuro de hierro necesario para la reproducción de los precursores de las arqueobacterias —procariotas resistentes al calor, productores de metano y otros «extremófilos» cuyo último ancestro común, como sugieren las comparaciones de su ARN ribosómico, también tenía un metabolismo sulfúreo.¹⁶

Tras una breve discusión sobre la historia de la ecología, presentaremos datos comparativos para mostrar que los ecosistemas se comportan igual que otros sistemas termodinámicos: crecen, reciclan materiales y se desarrollan de manera predecible en respuesta a un flujo de energía medioambiental. También de manera predecible, experimentan una regresión cuando se ven privados de energía o de su aprovechamiento debido al deterioro. Los ecosistemas estresados revierten hacia estadios previos en su desarrollo de un modo análogo al comportamiento de otros sistemas termodinámicos privados de flujo de energía. Los termómetros aéreos y los satélites meteorológicos muestran que los ecosistemas más ricos y complejos, como los de la cuenca del Amazonas, son los más eficientes en la reducción del gradiente térmico entre la superficie terrestre y el espacio exterior. Los ecosistemas termodinámicamente competentes se refrigeran principalmente por evapotranspiración, es decir, a través del flujo de agua que asciende por los troncos de los árboles y se evapora en las hojas. Registrados desde el espacio en los meses más cálidos, los ecosistemas neblinosos combinados de Indonesia, Java, el Congo y el Amazonas están a la temperatura del Canadá septentrional en lo más crudo del invierno. Esta prodigiosa actividad termodinámica es un indicador de la relación entre organización, lo vivo y lo no vivo, y flujo de energía. Como en otros sistemas termodinámicos, la complejidad de la vida es una derivación natural de la reducción de gradientes implícita en la segunda ley: allí donde las circunstancias lo permiten, surgen organizaciones cíclicas para disipar entropía en forma de calor. Los gradientes, como el de la temperatura entre el Sol y el espacio exterior, pueden ser enormes, y eliminarlos puede llevar eones. Pero los sistemas complejos asociados a los gradientes son naturales. Aunque a veces parezcan estar organizados por una fuerza externa, no se requiere ningún «agente deliberado», como dijo Aristóteles hace más de veinte siglos.¹⁷

Así como la evolución darwiniana conecta al ser humano con otras formas de vida, la TNE conecta la vida con los sistemas complejos no vivos. El último capítulo de esta sección pasa de la ecología a la evolución para mostrar cómo la termodinámica nos ayuda a comprender el progreso, observable por la tendencia al incremento de los taxones (especialmente los superiores), la respiración y la percepción e inteligencia con el paso del tiempo. A pesar de que la Tierra ha sufrido varios periodos geológicos de extinción masiva, muy probablemente causados por impactos catastróficos de meteoritos seguidos de cambios climáticos y periodos de vulcanismo,¹⁸ y a pesar de la naturaleza aleatoria de tales impactos, la vida en general se ha recuperado siempre, y tras esos periodos ha alcanzado nuevas cotas en el uso, almacenamiento y reciclado de la energía. La diversidad biológica tiene muchas explicaciones, pero la más general hay que buscarla en una mayor energía disponible y un mayor número de especies en el Ecuador terrestre. Puesto que el acceso a los gradientes se mejora mediante el perfeccionamiento de la percepción, puede argumentarse que el incremento de la inteligencia es una tendencia evolutiva que promueve selectivamente la prosperidad de aquellos que explotan recursos menguantes sin agotarlos.

En la cuarta parte, «Lo humano», examinaremos cómo la TNE arroja luz sobre la economía, la salud y nuestro lugar en un cosmos energético de grandes posibilidades. Aunque la nuestra no es, ni mucho menos, una interpretación religiosa tradicional, señalamos que los organismos son entes intencionales, y que esta tendencia, conectada con la necesidad de encontrar alimento y parejas sexuales y de excretar desechos, puede entenderse como un reflejo de su génesis termodinámica.

Introducción

Problemas en la Agencia de Protección Medioambiental

La energía es la única vida.

William Blake

Confesiones de un funcionario gubernamental

En 1971, a uno de nosotros, Eric Schneider, le quitaban el sueño dos cuestiones simples: ¿existen leyes que gobiernen el comportamiento de ecosistemas enteros?; y si es así, ¿cuáles son?

Es posible que por aquel entonces no hubiese nadie en el mundo para quien resultase más útil responder a estas preguntas. Como director del Laboratorio Nacional de Calidad del Agua Marina de la Agencia de Protección Medioambiental (APM), situado en Narragansett, Rhode Island, la misión de Eric era proporcionar datos científicos para preservar la calidad del agua de costas y estuarios. Las leyes estadounidenses confiaban específicamente a la APM la responsabilidad de proteger la salud humana, los bancos de pesca y los ecosistemas de las aguas costeras. Lo que se esperaba de Eric era que evaluara la salud de los ecosistemas sin ninguna definición de salud ecosistémica y sin instrumentos de medida adecuados. No era una tarea fácil.

Cuando en 1971 tomó posesión de su cargo como director del laboratorio de la APM, Eric se encontró con que la mayoría de datos disponibles consistía en pruebas de toxicidad muy simples realizadas con algas y peces pequeños. Según un protocolo típico, se sometía a especímenes adultos del pez *Fundulus heteroclitus* a un tóxico hasta que moría un porcentaje medible de ellos. Se aplicaban numerosas pruebas a organismos que «se mantenían bien». Dicho sin rodeos, los organismos seleccionados eran aquellos que podían sobrevivir aislados en frascos de vidrio aireados. Los experimentos de la APM se completaban en 96 horas, un lapso de cuatro días que permitía montarlos y desmontarlos en el plazo administrativo de una semana. Si bien el protocolo era poco riguroso desde el punto de vista científico, era conveniente a efectos burocráticos. El principal problema era que las especies empleadas no eran necesaria-

mente representativas de la salud ecosistémica. Por ejemplo, algunos de los organismos más resistentes pertenecían a especies pioneras que recolonizaban ecosistemas degradados, por lo que más bien eran indicadores de una mala salud ecosistémica. Contar cuántos miembros de una especie resistente, mantenidos en frascos aireados, morían al cabo de 96 horas de exposición a un veneno: ésta era la base de nuestros estándares nacionales de calidad del agua en los años sesenta y a principios de los setenta.

Aunque Eric no era biólogo de formación —era doctor en geología marina por la Universidad de Columbia—, tenía claro que el cometido del laboratorio no era mantener pececillos resistentes a altas dosis de veneno, sino proteger ecosistemas marinos enteros. ¿De qué servía —razonó— establecer un estándar de calidad del agua basado en unos peces cuyas presas morían al estar expuestas a concentraciones de tóxico mucho más bajas? ¿Y si la vida de estos «tipos duros» dependía de otros organismos más susceptibles a los venenos? En ese caso, la resistencia no garantizaría la supervivencia. De hecho, por aquel entonces se sabía bastante poco sobre las conexiones entre las especies. ¿Acaso los miembros de ecosistemas saludables, como las personas con un alto nivel de bienestar, no están conectados a una vibrante e interdependiente comunidad compuesta por otros seres?

Cuando Schneider planteó la pregunta obvia de por qué no se examinaban ecosistemas enteros, sus colaboradores hicieron comentarios como éstos: «no se puede traer un ecosistema entero al laboratorio» o «no se puede replicar un sistema natural en el laboratorio».

Unos años más tarde, sin embargo, aquellos mismos investigadores estaban estudiando ecosistemas marinos en miniatura. Estos ecosistemas a escala reducida (o «mesocosmos», como fueron denominados) eran versiones en miniatura de la bahía de Narragansett. Los sistemas interdependientes consistían en numerosas especies representativas mantenidas en tanques donde se había filtrado agua marina procedente de la zona. Y remedaban el ecosistema real de la bahía con sorprendente precisión. No obstante, seguía siendo imposible llevar a cabo experimentos de toxicidad en el medio ambiente natural; comprensiblemente, la APM y los controladores de polución estatales se mostraron en contra de verter toxinas, como el mercurio, en los mares o marismas naturales, ni siquiera en pos de los más elevados fines científicos. Al mismo tiempo, las áreas polucionadas de manera «natural», por el vertido de petróleo o el mercurio procedente de la producción de papel, se convirtieron en laboratorios improvisados donde los científicos intentaban evaluar la circulación de los materiales tóxicos y la recuperación, si la había, de los ecosistemas

deteriorados. Para resumir una larga historia: en 1971, Eric tuvo claro que la toxicología ecosistémica —una subdisciplina de la ecología, y la ciencia que necesitaba la APM, si es que realmente quería proteger el medio ambiente— estaba en mantillas. Lo mismo se podía decir de la ecología en general. Aunque los hábitats humanos estaban cada vez más amenazados, la ciencia requerida para comprender con precisión cómo se habían degradado y, por ende, cómo podían recuperarse apenas existía.

Desde entonces, la ecología ha experimentado grandes progresos. Los ecólogos estudian las interacciones que determinan la distribución y abundancia de organismos. La mayor parte de lo que sabemos al respecto es fruto de cientos de años de observaciones minuciosas de cambios en especies, poblaciones y paisajes. Sin embargo, la organización de tales observaciones fue acometida apenas en los últimos 150 años. Así, la ecología se dividió en numerosas ramas especializadas: ecología de poblaciones, teoría de la relación depredador-presa, teoría de nichos, autoecología, sinecología, ecología de ecosistemas, microecología, ecología de hormigas, ecología del elefante y ecología humana, además de innumerables modelos. Pero ¿dónde estaba la teoría general capaz de predecir el comportamiento real de la totalidad del ecosistema?, se preguntó Eric. ¿Dónde estaba la teoría que pudiese decirnos qué le ocurriría a un determinado lago si su temperatura ambiente se incrementase en 5 °C, o si se acidificase; o qué le ocurriría a otro ecosistema con organismos distintos en las mismas condiciones? Químicos marinos descubrieron que contaminantes como el DDT, los elementos radiactivos y el mercurio circulaban por todo el ecosistema y habían llegado a afectar a las personas. Pero ¿qué rutas tomaban estos materiales tóxicos, cuáles eran sus tasas de circulación y dónde se acumulaban materiales similares en los sistemas naturales? A Eric le parecía que lo que la APM necesitaba era una teoría que explicara el flujo material y energético a través del ecosistema en su totalidad.

Quizá por su formación en ciencias físicas, Eric estaba predispuesto a buscar regularidades y leyes aplicables a todos los ecosistemas. En particular, le atrajeron las investigaciones realizadas por los primeros especialistas en flujo de energía. ¿Podría haber principios físicos simples subyacentes a la complejidad biológica, tanto en los ecosistemas locales como en la biosfera en su totalidad? Parecía que los autores de mayor relevancia por fin se ocupaban más de ecosistemas completos que de sus partes constituyentes. Unos pocos grupos, en particular el compuesto por los discípulos de G. Evelyn Hutchinson en la Universidad de Yale, habían hecho incursiones significativas en el seguimiento del flujo de energía a través de ecosistemas enteros, y de su efecto sobre éstos. Hutchinson y

sus colegas —primero en el Simposio sobre Biología Cuantitativa de Cold Spring Harbor, celebrado en 1957, y luego en el Simposio sobre Diversidad y Estabilidad de Sistemas Ecológicos de Brookhaven— ampliaron el estrecho enfoque centrado en la distribución y abundancia de especies individuales. Las intuiciones de Hutchinson y sus discípulos permitieron ir más allá de la cuantificación de nutrientes interactivos y sus efectos, y llevaron a Eric Schneider y algunos otros a hacerse la pregunta más amplia de *por qué* los ecosistemas se comportan tal como lo hacen, una cuestión directamente relacionada con la fascinante pregunta —algunos dirían «la pregunta de las preguntas»— de por qué, desde una perspectiva material y física, existe la vida.

La respuesta tenía que ver con la energía, y al final arrojó luz no sólo sobre los ecosistemas, sino también sobre los organismos y los sistemas no vivos, cuyo dominio se ha dado en llamar «ciencias de la complejidad». De hecho, como descubrió más tarde con gran alegría y sorpresa, Eric no estaba solo: por aquel entonces se encontraba en marcha un programa de investigación de lo más prometedor que ligaba la biología a la física de la energía. Fue como encontrar un tesoro enterrado: además de unas cuantas gemas envueltas en la investigación teórica previa, resultó que ya se habían enumerado las características termodinámicas de un puñado de ecosistemas. Con alborozo, Eric descubrió que existía una termodinámica ecológica joven pero sofisticada que estudiaba específicamente el flujo de energía y sus transformaciones en los sistemas naturales.

Ya en los comienzos de la termodinámica —la ciencia del movimiento del calor y las transformaciones de la energía—, Ludwig Boltzmann, uno de sus fundadores, tenía cosas importantes que decir sobre la vida. Científicamente hablando, la vida puede contemplarse como un tipo de sistema complejo regido por la energía y sus transformaciones. Al tratarse de una ciencia dedicada al flujo de energía y la cinética química, la termodinámica es crucial para comprender la vida. Los investigadores que deseen entender el flujo y las transformaciones de la energía en la biología deben tener en cuenta la termodinámica, ya que una propuesta teórica que no se ajuste a los principios termodinámicos carece de sentido. Tal como Eric comprobó más tarde, esta oscura ciencia, que partió del diseño de máquinas de vapor eficientes, era indispensable para comprender la vida. En la actualidad, las ciencias del flujo de energía derivadas de la termodinámica arrojan luz sobre el crecimiento y desarrollo de los organismos, el origen y la historia de la vida, el desarrollo de los ecosistemas y la búsqueda de modos de vida más sostenibles. La investiga-

ción de Eric sobre los principios físicos que rigen los ecosistemas se convirtió en parte de una ciencia totalmente nueva, la termodinámica de la biología. Esta ciencia emergente ha generado sus propias hipótesis e ideas, y algunas de éstas han sido corroboradas o lo están siendo por datos ecosistémicos recopilados con anterioridad. Una de las ideas más interesantes de esta nueva ciencia tiene que ver no sólo con la manera en que el flujo de energía organiza la vida, sino con la razón material de su existencia.

La nueva termodinámica

La termodinámica, con frecuencia considerada como un gris, aburrido e irrelevante erial matemático de tablas y verborrea arcana, importante quizá para las mediciones moleculares realizadas en el laboratorio, para los creacionistas o los historiadores victorianos, pero sin interés para el científico común o el hombre de la calle, resulta ser un campo de lo más fascinante, que atañe directamente a nuestra comprensión más profunda de la vida y sus operaciones. Entre aquellos que han concebido, esclarecido y perfeccionado los fundamentos de la termodinámica clásica se encuentran algunos de los más grandes nombres de la historia de la ciencia: Carnot, Clausius, Boltzmann, Gibbs, Maxwell, Planck y Einstein. Pero la suya era una termodinámica de los sistemas en equilibrio, sistemas que sí eran aburridos porque estaban abocados a la estasis, un estado final donde nada (al menos, nada interesante) ocurría. Como canta David Byrne: «El cielo es un lugar donde nunca pasa nada». De hecho, los resultados iniciales de la joven ciencia se extrapolaron prematuramente al universo entero para predecir un estado final más aburrido que el cielo y más frío que el infierno, un apocalipsis nada místico y con menos sentido que la fantasía más pesimista del filósofo más depresivo. Esta predicción se conoció como la «muerte térmica» del universo.

Un libro decimonónico mostraba a un hombre de barba blanca mirando con expresión de horror hacia el océano, que se había congelado. Un sol moribundo y un océano de hielo sólido: éstas eran las inevitables conclusiones a que llegaba la nueva gran disciplina cuyo tema era la energía, cómo extraerla, cómo entenderla y cómo sacar el mejor partido de los motores de vapor para conseguir el dominio nacional. «Así es como acabará el mundo, no con una explosión, sino con un sollozo», escribió el poeta T.S. Eliot. El pobre universo se paralizaría hasta tal punto que no restaría la más mínima esperanza de que alguna vez renaciera, como el ave fénix, de sus propias cenizas. En el marco de este juicio final pro-

nunciado por la ciencia, de este caos atómico sin recompensa, la empresa humana parecía ridícula. Puede que la muerte térmica proporcionara un sustento secreto a las filosofías europeas del existencialismo y el nihilismo, y al teatro del absurdo de dramaturgos como Harold Pinter y Samuel Beckett. Como frenéticas hormigas, tan fáciles de pisotear, nuestras insignificantes vidas eran en última instancia ridículas en su vanidad, por muy civilizados que fuéramos o por mucho que hubiésemos evolucionado. Creyentes de los siglos anteriores, como William Buckland, se prodigaron en dar gracias a la providencia por haberse dignado a favorecer a Gran Bretaña con abundantes reservas de carbón, la fuente energética de la Revolución industrial y el dominio global, que, con la aquiescencia divina, garantizaba la hegemonía inglesa. Pero las mentes posteriores, de inclinación más científica, no podían estar tan seguras. La vida parecía el accidente supremo, una especie de carambola cósmica. Toda organización, incluida la de nuestro planeta, estaba en proceso de desaparición. La vida o bien no duraría, o bien, como les gustaba argumentar a los creacionistas (algunos todavía lo hacen), había sido creada, animada y mantenida por la divinidad, en un universo por lo demás destinado a una destrucción irreparable. Y la ciencia —la termodinámica— lo había demostrado.

Bueno, no vayamos tan deprisa. Lejos de predecir la extinción cósmica, la termodinámica moderna nos dice que, en regiones del universo expuestas a un flujo de energía, a menudo surgen estructuras complejas, vivas o no, que se expanden e incrementan su complejidad. Puesto que las interacciones entre las fuerzas fundamentales del universo —la gravedad, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares débil y fuerte— no están completamente integradas, como tampoco lo está la materia total del universo conocido, la expectativa de una muerte térmica (o siquiera un final) no es científicamente creíble. Este libro se centra en la evolución que ha experimentado la termodinámica durante los últimos cincuenta años, la cual ha permitido el estudio de una nueva clase de sistemas termodinámicos conocidos como «sistemas disipativos o de no equilibrio» —porque existen a cierta distancia del equilibrio termodinámico—. Las estructuras estudiadas por esta nueva ciencia incluyen los cumulonimbos, los remolinos, los ciclos químicos intrincados y los seres vivos. Los introductores de esta termodinámica expandida no son tan conocidos por la mayoría como los fundadores de la disciplina, pero incluyen a científicos de la talla de Alfred Lotka, Lars Onsager, Erwin Schrödinger, Ilya Prigogine, George Hatsopoulos, Joseph Keenan, Joseph Kestin, Don Mikulecky y Jeffrey Wicken. A hombros de estos gigantes, la termodinámica se ha ampliado, ahora no sólo se aplica a los motores mecánicos, sino también a

la vida, a la vez que se ha simplificado. Lo que más nos interesa aquí es la gran simplificación sintetizada en el aforismo «la naturaleza aborrece los gradientes».¹ Este concepto sorprendentemente fructífero, que exponemos en detalle, condensa buena parte de la investigación reciente en termodinámica.

La idea de que la naturaleza aborrece los gradientes, una de las nociones clave de este libro, es muy simple: un gradiente no es más que una diferencia de temperatura, presión o concentración química, por ejemplo a lo largo de una distancia. La aversión de la naturaleza hacia los gradientes implica que éstos tenderán espontáneamente a desaparecer, de manera especialmente espectacular por la acción de sistemas complejos autoorganizados, que aceleran su disgregación. El concepto simple de gradientes que se deshacen resume la difícil ciencia de la termodinámica, desmitifica la entropía —tan importante para el universo como la gravedad y arroja luz sobre cómo surgen de manera natural estructuras y procesos complejos, incluidos los de la vida.

Un caso de supresión de gradientes con el que estamos familiarizados, y que se relaciona con la aversión de la naturaleza por el vacío, es la compresión espontánea de una lata de metal de la que se haya extraído el aire. En este ejemplo, la naturaleza rectifica la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la lata, sobre la que el aire circundante ejerce una presión de casi un kilo por centímetro cuadrado. Pero en este libro vamos mucho más allá del ejemplo anterior. Así, pondremos de manifiesto que la aversión de la naturaleza por este y muchos otros gradientes es una ley de la naturaleza, una tendencia imparable en la que el flujo de energía propicia una variedad de sistemas complejos naturales, incluida la vida. Mostraremos la gran importancia de esta ley —la llamada «segunda ley de la termodinámica»— en el origen, la persistencia y el eventual ocaso de los sistemas complejos naturales, desde los remolinos hasta las naciones-Estado. Asimismo, repasaremos la historia del pensamiento científico sobre la energía y la materia hasta el presente, cuando nos encontramos en la antesala de una gran unificación científica. La energía procedente del Sol genera, perpetúa y elabora identidades, desde torbellinos y flores hasta economías y gobiernos, muchas de las cuales parecen planeadas por una mano u ojo invisible.

En este ensayo argumentamos que el surgimiento y evolución de la vida es un proceso cíclico gobernado por el flujo de energía. Aunque la vida es salvaguardada por la biotecnología natural y la replicación del ADN, y se propaga mediante células reproductivas, es la energía la que proporciona al proceso evolutivo el ímpetu para comenzar y persistir. Las estructuras cíclicas complejas surgen alrededor de flujos de energía. La

vida, desde su apenas visible inicio microscópico hasta su posible futuro interplanetario e interestelar, es una de esas estructuras.

La vida como manifestación de la segunda ley

Los estudiosos de la termodinámica clásica reconocían tanto el poder como las limitaciones de su ciencia. Sabían que vivían en un mundo que se apartaba bastante de los sistemas, altamente idealizados, en que reinaban la máxima entropía y el desorden. En ninguna parte este aparente conflicto se mostraba tan patente como cuando se comparaba la evolución de la vida con la predicción de que los procesos aleatorios conducirían a la muerte térmica del universo. En su formulación original, la segunda ley presagiaba que las cosas perderían inexorablemente su capacidad de realizar trabajo, que se consumirían lentamente hasta que todos los estados fueran de equilibrio, sin energía aprovechable por organismos o máquinas. Sin embargo, la vida exhibe una tendencia opuesta de complejidad creciente con el paso del tiempo.

¿Cómo es posible? En este libro llamamos a esta paradoja «la paradoja de Schrödinger», el físico pionero de la mecánica cuántica que insistió en la necesidad de explicar el aparente incumplimiento de la segunda ley de la termodinámica por parte de la vida. En su versión original básica, la segunda ley establece que la entropía (desorden atómico o molecular) aumenta inevitablemente en cualquier sistema aislado. Pero los seres vivos mantienen e, incluso, elaboran exquisitas organizaciones atómicas y moleculares a lo largo de los eones.

Eric Schneider había emprendido una misión: la fundamentación científica de la biología y la ecología. Tan pronto como los ecólogos energéticos le pusieron al corriente, buscó los equivalentes ecológicos de las leyes de Newton, la $F = ma$ (fuerza = masa \times aceleración) de la física. ¿Dónde estaban las ecuaciones simples, como las que describen el transporte en fluidos (las denominadas «ecuaciones de Navier-Stokes»), para los ecosistemas? ¿Existían siquiera? Al principio parecía que no. Pero su búsqueda, detallada en el famoso libro de Schrödinger *¿Qué es la vida?*, publicado en 1944, ciertamente sí existía. Las tres conferencias en que se basaba el libro de Schrödinger esbozaban dos ciencias futuras: la biología molecular, que tan potente ha demostrado ser, y la termodinámica biológica, que aún tiene que probar su valía. El otro asunto abordado por Schrödinger constituye el tema del presente libro. *La termodinámica de la vida* debería considerarse como un viaje al núcleo de una ciencia emergente que une la vida con la física, una combinación que algún día puede

llegar a ser tan potente como la biología molecular y tan práctica como la biotecnología. En este ensayo contrastaremos nuestro pensamiento «biotermodinámico» con los datos existentes y lo ampliaremos a la economía, la sanidad, la sostenibilidad de los ecosistemas y la posibilidad de que haya vida en el espacio exterior.

Al final se plantean diversas cuestiones filosóficas que resultan ineludibles. La principal es la existencia de la vida. ¿Por qué existe la vida? ¿Tiene ésta, desde una perspectiva científica, una función general? Nuestra respuesta es que sí. Un gradiente de presión barométrica en la atmósfera (la diferencia entre masas de alta y baja presión) da pie a un tornado, un sistema cíclico complejo. La función del tornado, su propósito, es eliminar el gradiente. La vida tiene un propósito natural similar. Sólo que, en vez de deshacer rápidamente un gradiente de presión y después desaparecer, la vida tiende a reducir, en el transcurso de miles de millones de años, el enorme gradiente estelar que existe entre el Sol caliente y el espacio frío, ganando complejidad en el proceso. La evolución de formas de vida complejas e inteligentes puede explicarse por la eficacia de la vida como sistema cíclico consagrado a la reducción de gradientes. La función original y básica de la vida, como la de los otros sistemas complejos que examinamos en este libro, es reducir un gradiente medioambiental.

El crítico cultural C.P. Snow, descontento con la distancia creciente entre las ciencias y las artes, sugirió que toda persona culta debería conocer la segunda ley de la termodinámica. En su libro *Two Cultures and a Second Look* —un precursor disparo de advertencia en el siempre cambiante campo de batalla de la guerra de culturas— afirma que no conocer la segunda ley de la termodinámica equivale a no haber leído ninguna obra de Shakespeare.² Esta ley no es ni una garantía de muerte térmica ni un arcano matemático que sólo interesa a los químicos de polímeros. Por el contrario, contribuye a explicar la creación y elaboración de sistemas complejos impulsados por flujos de energía. Además, dirige nuestra atención hacia los procesos direccionales que observamos en muchas clases de sistemas complejos en desarrollo, incluidos los de nuestra propia evolución. En resumen, los fenómenos naturales descritos con la rúbrica de la segunda ley de la termodinámica no sólo destruyen, sino que también crean (mediante la destrucción de gradientes).

Primera parte
Lo energético

1

La paradoja de Schrödinger

¡Tigre! ¡Tigre! Ardiente resplandor
en las selvas de la noche;
¿qué inmortal mano o qué ojo
pudo enmarcar tu temida simetría?

William Blake,
*Canciones de inocencia y de experiencia**

La base material de la vida

El 5 de febrero de 1943, la sala de conferencias del Trinity College de Dublín estaba abarrotada de dignatarios, diplomáticos, líderes del gobierno irlandés y la jerarquía católica, artistas, personalidades sociales y estudiantes. Habían acudido a escuchar al nobel Erwin Schrödinger, el famoso científico refugiado de la Austria ocupada por Hitler. Sólo cinco años antes, el 14 de septiembre de 1938, Schrödinger y su esposa Anne habían escapado por los pelos de los nazis. Se despidió de la ciudad de Graz y se trasladó a Roma con tres maletas por todo equipaje; atrás quedaron sus medallas de oro del Premio Nobel y la cadena de la Academia Papal. Después de un breve asilo en el Vaticano, visitó la Universidad de Oxford, y un año más tarde se le concedió una cátedra en el Trinity College irlandés.

El tema de la conferencia, la primera de un ciclo de tres con el título genérico de «¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva», era más interesante y mucho más amplio que la charla inicialmente programada, «Sobre la tasa de mutación causada por los rayos X en la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*». Schrödinger había dirigido su gran inteligencia intuitiva y analítica hacia una de las cuestiones más ambiciosas que existen: la comprensión de la vida como sistema material.

Schrödinger no era un ingenuo. Venía de refinar la descripción matemática del comportamiento impredecible de las partículas subatómicas (la llamada «función de onda»). Convencido de que la vida también podía ser tratada como un proceso físico, quiso compartir sus intuiciones. Al hacerlo, se aventuró por senderos que pocos habían osado transitar.

* La traducción española ha sido extraída de: William Blake, *Canciones de inocencia y de experiencia*, Cátedra, Madrid, 1987. (N. del T.)

Puede que su éxito en la descripción de fenómenos cuánticos extraños le preparara para escrutar la impredecible vida. (La termodinámica se había adelantado a la mecánica cuántica como teoría física que integraba la probabilidad.) Al insistir en la transmisión de datos y en las transformaciones energéticas de la vida, expresó su fe en que también la biología acabaría revelando su entramado químico y físico.

Nacido en Austria en 1887, Schrödinger fue condecorado por sus servicios como oficial de artillería en varios frentes durante la primera guerra mundial. Aparte de su fama de donjuán impenitente (sedujo a dos hermanas cuyos padres lo habían contratado como profesor particular de matemáticas), se le conocía por su deslumbrante intelecto. En los primeros seis meses de 1926 escribió cuatro artículos que cambiaron el mundo de la física. Estos artículos, junto con la obra del físico alemán Werner Heisenberg, contemporáneo suyo, pusieron los cimientos matemáticos de la mecánica cuántica. El mundo de las partículas subatómicas podía describirse en términos de la teoría de la probabilidad, pero no representarse en términos de la realidad ordinaria. Schrödinger, quien describió el colapso de las realidades múltiples de los cuantos en una única realidad observacional, vinculó el extraño comportamiento de las partículas a paradojas del dominio visible. El gato de Schrödinger, encerrado en una caja donde un proceso de medición determina que se dispare o no un veneno, debe considerarse simultáneamente tanto muerto como vivo, o ni una cosa ni la otra, antes de que se efectúe la medición. El felino se halla en un limbo probabilístico porque está conectado a un aparato ejecutor conectado a su vez a partículas cuánticas que, antes de la observación, se encuentran simultáneamente en múltiples estados.

Los avances de la teoría cuántica tuvieron implicaciones científicas y filosóficas de largo alcance. La naturaleza dejó de ser el mecanismo absolutamente predecible sugerido por las leyes de Newton. Su comportamiento era irreduciblemente estadístico, y podía llegar a sorprendernos. Puede que hubiera variables ocultas que los físicos cuánticos habían pasado por alto, de manera que sus ecuaciones no reflejaran la auténtica realidad. Pero parecía que la posición y el momento de una partícula no podían determinarse al mismo tiempo, porque el proceso de medición inevitablemente interfería en el objeto medido. En uno de los pasajes más célebres de la historia de la física, Einstein, alarmado, escribió a su colega Max Born: «Dios no juega a los dados». No obstante, la obra de Schrödinger, Heisenberg, Bohr y otros sugería que, al menos para los observadores humanos, la naturaleza era irreduciblemente probabilística. Según cómo se observara, la luz actuaba a veces como una partícula y otras como una onda. La naturaleza parecía reflejar, como en un espejo

mágico, la decisión del observador humano que la estaba midiendo. A primera vista, esto constituía un profundo misterio; pero, en el fondo, tenía sentido: el observador humano, por objetivo que fuera, era parte del sistema físico que estaba observando.

La oportunidad de escuchar a este científico eminente causó tal revuelo que hasta la revista *Time* cubrió las conferencias, y en su número del 5 de abril de 1943 publicó: «Su manera de hablar suave y jovial, su caprichosa sonrisa, son cautivadoras. Y los dublínese se enorgullecen de tener a un Premio Nobel viviendo entre ellos».¹

Schrödinger había estado estudiando y puliendo las ideas de su primera conferencia durante años. Quería explicar las extrañas complejidades que tenían lugar dentro de los organismos vivos. Su padre había sido un competente botánico aficionado, y un amigo íntimo de la juventud lo había orientado hacia nuevas e importantes lecturas en biología. Se presentó ante su audiencia como un físico «ingenuo», aunque era una autoridad mundial en la fisiología y la biofísica de la visión del color. En los primeros minutos, Schrödinger anunció el gran tema de sus dos primeras conferencias: la parte esencial de una célula viva —el cromosoma— era un material peculiar, una suerte de *crystal aperiódico*:

«En Física, sólo nos hemos tratado hasta ahora con *cristales periódicos*. Para la mente de un humilde físico, estos últimos son objetos muy complicados e interesantes; constituyen una de las más complejas y fascinantes estructuras materiales que confunden su comprensión de la naturaleza. Ahora bien, comparados con el cristal aperiódico, resultan bastante sencillos y aburridos. La diferencia entre ambas estructuras viene a ser como la que encontramos entre un papel pintado de la pared, en el que el mismo dibujo se repite una y otra vez en periodos regulares, y una obra maestra del bordado, por ejemplo, un tapiz de Rafael, que no presenta una repetición tediosa, sino un diseño elaborado, coherente y lleno de sentido, trazado por el gran maestro».²

La focalización de Schrödinger sobre aquello que genera la progeñie a partir del progenitor, sobre la por entonces desconocida molécula cristalina contenida en el cromosoma, equivalía a una predicción de la naturaleza del gen. A James Watson y Francis Crick les llevaría diez años desentrañar el funcionamiento de este «cristal aperiódico» e identificar el ácido desoxirribonucleico (ADN) como la molécula de la herencia. Estos cristales, sugirió Schrödinger,

«desempeñan de hecho un papel dominante en los ordenados y metódicos acontecimientos que tienen lugar dentro de un organismo vivo. Controlan las particularidades macroscópicas observables que el organismo adquiere en el curso de su desarrollo. Determinan importantes características de su funcionamiento, y en todo esto se manifiestan leyes biológicas muy definidas y exactas [...]. [Contienen] alguna forma de clave o texto cifrado [...]. Pero el término “clave”, o texto cifrado, es demasiado limitado. Las estructuras cromosómicas son al mismo tiempo los instrumentos que realizan el desarrollo que ellos mismos pronostican. Representan tanto el texto legal como el poder ejecutivo o, para usar otra comparación, son a la vez los planos del arquitecto y la mano de obra del constructor».³

Schrödinger se maravillaba de que un proceso que partía de una sola copia de una cadena larga de átomos pudiera producir más de cien billones de copias, en el caso del desarrollo de un mamífero. El grueso de la primera conferencia consistía en ejemplos que sustentaban su propuesta de la existencia de alguna clase de molécula-plantilla y, al mismo tiempo, mostraban la potencia de su paradigma. Su visión de la genética era congruente con mecanismos hereditarios como la mitosis, el proceso por el que los cromosomas se replican y dividen durante la reproducción celular. Aunque la evolución por selección natural requiere que los organismos varíen, Charles Darwin nunca estuvo seguro de cuál era la fuente de la variación. Schrödinger tuvo una idea: la variación procedía de un cambio en la sustancia hereditaria, el extraño «cristal» vivo. Argumentó que las mutaciones que se producen en la estructura química constituirían una materia prima adecuada sobre la que la selección natural podría obrar según la forma descrita por Darwin, librándose de lo no apto y permitiendo la supervivencia de las variantes más aptas. No había más que identificar las «mutaciones» con las «pequeñas variaciones accidentales» de Darwin.

En las conferencias de Dublín, Schrödinger vinculó la química molecular a la biología, lo cual dio un impulso definitivo a ambas disciplinas para los siguientes cincuenta años. Hemos aprendido mucho desde entonces: ahora comprendemos la transcripción del ADN en ARN; podemos aislar y mapear las secuencias de las proteínas codificadas por el ADN; se han clonado ovejas, y se han creado conejos fosforescentes implantándoles genes de bacterias luminiscentes. Las intuiciones de Schrödinger han conducido a una tecnología de proporciones fáusticas. Los dilemas éticos son de una complejidad diabólica. ¿Se clonarán nuestros descen-

dientes y prescindirán del sexo? ¿Herederán la Tierra bestias frankensteinianas? ¿Llevarán las mezclas genéticas a la destrucción de nuestros ecosistemas, a pandemias globales, a nuevas plagas o, quizás, a homínidos superiores con escasa empatía hacia sus ancestros nacidos del útero materno? Es posible. Pero los genes han estado cruzando las fronteras entre las especies durante millones de años, ocurre cada vez que los genes de un virus se incorporan al genoma de una célula huésped. Los intercambios genéticos son parte de la materia prima de la evolución. Y todos los que arreglan un matrimonio, eligen a su pareja o plantan semillas (o compran productos vegetales cuyas ventas animan a los agricultores a continuar con cierto cultivo) están haciendo un poco de «ingeniería genética». ¿Es justo vetar la tecnología genética si puede beneficiar a los que nacen ciegos o deformes? En nuestra opinión, la «biotecnología» es mucho más antigua de lo que piensa la mayoría: existe desde el momento en que las células comenzaron a seleccionar qué comían, adónde iban y con qué otras células se asociaban.

Por otra parte, no deberíamos mostrarnos complacientes con esta nueva tecnología. Los expertos en toxicología medioambiental han descubierto que los productos químicos industriales son más persistentes porque no existen vías evolutivas para su degradación. Moléculas como el DDT o los PCB, fabricadas en el crisol químico de la humanidad, fueron algo nunca visto antes en la biosfera. El «nuevo» material genético diseñado por la bioingeniería, en oposición al de origen natural, puede revelarse aún más peligroso si no existe una estrategia que se ocupe de él. Por mucho que conozcamos el locus genético que constituye la boca o el ano de un gusano sencillo, o la construcción del ala de una mosca del vinagre, en genética queda un largo camino por recorrer. Por ejemplo, se han invertido cientos de millones de dólares en la confección de un mapa genético de la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*. Pero incluso para este animal relativamente simple apenas estamos empezando a comprender cómo un número comparativamente pequeño de átomos controla su desarrollo desde el huevo fecundado hasta el insecto plenamente funcional. Todavía queda mucho por descubrir. Como siempre, se cometerán muchos errores, algunos ni siquiera imaginables hasta que no se produzcan.

Orden a partir del desorden

La tercera y última conferencia de Schrödinger exponía una consideración termodinámica que con el tiempo condujo a lo que ahora se conoce como «termodinámica del no equilibrio». En las dos anteriores ha-

bía hablado de orden a partir del orden (si bien había insinuado que las mutaciones tenían una componente estocástica, en consonancia con la segunda ley). Sin embargo, ahora abordaba la cuestión del orden a partir del *desorden*: ¿cómo consigue la célula *escapar* a los efectos desorganizadores de la segunda ley? Después de todo, es este escape lo que convierte a las formas vivas en asombrosas replicantes, casi mágicas copias tridimensionales de sí mismas.

Tras recordar a su audiencia los medios químicos por los que un pequeño número de átomos controla la célula, se preguntó lo siguiente: «¿Cómo consigue un organismo concentrar una corriente de orden en sí mismo y escapar así a la desorganización del caos atómico prescrito por la segunda ley de la termodinámica?».

A continuación, Schrödinger intentó conciliar la vida con los teoremas de la termodinámica. ¿Cómo se asegura el orden, si los sistemas de micropartículas tienden al desorden? Schrödinger vislumbró el problema. Considérese una fotocopidora. Si hacemos una copia de una copia, el resultado es más borroso; y si copiamos esta última copia, tendremos una copia aún más borrosa y gris. Aunque es cierto que los organismos pierden rasgos de sus progenitores, su fidelidad de copia es asombrosa; y a veces progresan o mejoran, adquiriendo refinamientos complejos, incluso rasgos completamente nuevos. ¿De qué modo los organismos perpetúan (e incluso incrementan) su organización en un universo regido por la segunda ley? Esto es lo que se conoce como «la paradoja de Schrödinger».

La resolución básica de la paradoja de Schrödinger es simple: los organismos continúan existiendo y desarrollándose a base de importar energía de alta calidad. Se alimentan de lo que Schrödinger denominó «entropía negativa», es decir, la organización superior de los cuantos de luz solar. Puesto que no son sistemas aislados, ni siquiera cerrados, los organismos (como los cristales de azúcar que se forman en una solución sobresaturada) incrementan su organización a expensas del aumento de entropía de su entorno. La respuesta básica a la paradoja tiene que ver con el contexto y la jerarquía. La materia y la energía se transfieren de un nivel jerárquico a otro. Para comprender el desarrollo de sistemas complejos naturales como la vida, tenemos que fijarnos en su contexto, esto es, en el medio energético y material del que forman parte. En el caso de los ecosistemas y la biosfera, la organización creciente y la evolución en la Tierra requieren la desorganización y degradación del resto. No se obtiene algo de la nada.

Como físico, Schrödinger no podía prescindir de la termodinámica. Aunque la termodinámica estadística sugiere que la naturaleza debería

encaminarse hacia su estado más probable (el equilibrio termodinámico), vivimos en una superficie planetaria altamente organizada en la que un enorme número de átomos actúa de manera coherente, generando organismos cada vez más complejos a lo largo del tiempo evolutivo. Las energías de la vida adoptan la forma de ramos de azucenas y mariposas *Ulysses* de alas azules, de lombrices de tierra y aeroplanos. De nuevo, la cuestión es: ¿cómo?

Schrödinger buscaba nuevos conceptos para reconciliar la teoría termodinámica con los hechos de la biología. A primera vista, señaló, los sistemas vivos parecen saltarse la segunda ley de la termodinámica. En los sistemas aislados la energía y la materia se distribuyen aleatoriamente con el paso del tiempo. Los sistemas vivos son todo lo contrario. Mientras su entorno tiende al desorden, ellos incrementan su orden. Y «orden» no es el término más adecuado. Es mejor emplear la palabra «organización». Los organismos se «organizan» para hacer algo: vivir, reproducirse, mantenerse. Dicho de otro modo, los organismos se organizan para resistirse al equilibrio termodinámico. Probablemente fue la insistencia de Schrödinger en el cristal como modelo natural de complejidad lo que le llevó a usar el vocablo «orden», más aplicable a la estructura estática de los cristales una vez formados. Pero la vida es mucho más que un cristal. Un cristal no hace nada. Como ha señalado el biólogo teórico norteamericano Jeffrey Wicken, para hacer referencia a la vida es más adecuado el término «organización», con su connotación de actividad continuada y concertada, de función.

Los matemáticos e investigadores han ofrecido diferentes definiciones precisas y técnicas (aunque a veces contradictorias) de conceptos como «orden», «complejidad», «información» y «caos». Schrödinger empleó estas nociones con más libertad. El orden de un cristal contrasta con la función continuada de un organismo sensible, pero estructuralmente ambas entidades captan nuestra atención por su simetría y regularidad. Resulta evidente que la vida, digamos en la forma de una oruga, está lejos de la típica colección de partículas rebotando sin rumbo, de manera aleatoria, en un recipiente cerrado. ¿Cómo se las arreglan los organismos para mantener, miniaturizar y expandir su complejidad estructural en un universo que tiende a la aleatoriedad?

Schrödinger fue el primero en subrayar la necesidad de contemplar la vida desde una perspectiva termodinámica. Y es su análisis el que ha inspirado la manera de entender la vida que exponemos en este libro: no sólo como un proceso de copia de moléculas, sino como un proceso específico de transformación de energía.

La termodinámica clásica estudiaba el comportamiento de la materia y la energía en recipientes sellados conocidos como «cajas adiabáticas». Y, como cabía esperar, se descubrió que estos sistemas, resistentes a la pérdida de calor, se desordenaban cada vez más hasta que se alcanzaba un estado de equilibrio o de «máxima entropía».

¿Acaso los organismos y ecosistemas contradicen leyes termodinámicas bien establecidas?

Schrödinger contrastaba la fina elaboración de los tapices de Rafael (su metáfora de la vida) con el anodino estado final de equilibrio:

«Cuando un sistema no viviente se aísla o coloca en un ambiente uniforme, todo movimiento llega muy pronto a una paralización, como resultado de diversos tipos de fricción; las diferencias de potenciales eléctrico o químico quedan igualadas; las sustancias que tienden a formar un compuesto químico lo hacen, y la temperatura pasa a ser uniforme por la transmisión del calor. Después, todo el sistema queda convertido en un montón muerto o inerte de materia. Se ha alcanzado un estado permanente, en el cual no ocurre suceso observable alguno. El físico llama a este estado de equilibrio termodinámico, o de “máxima entropía”». ⁴

Luego instó a su audiencia a convenir con él en que el equilibrio termodinámico (el estado de ausencia de cambio característico de las cosas no vivas colocadas en el interior de recipientes aislados) es lo último a lo que la vida se parece. Sabía que los seres orgánicos residen en un mundo de flujos energéticos y materiales, que los organismos no son sistemas cerrados, sino abiertos. El equilibrio termodinámico, aunque aplazado *sine die* por la vida, es un «atractor» capital para todos los sistemas naturales. De algún modo, los seres vivos tienden a eludirlo.

Schrödinger argumentó que los seres vivos mantienen su organización interna a expensas de un mayor incremento de la desorganización en el exterior de sus cuerpos. Las células liberan gases. Producimos orina, sudor, calor, dióxido de carbono y heces. La biosfera desprende principalmente calor. Los organismos pueden ser cautivadoramente complejos, pero siempre dejan una estela de residuos. Cuanto mayores o más numerosos son, más «contaminantes» vierten en su medio ambiente. Cuanto más suntuoso es el palacio, más inmundos es su montón de basura.

«¿De qué forma evita la degradación el organismo vivo?», se preguntaba Schrödinger.

«La contestación obvia es: comiendo, bebiendo, respirando, fotosintetizando, etcétera. El término técnico que engloba todo eso es “metabolismo”. La palabra griega de la que deriva [...] significa “cambio” o “intercambio”. ¿Intercambio de qué? [...] ¿Qué es, entonces, ese precioso algo contenido en nuestros alimentos y que nos defiende de la muerte? Esto es fácil de contestar. Todo proceso, suceso o acontecimiento —llámese como se quiera—, en una palabra, todo lo que pasa en la Naturaleza, significa un aumento de la entropía de aquella parte del mundo donde ocurre. Por lo tanto, un organismo vivo aumentará continuamente su entropía o, como también puede decirse, produce entropía positiva —y al hacerlo tiende a aproximarse al peligroso estado de entropía máxima que es la muerte—. Sólo puede mantenerse lejos de ella, es decir, vivo, extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente, lo cual es algo muy positivo, como enseguida veremos. De lo que un organismo vivo se alimenta es de entropía negativa. O, para expresarlo menos paradójicamente, el punto esencial del metabolismo es aquel en el que el organismo consigue liberarse de toda la entropía que no puede dejar de producir mientras está vivo.»⁵

Con elegancia, Schrödinger abrió todo un nuevo dominio para la comprensión material de la vida. Dicho dominio tenía relación con su descripción de la vida como «orden a partir del orden» mediante un sistema químico de copia. Puede que no acertara en todos los detalles, pero señaló el camino correcto. Por ejemplo, más adelante, a instancias de un colega, advirtió que, técnicamente, la organización de los organismos no emana de la entropía negativa (o «neguentropía», un término similar introducido por Brillouin), sino de la energía libre. La energía libre es la cantidad de energía disponible para realizar trabajo. (El término «exergía», usado especialmente por los ingenieros europeos, es otra denominación para la energía disponible.) Esta magnitud, como veremos, es directamente proporcional a los gradientes que las máquinas pueden explotar, o que los organismos pueden emplear para mantenerse y reproducirse como categorías específicas de organizaciones materiales.

De este modo, Schrödinger subrayó que la vida debía examinarse rigurosamente desde una perspectiva materialista. Estaba convencido de que, a pesar de su complejidad, lo más probable es que la vida acabara revelando sus secretos como fenómeno *físico*. Darwin había mostrado que la biología es evolutiva. Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución, añadió el genetista de la Universidad de Columbia

Theodosius Dobzhansky.* Pero la biología no es sólo una ciencia histórica; también es un puente entre la historia y la fisicoquímica.

La física tradicional no intentó comprender las cosas en términos de sus causas primigenias. El modo en que funcionaban las cosas raramente requería un conocimiento de su historia. La función mecánica se comprendía directamente sobre la base de la formación presente. La matemática y la geometría son intemporales: uno más uno *siempre* es igual a dos; los teoremas geométricos valen para todo el tiempo concebible. Las explicaciones físicas tradicionales fueron tan exitosas que sigue habiendo una tensión (unas veces fructífera, otras no) entre abordar la biología en términos de causas actuales (físicas) o causas pasadas (evolutivas), incluso después de los extraordinarios progresos que supuso el darwinismo. El teórico escocés D'Arcy Thompson, traductor de Aristóteles y precursor de los teóricos del caos de Santa Fe, dio prioridad a las matemáticas sobre la selección natural para explicar la complejidad de la vida. Pero Thompson hace una buena defensa de la física:

«Es imposible predecir hasta qué punto el matemático podrá describir y el físico explicar la constitución del cuerpo. Puede ser que todas las leyes de la energía, todas las propiedades de la materia y toda la química de los coloides resulten tan incapaces de explicar el cuerpo como lo son de comprender el alma. Por mi parte, pienso que no es así. [No le pregunto] a la física por qué en la cara de un hombre resplandece la bondad, mientras que en la de otro trasparece la maldad. Pero en lo referente a la construcción, crecimiento y funcionamiento del cuerpo, así como a todo lo que existe en el mundo material, la ciencia física es, en mi humilde opinión, nuestro único maestro y guía».⁶

Iconoclasta, pitagórico y posiblemente creacionista, Thompson estaba más interesado que los modernos estudiosos de la complejidad en reem-

* En 1966, el jeque Abd el Aziz bin Baz, con el propósito de presionar al rey de Arabia Saudí, le recordó que «el sagrado Corán, las enseñanzas del Profeta, la mayoría de científicos islámicos y los hechos verdaderos demuestran que el Sol gira en su órbita [...] y que la Tierra es fija y estable, desplegada por Dios para su humanidad [...]. Cualquiera que profesara otra creencia estaría profiriendo una acusación de falsedad hacia Dios, el Corán y el Profeta». Como puntualiza Dobzhansky, a pesar de la era espacial, técnicamente el buen jeque está en lo cierto al considerar la teoría copernicana como una «mera teoría» y no como un «hecho». Pero, como la evolución, es una muy buena teoría: «¿Nos sometemos a la autoridad científica sin más? Desde luego que no: sabemos que quienes se tomaron la molestia de estudiar la evidencia la encontraron convincente [...]. La Tierra no es el centro geométrico del universo, aunque pueda ser su centro espiritual» (Dobzhansky, 1973, pág. 125). (N. de los AA.)

plazar, antes que en complementar, las explicaciones históricas de la selección natural. A nosotros también nos interesan las explicaciones físicas complementarias, pero las termodinámicas, no las algorítmicas. Nos situamos más bien en el bando de Schrödinger, quien, pese a mostrarse fascinado por la perspectiva de desvelar el fundamento físico de la vida, defendía la evolución por selección natural y era reacio a concebir nuevas leyes físicas para acomodar los diversos comportamientos de la materia viva.

Aunque Schrödinger recibió el Premio Nobel por sus trabajos en mecánica cuántica, sus pensamientos acerca de la biología no podían ser ignorados. En el pequeño libro verde, publicado en 1944, resultante de sus conferencias irlandesas del año anterior, esbozó dos programas de investigación capitales para la biología. El primero se centraba en la idea del orden a partir del orden, la indagación sobre cómo se implantaba la herencia en el material genético transferido de un organismo a otro. Esta indagación contribuyó al espectacular salto que supuso el descubrimiento de la estructura y función del ADN, al desarrollo de la biología molecular y a la aplicación de este conocimiento a campos tan diversos como la farmacología y la medicina forense. El otro programa de investigación propuesto por Schrödinger, quizá más importante a largo plazo, es mucho menos conocido. Se trata de su investigación del *orden a partir del desorden*. Aquí aborda la cuestión de la aparente inobservancia de la segunda ley por parte de la vida. Su respuesta básica, la solución esbozada a la paradoja que lleva su nombre, es que los organismos no desobedecen la segunda ley porque ésta, tal como se formuló al principio, se aplica más a sistemas aislados que a sistemas abiertos. La paradoja de Schrödinger desaparece cuando consideramos el contexto de los sistemas complejos, incluidos los organismos. Éstos no son experimentos aislados, sino que se alimentan de la organización externa rica en energía y de los gradientes que existen en su entorno.

Información

Implícitamente, la organización en torno a sistemas reductores de gradientes y los procesos por los que extraen energía comportan información. Al contemplar la vida como un proceso material, Schrödinger la analizó en términos tanto de energía como de información. Aunque habló de «entropía negativa» en lugar de «energía disponible», y de «orden» en lugar de «organización» (un término más adecuado para los sistemas termodinámicos, por su énfasis en la función), no deberíamos culparle por

no haber acertado a la primera, cuando otros ni siquiera vieron la diana. Vislumbró las cuestiones claramente y las comentó en lenguaje llano, sin matematizaciones prematuras. Acertó en el espíritu, en la idea general. Sin embargo, a pesar de su brillante anticipación de los descubrimientos que más adelante llevarían a la comprensión de la vida como sistema hereditario informacional basado en el ADN, su análisis de la vida como sistema energético ha sido en gran medida ignorado. Parte de la reticencia a contemplar la vida como un sistema energético además de informacional se debe a una confusión terminológica. Porque «entropía» es un término central no sólo en la termodinámica, sino también en la teoría de la información (o de la comunicación), que se aplica al envío de mensajes entre teléfonos y ordenadores, y que es posterior a la termodinámica. Esto produce la impresión de que existen profundas raíces físicas que ligan la termodinámica a la teoría de la información. Por supuesto que hay una estrecha relación física entre el manejo de la información y la extracción de energía en organismos que para sobrevivir deben desenvolverse en entornos variables. Sin embargo, a pesar de que los seres vivos manejan datos y energía, no existe una correspondencia simple entre ambas teorías.

Claude Shannon y Warren Weaver,⁷ los promotores de la teoría de la información, introdujeron otro concepto de entropía. Cuando se encontraron con que no sabían cómo llamar a su nueva medida matemática de la cantidad de información de un mensaje, un amigo, el matemático John von Neumann, le dijo a Shannon: «Llámala entropía; nadie sabe lo que es la entropía en realidad, así que en cualquier debate siempre tendrás ventaja».⁸ Shannon siguió el malicioso consejo de Von Neumann, lo cual no hizo más que aumentar la confusión en torno a ese término. En teoría de la información, la entropía describe la incertidumbre asociada a los caracteres de los mensajes enviados o recibidos. Se trata de un uso diferente del que posee la entropía termodinámica. En efecto, en un sistema termodinámico, la asignación de un valor de entropía se basa en la unicidad de la distribución energético-material del sistema a un nivel molecular o atómico. En cualquier momento el sistema puede estar en un único microestado particular de entre muchos posibles. Entre ambas magnitudes existen similitudes, pero éstas se deben más a la forma matemática de las ecuaciones que a aquello que refieren. De hecho, con anterioridad una ecuación muy parecida había sido aplicada a los juegos por el matemático francés Abraham De Moivre, un hugonote pionero de la teoría de la probabilidad que ejercía de consultor de compañías de seguros y apostadores. Ya en 1968, el oncólogo y fotobiólogo estadounidense Harold F. Blum señaló que, a pesar de las similitudes superficiales que existen en-

tre las entropías informacional y termodinámica, aparentemente diferenciadas tan sólo por un signo menos, podían desarrollarse ecuaciones híbridas aplicables a la selección natural. Blum ideó una ecuación neguentrópica que medía lo que describió como «la expectativa de cambio evolutivo que no concierne a su probabilidad en el sistema más amplio donde tiene lugar».⁹ Hoy las entropías proliferan en la teoría de sistemas dinámicos: hay una entropía métrica, una entropía topológica, una entropía algorítmica, una entropía como dimensión fractal de un conjunto compacto apropiado e, incluso, una entropía de Galois, relacionada con la asimetría geométrica. Todas estas subespecies matemáticas de la entropía informacional están relacionadas con la impredecibilidad, la incompresibilidad, la asimetría o la recurrencia demorada.

En este libro nos interesan los modos energéticos de sistemas reales, no las propiedades abstractas de figuras matemáticas. En termodinámica, la entropía mide un proceso irreversible, el decrecimiento natural en la calidad de la energía a medida que la materia adopta distribuciones cada vez más probables (distribuciones que ya no son susceptibles de convertirse en trabajo o estructura). Hace referencia a la energía en un nivel atómico y molecular. Así, un escritorio ordenado, con libros y documentos bien apilados, no necesariamente tiene menos entropía termodinámica que un escritorio desordenado. Esto es así porque la entropía termodinámica no tiene que ver con objetos macroscópicos, sino con partículas microscópicas medidas por la temperatura. Por supuesto, arreglar un escritorio desordenado haría aumentar la temperatura ambiental a medida que se llevara a cabo el trabajo, en cuyo caso el incremento de temperatura sí se relacionaría con la ordenación de los objetos macroscópicos del escritorio. Pero se consumiría la misma cantidad de energía concentrada si simplemente se cambiasen los objetos de sitio, o si se desordenase un escritorio ordenado.

La entropía termodinámica es una medida de la distribución de la energía, así que registra dicha incertidumbre, no la asociada a un mensaje enviado o recibido. Uno de los problemas de las similitudes entre las ecuaciones de entropía es que no hay un vínculo claro entre energía e información. Varios autores han intentado demostrar que producir, o al menos borrar, un bit de información requiere energía. Sin embargo, producir un solo bit de información puede requerir en unos casos una cantidad relativamente grande de energía (por ejemplo, gritar con todas nuestras fuerzas para que una persona sorda nos oiga), pero en otros puede bastar con un ínfimo proceso cuántico. Algunos advierten que la confusión entre ambos campos parece sugerir que la entropía termodinámica siempre implica una suerte de entidad consciente que posee información. Por

ejemplo, P.W. Atkins, en su libro *La segunda ley*, deplora lo que considera como un resbaladizo sesgo místico creado por los intentos de conectar ambas disciplinas:

«Soy consciente de una omisión capital en el material que presento: he omitido deliberadamente toda referencia a la relación entre teoría de la información y entropía. Por un lado, estoy de acuerdo en que los principios y las matemáticas de la teoría de la información pueden contribuir sustancialmente a la formulación de la termodinámica y la expresión de su contenido. Por otro lado, existe el peligro, me parece a mí, de dar la impresión de que la entropía requiere la existencia de alguna entidad cognoscente capaz de poseer “información” o de ser hasta cierto punto “ignorante”. De ahí a la presunción de que la entropía está en la mente y, por ende, es un aspecto del observador sólo hay un pequeño paso. No tengo tiempo para entretenerme en este embrollo, así que intentaré apartarme del tema».¹⁰

La protesta de Atkins es comprensible pero excesiva. Hay versiones sofisticadas de la teoría de la información que pueden relacionarse con la termodinámica, como es el caso del llamado «principio de máxima entropía», concebido por E.T. Jaynes.¹¹ La teoría de la información no se reduce a mensajes enviados de un ente consciente a otro. La formulación de Jaynes, por ejemplo, se centra en la información adquirida a partir de la ejecución de un experimento, y se aplica a experimentos termodinámicos, entre otros. Pero la entropía máxima de la que habla Jaynes es informacional, no termodinámica, de manera que, una vez más, a pesar de sus similitudes y superposiciones, no existe una equivalencia general entre termodinámica y teoría de la información.

El físico Hubert Yockey desprecia la termodinámica con el argumento de que la evolución de la vida es demasiado improbable.¹² Yockey, que trabajó en la creación de la bomba atómica a las órdenes de Robert Oppenheimer, se declara agnóstico. A pesar de mostrarse crítico con los creacionistas, aduce que la sopa primordial que se enseña en los libros de texto no es plausible. Sin embargo, la aplicación de la teoría de la información sin más no tiene en cuenta ni las reglas de combinación química ni la tendencia de ciertas redes a autoorganizarse cuando un flujo de energía pone en marcha ciclos moleculares. Neocreacionistas como William Dembski han tomado prestado el argumento matemático de Yockey, aunque no su agnosticismo, y lo han reconvertido en un argumento a favor de la existencia de Dios (un Dios biólogo molecular, por lo visto, que dota a la vida de la complejidad informacional requerida para iniciar la evolución).

Argumentos similares, basados en la improbabilidad estadística (en un sistema aislado) de una vida de baja entropía, continúan esgrimiéndose como prueba de la existencia de Dios.¹³ El químico Michael Behe, un neocreacionista evolucionista como Dembski, habla de una complejidad irreducible en cosas como el sistema inmunitario y los flagelos, una especie de «motor fuera borda» del que se valen las espiroquetas para impulsarse (para más información, véase, más adelante, el capítulo 20). Pero entonces, podemos preguntar, ¿por qué exigir evidencias científicas cuando tenemos suficiente con la fe? Si se exige un argumento racional, parece más lógico invocar a Dios en el principio del universo, creando gradientes y luego desplegándolos conforme a las leyes de la termodinámica y la evolución. (Como señaló Spinoza, un Dios coigual con el cosmos y plasmado en las leyes de la naturaleza no tiene necesidad de hacer milagros.)

Pero está claro que tanto la información como la energía son fundamentales para los seres vivos. Harold Morowitz, biólogo de la Universidad George Mason y uno de los primeros en interesarse por la termodinámica de los sistemas vivos, ha señalado que la materia, incluso antes de la vida, es «informática»: cuando las partículas se comportan de manera «no dinámica» (conforme a reglas que sólo se aplican cuando están juntas), cada una actúa como si tuviera conocimiento de la presencia de las otras. A propósito del papel de los compuestos asociados al ATP (trifosfato de adenosina), el compuesto almacenador de energía común a todas las células, Morowitz sugiere que aún puede encontrarse una conexión capital entre la física y la bioquímica, y que puede tratarse de una ley que gobierne el surgimiento de seres susceptibles de convertirse en humanos pensantes:

«Acompañan al ATP una serie de sustancias que juegan un papel principal en la transferencia de energía. Cada una contiene la molécula adenina en su estructura. En el lenguaje de la vida, esta configuración atómica aparece como el símbolo de las moléculas almacenadoras de energía, si bien la adenina en sí misma no interviene en el proceso energético. La idea entera parece rica en información, de algún modo demasiado lingüística o poética para el quehacer de moler-y-extraer de la bioquímica; pero ahí está. Además de ser una marca de la transferencia de energía, la adenina constituye un componente simbólico principal del código genético: es una de las cuatro bases del ADN y el ARN. ¿Puede haber alguna relación profunda y fundamental, aún oculta, entre codificación y transferencia de energía? Ésta es una cuestión digna de abordarse, porque la comprensión del papel de la adenina parece residir cerca de los secretos bioquímicos de la vida».¹⁴

La confusión matemática entre las entropías informacional y termodinámica no debería sumirnos en un marasmo técnico, ni distraernos de los temas en consideración. *Existe* un vínculo entre energía disponible y datos usables, entre termodinámica y unos seres vivos que perciben, de un modo cada vez más eficaz, los gradientes de los que depende su sustento.

Por un lado, tenemos palabras como «orden», «organización», «información» y «complejidad». Por otro lado, tenemos términos como «caos», «desorden» y «entropía». En una reseña crítica del libro *El quark y el jaguar*, de Murray Gell-Mann, teórico de la complejidad y Premio Nobel de física, se define la complejidad como aquello que «tienen en común los mercados financieros, los sistemas inmunitarios de los mamíferos y las comunidades ecológicas. La capacidad de interaccionar con el entorno, de reconocer pautas en el mundo y de aplicar el conocimiento adquirido a la modificación del comportamiento futuro es fácil de detectar, pero la definición de complejidad sigue mostrándose esquiva».¹⁵ El uso de estos términos puede resultar confuso, incluso contradictorio. La información (en la teoría de la información, por ejemplo) no equivale al orden, sino al desorden, en el sentido de que hacen falta más decisiones binarias (más ceros y unos, más bits de información) para describir situaciones u objetos en desorden que en orden. Considérese una baraja: si deseamos describirla, se necesitarán más bits en el caso de una baraja desordenada, sin ninguna pauta obvia, que en el de una nueva y sellada, con los palos y sus valores dispuestos «en orden». Igualmente, la descripción de los movimientos moleculares de un gas requiere más bits que la correspondiente a las posiciones moleculares de los cristales. A pesar del uso que hace Schrödinger de la palabra «orden» —en retrospectiva, podemos ver que empleó este término pensando en los cristales—, lo más adecuado sería reservarla para las entidades estáticas, y no emplearla en el caso de organizaciones dinámicas que intercambian activamente materia y energía con su entorno para mantener su estructura. Podríamos decir que los procesos vitales, abiertos al entorno, generan complejidad, concentran información e intercambian datos a medida que se amplía el dominio de sus operaciones energéticas, añadiendo caos al entorno del que dependen. Pero ¿qué significan tales palabras? En el próximo capítulo veremos que la concepción actual del caos *no* es lo que Schrödinger tenía en mente cuando escribió su breve pero brillante elucidación de los procesos vitales.

El espectacular auge del aspecto genético e informacional del programa de Schrödinger se ha verificado a expensas del otro, el energético

y termodinámico. No queremos restar un ápice al tremendo éxito de la investigación en genética, el aspecto lingüístico de la vida. Pero queremos animar a que también se preste atención al otro aspecto del programa de Schrödinger. En lo audaz de su visión, lo importante no es que el científico austriaco cometiera errores, sino que incidiera sobre la capacidad *dual* de procesar información y energía que poseen los seres vivos: por un lado, la organización que proviene de sus progenitores y, por el otro, la organización que mantienen a pesar de (y, como iremos viendo, a causa de) la exigencia de la segunda ley de que los sistemas evolucionen hacia el equilibrio termodinámico.

Cuando seguimos a Schrödinger, encontramos maneras de mirar a través de la vida los procesos energéticos que gobiernan tanto los sistemas animados como los inanimados. La complejidad de la vida no se debe únicamente a su procesamiento de datos químicos, sino también a su función como transformadora de energía. De hecho, las tareas de replicación del ADN y de síntesis de las proteínas quizás entraron en escena a lomos de un caballo termodinámico. El papel de esas tareas adquiere sentido en el contexto de una función previa de reducción de gradientes. La vida no es una mera entidad genética. Los genes por sí solos no hacen más que los cristales de sal. La vida es un sistema abierto y cíclico, organizado por las leyes de la termodinámica. Y no es el único.

2 Simplicidad

La ciencia procede por principios simples pero impersonales.

Steven Weinberg

Hay que hacer las cosas tan simples como sea posible, pero no más.

Albert Einstein

La simplicidad es lo último en sofisticación.

Leonardo Da Vinci

Ordenadores naturales

El Premio Nobel Steven Weinberg ha afirmado que la ciencia procede mediante el hallazgo de «principios simples pero impersonales».* Estamos de acuerdo, y proponemos que la idea de que «la naturaleza aborrece los gradientes» es uno de tales principios. Aunque la vida es compleja, comprenderla no debería serlo tanto. Al mismo tiempo, no debería ser tan simple: los conjuntos de algoritmos replicantes en forma de programas de ordenador, en ocasiones denominados «vida artificial», son precisamente eso: artificiales. La ciencia tiende a la supersimplificación. Los experimentadores prefieren trabajar con sistemas que muestran resultados repetibles, lo que les lleva a descartar sistemas demasiado complejos o con demasiadas variables. Sin embargo, los organismos pasan por muchos más estados, y de un modo mucho más sutil, que las simulaciones informáticas.

La termodinámica clásica, orientada a la construcción de máquinas más eficientes, estudia sistemas sujetos a las siguientes restricciones no naturales:

* El comentario de Weinberg está incluido en la ponencia que pronunció dentro del decimonoveno seminario literario anual de Key West, «Science and Literature: Narratives of Discovery», enero 11-14, 2001. (*N. de los AA.*)

1.^a Las reacciones deben producirse en un recipiente rígido y aislado que no deje escapar el calor.

2.^a El punto final de los procesos estudiados debe ser un estado de equilibrio, esto es, un estado sin ningún cambio ulterior significativo.

3.^a En los procesos a temperatura constante, ésta debe mantenerse invariable durante la transferencia de calor. Esto significa que, si se suministra calor al sistema, en torno a éste debe haber un sumidero de calor (en ocasiones teórico) lo bastante grande como para que su temperatura no cambie.

4.^a El calor debe aportarse de manera cuasiestática, esto es, con la lentitud y delicadeza necesarias para causar la mínima turbulencia posible.

Como puede verse, la termodinámica clásica estudia el mundo en unas condiciones muy particulares. En efecto, se centra en sistemas aislados sin contacto con lo que ocurre fuera de sus paredes selladas. Esta idealización permite la solución de muchos problemas que de otro modo resultarían espinosos. Los sistemas abiertos, por su parte, son más interesantes pero tienen más variables (lo que los hace más difíciles de comprender). Así pues, un paso crucial en la transición de la termodinámica de sistemas aislados a la termodinámica de sistemas abiertos fue el estudio de sistemas cerrados. Estos sistemas, que permiten el intercambio de energía, pero no de materia, a través de sus límites, poseen un número intermedio de variables. Esta característica hace que resulten más realistas que los sistemas aislados y menos difíciles de estudiar que los sistemas abiertos, los cuales presentan una mayor complejidad. Un ejemplo de sistema cerrado podría ser el siguiente: una reacción química en un frasco cerrado donde se permite que el exceso de calor generado por la reacción se disipe en el entorno, mientras que los productos químicos permanecen dentro del frasco. En cambio, los organismos y todos los ecosistemas funcionales conocidos (con la discutible excepción de la propia biosfera) intercambian a través de sus límites tanto energía como materia. Son sistemas abiertos. Las estrellas, que queman combustible nuclear y producen luz de alta calidad, también son sistemas abiertos. Asimismo, las ciudades son el escenario de un trasiego constante de materiales (alimentos, madera, alambre de cobre, etcétera) y energía (electricidad, metano, petróleo, etcétera) a través de sus límites. Desde las estrellas hasta los amantes, pasando por los programas de ordenador más recientes, los sistemas más fascinantes del universo (y los más destructivos, como los tiburones, los ejércitos y las supernovas en explosión) son sistemas abiertos.

La energía, el trabajo y el calor son conceptos clave en termodinámica. La *energía* es la capacidad de realizar trabajo. Éste puede consistir en subir tres metros de escaleras con una cesta de ropa de 1 kg, impulsar un tren a través de los Alpes o lanzar un cohete a Marte. Si bien las modalidades de trabajo son ilimitadas, sólo existen unas pocas clases de energía: cinética, potencial gravitatoria, magnética, eléctrica, química y la energía de los enlaces nucleares. Una clase de energía puede transformarse en otra, como en el nacimiento de estrellas a partir de la agregación de nubes de escombros cósmicos. La materia misma, como establece la ecuación de Einstein $E = mc^2$ (energía igual a masa por el cuadrado de la velocidad de la luz), constituye un vasto reservorio potencial de energía, aunque la vida no ha adquirido la capacidad de usarla (salvo en las bombas y centrales nucleares). La primera ley de la termodinámica sugiere que la energía cambia sutilmente de forma, pero nunca desaparece del todo.

El calor y el trabajo son procesos o modos de transferencia de energía. Una partícula puede poseer energía en virtud de su posición (energía potencial) o de su movimiento (energía cinética). El *trabajo* es la transferencia de energía en una acción coherente. El *calor* o, mejor, *flujo calorífico* es la transferencia de energía a través de gradientes de temperatura. Así, a diferencia de un saco con 1 kg de harina o un montón de carbón que puede quemarse, comprarse o venderse, el flujo calorífico y el trabajo son procesos, no cosas.

Cuando se realiza trabajo sobre un sistema, la transferencia de energía se efectúa a través de un movimiento coherente. Considérese una pelota de golf debidamente golpeada, que vuela ochenta metros hacia el agujero. Todos los átomos y moléculas de la pelota viajan juntos: su movimiento es coherente. La cabeza del palo transfiere energía cinética a la bola, y ésta sale disparada.

Cuando calentamos un sistema ocurre justo lo contrario. A medida que se transfiere energía de un cuerpo a otro por calentamiento, se hace más caótico el movimiento térmico de las moléculas del segundo cuerpo. La energía continúa almacenada en forma potencial y cinética, pero ahora la posición y el movimiento de las partículas son más difíciles de determinar; no guardan una coherencia.

Cada una de las diversas formas básicas de energía puede ser convertida en cualquiera de las otras formas mediante procesos simples. Consideremos las tres formas de energía puestas en juego durante la oscilación de un péndulo (figura 2.1). En el punto más alto de la oscilación,

el péndulo tiene la máxima energía potencial. Cuando se suelta, esta energía potencial gravitatoria comienza a convertirse en energía cinética, y el péndulo desciende. En el punto más bajo de la oscilación, la masa del péndulo alcanza su máxima energía cinética (momento en que su velocidad es máxima) y su mínima energía potencial. En un péndulo oscilante, la energía cinética se transforma una y otra vez en energía potencial, hasta que el péndulo acaba por detenerse en un estado final de mínima energía cinética y mínima energía potencial. La causa de que el péndulo deje de oscilar y se instale en el equilibrio termodinámico es la segunda ley: la fricción desgasta el sistema y su energía se pierde en el entorno, disipada en forma de calor. Las componentes friccionales, como la resistencia del aire o los engranajes de un reloj de péndulo, generan minúsculos flujos de calor hacia el medio circundante. En realidad, la energía no se pierde, sino que se convierte en calor. Aunque, en parte, éste puede recuperarse para propósitos útiles, el rasgo termodinámico más importante del calor es que se trata de energía en su forma menos utilizable. Aun así, no deja de ser energía. El hecho de que la energía se conserve pese a cambiar de forma se conoce como «primera ley de la termodinámica» o «ley de conservación de la energía».

Ahora podemos distinguir cuatro tipos de sistemas, cuyos comportamientos se correlacionan con su «distancia» respecto del equilibrio:

1. El estado de equilibrio. Aquí no pueden esperarse cambios ulteriores en el sistema. Este estado se asocia con grandes números de moléculas distribuidas más o menos aleatoriamente dentro de un recipiente aislado. Puede haber pequeñas fluctuaciones, pero, con unos niveles de energía tan bajos, el sistema no cambia de estado. Los estados de equilibrio van desde una taza fría de café con leche hasta el sombrío estado final del universo postulado por la termodinámica clásica, pasando por el cosmos después de la gran explosión pero antes de que la gravitación iniciara la combustión nuclear de las estrellas. Un ejemplo químico de estado de equilibrio es la reacción del hidrógeno y el oxígeno en un recipiente cerrado: ambos elementos reaccionan produciendo agua, y después ya no ocurre mucho más.

2. Sistemas casi en equilibrio. Éstos retornarán al estado de equilibrio si se les permite hacerlo. Por ejemplo, considérese un sistema con moléculas que se encuentran en dos frascos conectados a través de un tubo cerrado. Un frasco contiene más moléculas que el otro. Si se abre la llave de paso, el sistema llegará a un estado de equilibrio con un número aproximadamente igual de moléculas en cada frasco.

3. Sistemas cercanos al equilibrio. Se trata de sistemas que se mantienen fuera del estado de equilibrio por la aplicación de un gradiente

continuo. El sistema, «alimentado» desde el exterior, no se instala en el equilibrio, sino que responde de una manera lineal y predecible a los cambios que se producen en sus condiciones físicas.

4. Sistemas «alejados del equilibrio». Aquí es más difícil predecir el comportamiento del sistema. Un cambio en una variable puede inducir un cambio casi lineal en otra variable, o puede suscitar cambios impredecibles que no es posible modelar con ecuaciones matemáticas razonablemente simples. Muchos sistemas clasificados como «alejados del equilibrio» (los organismos, por ejemplo) tienen atributos de sistemas cerca del equilibrio.

Caos y confusión

Debemos abordar una última confusión terminológica. Está relacionada con la palabra «caos», que en los últimos tiempos se emplea tanto en los cócteles y en las películas populares como en las revistas científicas. Hasta el pasado siglo xx, en el ámbito de la ciencia el *caos* poseía una definición termodinámica. Aludía a eventos incoherentes, aleatorios, no correlacionados, sin orden, fundamentalmente impredecibles, tal como fue documentado por Einstein en sus estudios del movimiento browniano.¹

El caos tiene una historia interesante. Como apunta el astrofísico Eric Chaisson, «originalmente, en el sentido griego de la palabra, “caos” hacía referencia a la entidad amorfa y equilibrada de la que luego surgió el universo ordenado».² Es posible que el término, $\chi\alpha\omicron\varsigma$ en griego, fuera acuñado por el filósofo presocrático Anaxágoras, la primera persona en afirmar que el Sol no era un dios, sino una piedra candente como las otras estrellas. (También procede de «caos» el vocablo científico «gas», reciente en términos etimológicos.) Anaxágoras tenía una teoría fascinante: aunque el universo, que era eterno, ya tenía una edad infinita y se había convertido en una «mezcla perfecta», podía «desmezclarse». Pero esto no era fácil. Requería del $\nu\omicron\upsilon\varsigma$ o *nous*: la mente. Anaxágoras pensaba que la mente podía deshacer la mezcla, aunque tardara un tiempo infinito en hacerlo.

La teoría de Anaxágoras ha vuelto a ser tomada en consideración.³ Algunos matemáticos, mediante modelos de ordenador de sistemas dinámicos reversibles, han intentado comprobar si un sistema infinitamente mezclado puede desmezclarse, al menos en principio. Trabajos recientes sugieren que sí, en cuyo caso los matemáticos del caos podrían ser capaces de recuperar el estado algorítmico original del universo (en esencia, recrear la mente generativa de Dios). Aunque la idea es fascinante, no re-

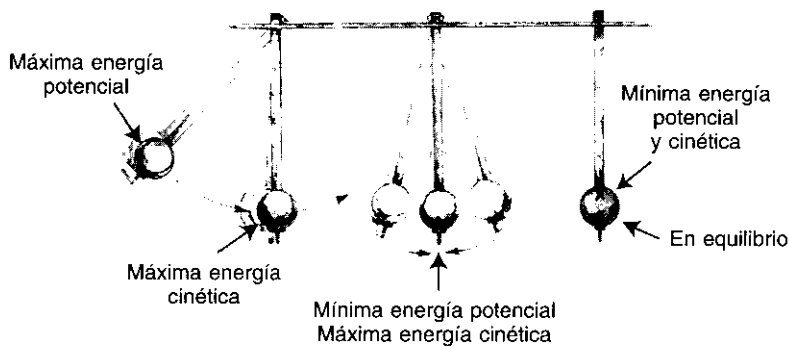


Figura 2.1. El péndulo libre es un ejemplo de transformación de una forma de energía en otra, en este caso de potencial en cinética, y viceversa. En el punto más alto de su oscilación (izquierda), el péndulo alcanza su máxima energía potencial, el potencial de realizar trabajo. Puesto que por un instante está en reposo, no posee energía cinética. Al pasar por la vertical, el péndulo alcanza su máxima energía cinética y su mínima energía potencial. El péndulo en reposo, en posición vertical (derecha), está en equilibrio, sin energía potencial ni cinética.

comendaríamos a nadie que contuviese la respiración hasta la reaparición del Paraíso.

El caos que ha acaparado la atención en las dos últimas décadas no es el caos tradicional de confusión total, sino el relacionado con el tipo especial de sistemas deterministas que no pueden predecirse aunque se conozcan con exactitud las condiciones iniciales y las operaciones matemáticas responsables de su complejidad. Este nuevo caos determinista tiene poco que ver con el caos clásico de los átomos. Constituye una subdisciplina de la dinámica de sistemas y la teoría de la complejidad. El caos determinista, basado en modelos teóricos y de ordenador, es una especie de «matemática experimental» (la expresión es de Benoit Mandelbrot, inventor del término «fractal»), que ha atraído la atención de algunos de los científicos más destacados. El meteorólogo del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts) Edward Lorenz, sin proponérselo, descubrió el caos determinista al emplear un ordenador para modelar las trayectorias atmosféricas. Lo que encontró es que los puntos finales de las trayectorias eran impredecibles porque eran altamente dependientes de las condiciones iniciales y de contorno, que no podían determinarse con la precisión requerida. Aunque el programa de ordenador era un algoritmo determinista, su resultado final era imposible de anticipar, a causa de la incapacidad de especificar las condiciones de contorno con la suficiente precisión como para obtener respuestas siquiera aproximadas. Ecuaciones deterministas que dan soluciones indeterminadas: tal es la na-

turalidad del caos determinista. Este resultado inesperado dio lugar al actual entusiasmo por el caos.⁴ El caos determinista no es sólo un fantasma informático. Puede apreciarse un comportamiento caótico en las predicciones meteorológicas, un factor que limita a unos diez días aproximadamente las predicciones a largo plazo. Asimismo, se da en procesos comunes como un grifo que gotea, los movimientos planetarios o el ritmo cardíaco.

En su excelente, aunque algo técnico, *Chaos Theory Tamed*, Garnett Williams subraya dos importantes conclusiones de la investigación del caos determinista: 1.^a Es inútil intentar predecir resultados en un entorno caótico y 2.^a El comportamiento complejo puede tener causas simples.⁵ Además, señala: «*En el momento presente es sumamente difícil identificar el caos en los datos del mundo real*» (la cursiva es del original). Esto se debe a las enormes restricciones que presentan los datos necesarios para demostrar el caos determinista. Los sistemas considerados no deben tener más de dos o tres variables, y hay que disponer de extensas bases de datos muy precisos. En ocasiones, para realizar un análisis adecuado se requieren millones de observaciones. Pese a su interés, las dinámicas caóticas son de uso limitado en sistemas biológicos complejos como los ecosistemas, debido al elevado número de variables en juego.

Se ha sugerido que el surgimiento de la complejidad se debe a la degradación de las leyes de la naturaleza en reglas algorítmicas.⁶ Es posible que esta propuesta sea una consecuencia inevitable de la visión pan-evolucionista del mundo, según la cual todo evoluciona, incluso las otrora eternas leyes de la ciencia. Por supuesto, también refleja la conveniencia de los modelos informáticos y el atractivo de los ordenadores portátiles y la matemática experimental. Las leyes son para siempre, pero las reglas pueden cambiar. Que las reglas de la vida cambian puede apreciarse en la evolución de la meiosis, la danza intracelular mediante la cual se separan los cromosomas antes de la formación de óvulos o espermatozoides. Aquí entra en juego una nueva regla: la de que para reproducirse hay que encontrar una pareja. Como la ley de Massachusetts que prohíbe comer cacahuetes durante la misa, todavía vigente en el año 2002, la regla de la meiosis no ha existido siempre, sino que comenzó a regir a partir de cierto momento. Quizá sucede lo mismo con las leyes de la física.⁷

Hay un chiste que dice que un científico es alguien que aprende cada vez más de cada vez menos, hasta saberlo todo de nada, mientras que un filósofo es alguien que sabe cada vez menos de cada vez más, hasta saber nada de todo. Una teoría que lo explica todo no explica nada. El diablo ciertamente está en los detalles, que en el caso de la vida se escriben con el lenguaje de la química. Pero la regla de las reglas, por así decirlo,

es la segunda ley de la termodinámica. Asociada con el tiempo lineal, la segunda ley proporciona un marco temporal para la evolución de nuevas leyes. La segunda ley crea estructuras a base de seleccionar compuestos en combinaciones de baja energía, y redes cíclicas que degradan energía de manera continuada. Cuanta más autonomía alcancen estas redes, más posibilidades tendrán de sobrevivir a los caprichos del entorno del que dependen. Los ciclos de compuestos orgánicos complejos (el metabolismo, la energía vibrante y el vigor, sinónimos de la vida) son seleccionados por la segunda ley porque proporcionan medios estables de degradación: las células y los organismos. Junto con las estrellas, constituyen tal vez los ejemplos más llamativos de procesos complejos energéticamente impulsados. Pero hay otros, que van de los torbellinos y remolinos hasta los ciclos metabólicos y los ecosistemas. Vivimos en un mundo repleto no sólo de estructuras estables, sino de procesos estables (o mejor, como veremos en el capítulo 7, «metaestables»).

Lejos de contradecir la evolución, la termodinámica es necesaria para poder comprender todos los procesos complejos, en los que se incluyen las redes basadas en reglas informacionales. Las leyes de la termodinámica, centradas en la tendencia de la naturaleza a conservar la energía, pese a cambiar de forma, y a dirigirse hacia la desorganización molecular, son generalizaciones humanas. Pero reflejan el comportamiento de algo más que modelos de ordenador. Si el mundo es un autómata celular generado por la mente de Dios, en él tienen una especial primacía los comportamientos gobernados por la segunda ley. Desde un punto de vista idealista e informacional, la segunda ley (como la teoría de la probabilidad) puede ser una medida, incluso una metáfora, de nuestra ignorancia. Desde el punto de vista observacional, sin embargo, los comportamientos gobernados por la segunda ley se aplican no sólo a los ordenadores, sino a una vasta variedad de sistemas reales e imaginarios que, de manera natural, «calculan» cómo llegar al equilibrio a partir de los materiales de que disponen. Las actividades de estos sistemas termodinámicos, en ocasiones muy complejas, los convierten en ordenadores *de facto*, aunque sus manuales del usuario aún no hayan sido abiertos para la inspección humana.

Entretanto, la segunda ley revela aspectos capitales de los procesos evolutivos y ecológicos.

De aquí en adelante, por «caos» entenderemos confusión, desorden o incoherencia, aquello que implica el uso ordinario de esta palabra. En el caso de que tengamos que hacer referencia al caos determinista o a la teoría del caos, avisaremos oportunamente.

Introducir una palabra «nueva» en un libro es algo que sólo debe hacerse si no hay más remedio. En este caso, sin embargo, debemos presentar un término y un concepto inhabituales. El término es *exergía*. En realidad, la palabra no es nueva, puesto que se usa ampliamente en ingeniería energética, sobre todo en Europa. Los ingenieros están interesados en obtener el máximo trabajo posible de una parcela de energía dada. Pero no toda la energía es igual. Algunos tipos pueden manifestarse como electricidad capaz de accionar motores, hacer hervir el agua o poner un ordenador en funcionamiento. Otra forma de energía es el calor, radiación infrarroja que puede hacer poco o ningún trabajo. Así, la electricidad es una forma de energía de alta calidad, mientras que el calor es de baja calidad. La exergía mide la calidad de la energía. En otras palabras, mide la máxima capacidad de un sistema energético para realizar trabajo útil a medida que se acerca al estado de equilibrio. Cuando la energía proporciona trabajo, su exergía —su calidad— disminuye. Éste es otro enunciado de la segunda ley. La exergía, además de una medida de la calidad de la energía, es también una medida de la lejanía del equilibrio, de la magnitud de los gradientes y del potencial de hacer algo útil con esa energía. Al respecto, James Kay, en una comunicación personal de diciembre de 2002, afirmó lo siguiente: «La exergía nos habla de los límites teóricos de lo que se puede hacer con la energía. La exergía tiene que ver con el potencial de hacer algo con la energía, mientras que la entropía nos dice qué le ha ocurrido a la energía».

Como examinaremos con más detalle en el capítulo 16, la complejidad ecosistémica se correlaciona con la energía que consume el ecosistema, convirtiéndola en estructura y en ese tipo especial de ciclos materiales a los que llamamos vida. La energía disipada (esto es, la disminución del gradiente) a través de los ecosistemas puede determinarse a partir de la energía solar entrante y la temperatura superficial de la energía que el ecosistema radia de nuevo hacia el espacio. La radiación ultravioleta contiene más energía que la radiación infrarroja o calor. La exergía se consume, y agota, no sólo en las máquinas cuyo funcionamiento estudian los ingenieros para hacerlas trabajar con la máxima eficiencia posible, sino también en los sistemas de flujo naturales, como los tornados y las células replicantes. A pesar de que la autoorganización se ha convertido en un eslogan de la ciencia de la complejidad, en realidad ningún sistema (salvo, quizás, el universo en su totalidad) es absolutamente autoorganizativo: todos se alimentan de alguna fuente externa de exergía. Por último, los ingenieros estadounidenses tienden a hablar

de «energía disponible». Aunque admitimos que esta expresión es acertada, «exergía» tiene la ventaja de ser un término discreto que sugiere una magnitud mensurable.

Energía, calor, trabajo, caos, exergía: con estos conceptos escondidos en nuestro carcaj, ya estamos listos para ir a la caza de los secretos de la naturaleza revelados por la termodinámica.

Todo fluye; nada permanece.

Heráclito

Los secretos del calor

Es cierto que la termodinámica clásica proyectaba sus observaciones en un cuadro de desorden universal al fin de los tiempos. Pero, a pesar de su grandilocuencia cosmológica, la termodinámica clásica era la ciencia eminentemente práctica que se encontraba detrás de la Revolución industrial. La ciencia de la energía estableció relaciones universales entre presión, volumen y temperatura que se aplicaban a todo, desde los motores de vapor hasta las estrellas, pasando por los juguetes. También estableció la segunda ley e introdujo el concepto de entropía, la misteriosa magnitud que aumenta inexorablemente a medida que pasa el tiempo y el calor se dispersa.

Antes incluso de que se conociera la existencia de los átomos mucho antes, por tanto, de que se supiera cómo fisiónarlos para crear armas de destrucción masiva, los científicos revelaron los procesos del flujo de energía. Mientras ideaban máquinas útiles y teorías sobre el comportamiento macroscópico de la naturaleza, los científicos de los siglos XVII y XVIII realizaron experimentos para desvelar los secretos del calor. Su medición comenzó en 1592, cuando Galileo Galilei inventó el termoscopio, un frasco de vidrio de cuello estrecho e invertido colocado en un barreño con agua. El aire del frasco se calentaba o enfriaba, y al hacerlo se expandía o contraía, haciendo subir o bajar el nivel del agua. Durante los siguientes cincuenta años, el instrumento experimentó numerosas innovaciones. Finalmente, evolucionó hasta llegar al moderno termómetro de mercurio del investigador francés Guillaume Amontons. De este modo, con la invención de termómetros precisos, los científicos estaban equipados para medir flujos de calor y diferencias de temperatura.

Para nuestros ancestros, que advirtieron la frialdad de los cadáveres, resultaba natural postular que el calor era una «llama espiritual» que ani-

maba los cuerpos. En la Antigüedad, los médicos Hipócrates y Galeno creyeron que el calor corporal procedía de un fuego interno situado en el ventrículo izquierdo del corazón. De hecho, los antiguos consideraban que, más que en el cerebro, era en el corazón (generador de calor) donde residía el «yo». Ya en 1833, el astrónomo británico John Herschel especuló que el calor era la fuerza motriz que impulsaba no sólo a la gente, sino también a la Tierra. El Sol, sostenía Herschel, vivifica incluso la materia inanimada, elevando y expandiendo el aire y el agua, y produce las corrientes atmosféricas que dan a nuestro planeta el carácter incansable de un ser vital.

En 1714, Daniel Gabriel Fahrenheit introdujo la primera escala de temperatura para el termómetro de mercurio. El cero de esta escala, la temperatura más baja que podía obtener en el laboratorio, correspondía a 32 grados por debajo del punto de congelación del agua (la temperatura del hielo). El astrónomo sueco Anders Celsius modificó esta escala situando el cero en el punto de congelación del agua. A finales de la década de 1750, el químico escocés Joseph Black tomó la temperatura de un volumen de mercurio y otro de agua en un horno, y encontró que el mercurio estaba mucho más caliente. Como una empanada calentada en un microondas, con la corteza fría y el interior caliente, diferentes materiales alcanzaban diferentes temperaturas tras haber sido expuestos a la misma fuente de calor durante el mismo tiempo. Black postuló que el calor era un fluido invisible —una idea bastante natural— que saturaba rápidamente algunas sustancias, calentándolas mucho. Otras sustancias, en cambio, presentaban una capacidad calorífica mayor y se mantenían más frías. Pero había un problema: si distintos materiales respondían de manera diferente a la misma cantidad de calor, entonces los termómetros, que estaban hechos de materiales diversos, proporcionaban diferentes lecturas de la temperatura, por lo que no eran fiables.

Black sugirió que el calor únicamente producía un incremento de temperatura después de que la «capacidad calorífica» del material se hubiese agotado. La teoría de Black postulaba que el calor producido por el frotamiento de dos palos procedía de la liberación de un fluido almacenado durante un largo tiempo. La tendencia de los objetos calientes a expandirse (como cuando echamos agua caliente sobre un bote de mermelada para aflojar la tapa) podía explicarse como una «inflamación» natural de los materiales al hincharse de fluido calórico.

La ciencia moderna entiende el calor de otra manera. La sensación de calor se considera una percepción humana de los movimientos atómicos y moleculares que nuestros sentidos sólo pueden detectar en bloque. Este movimiento microscópico no cesa a cero grados Celsius o Fahrenheit,

sino únicamente a cero grados kelvin (*kelvin*, la unidad internacional de temperatura), que es el mínimo absoluto de temperatura. El calor es nuestra percepción macroscópica del movimiento de las partículas: cuanto más rápido es este movimiento, más caliente nos parece la sustancia. El calor que abandona un cuerpo moribundo puede antojársenos un fluido que escapa, pero hoy se explica como un entrecocar de átomos en movimiento, hasta que los más rápidos y los más lentos se entremezclan, momento en que la diferencia de temperatura, el gradiente, se desvanece. El hecho de que vivamos en un universo que no está a la misma temperatura en todas partes resulta crucial. De hecho, ello refleja una increíble organización, que es la fuente de la complejidad que vemos en la vida.

La teoría atómica del calor constituye una validación bastante sorprendente de las antiguas ideas griegas. El atomismo de los filósofos griegos Demócrito y Leucipo fue recogido, a través del materialista y amante de la vida Epicuro, por Lucrecio, poeta romano y divulgador de la ciencia. En su famoso poema científico *De rerum natura*, Lucrecio proponía que todas las cosas visibles eran manifestaciones de la interacción de partículas invisibles. Asimismo, escribió sobre la reutilización de los átomos (esto es, sobre el reciclado). Combinando ambas ideas, sostuvo que todas las cosas se descomponen, si bien creía que detrás de las formas cambiantes había átomos indestructibles. A pesar de que Dalton postuló la existencia de los átomos, y de que la teoría atómica fue la base del progreso de la química en el siglo XIX, su existencia no fue definitivamente probada hasta 1912.

Un fuego sin escapatoria

La termodinámica tuvo unos comienzos bastantes humildes. Entre sus primeras observaciones, las más importantes fueron la manera en que la energía cambia de forma sin desaparecer (lo que posteriormente se convertiría en la primera ley) y la inevitable pérdida de la capacidad de trabajo en forma de calor (lo fundamental de la segunda ley).

Estas observaciones simples marcaron un punto decisivo en la historia de la ciencia. La física de Sir Isaac Newton describía perfectamente los procesos reversibles, como la oscilación de un péndulo y el giro de los planetas alrededor del Sol. En cambio, el enfriamiento de los objetos calientes o la quema de combustible, por ejemplo, no eran procesos perfectos o eternos como las ecuaciones de Newton. Se trataba de procesos *irreversibles*, imperfectos, marcados por la pérdida y empañados por el fracaso final. A primera vista, el cosmos puede parecer una máquina en

perpetuo movimiento. Lo cierto es que en el mundo real los péndulos dejan de oscilar, y su energía motora se disipa. Con el paso del tiempo, una energía que podría emplearse de manera constructiva se sacrifica, aparentemente para siempre. Una colilla torcida en un cenicero no se endereza, recoge sus propias cenizas y absorbe su propio humo, para luego saltar a los dedos de un hombre con una cerilla encendida que fulgura y desarrolla una cabeza roja, y que luego el hombre devuelve intacta a una caja, junto a otras cerillas. Lo que ocurre es más bien lo contrario: los bebés nacen, los cereales se ablandan, los escritorios se desordenan y las patillas crecen. Los relojes se paran y la gente muere. El calor se pierde, sin recompensa, en el frío.

La termodinámica había lanzado la flecha del tiempo, que fue a clavarse en la lisa y reluciente manzana de Newton, generando calor como consecuencia de la fricción. Posteriormente, las máquinas en perpetuo movimiento resultaron ser una fantasía impracticable. El pasado y el futuro eran diferentes, y la ciencia ya no podía ignorarlo. La termodinámica le dio un grito a la ciencia, forzándola a despertar y enfrentarse a la realidad del tiempo lineal.

Ese grito todavía retumba en la mente científica colectiva, aturdida aún tras el brusco despertar del sueño de Newton. Platón había descrito un dominio intemporal de Ideas puras, del que nuestro mundo cambiante no era más que una copia imperfecta. Se dice de Sócrates, su maestro, que se quedó extasiado en el mercado, ajeno a todo lo que le rodeaba, mientras contemplaba la naturaleza intemporal de lo verdadero, lo bello y lo bueno. Esta noción de un dominio más real que la realidad, inmune al tiempo y al cambio, parece remontarse a Pitágoras y los pitagóricos, un grupo que rendía culto a la perfección eterna de las relaciones matemáticas y las formas geométricas. La seductora idea de un plano secreto de la realidad correspondiente a la mente matemática, capaz de imaginar la infinitud, también ejerció su influencia en la religión. Y en la política: las imágenes del mundo espiritual podían atraer a servidores devotos, algunos incluso dispuestos a sacrificar sus vidas por la oportunidad de entrar en un reino eterno.

Las ecuaciones de Newton, un devoto estudioso de las escrituras, estaban en consonancia con esta intemporalidad. Describían leyes que gobernaban el movimiento de la materia por toda la eternidad. Implicaban una suerte de cielo en la Tierra, una «eternización» de la relojería celestial mediante la omnipotencia y omnipresencia de la gravedad. Aunque no fue lo que se dice un tipo agradable, Newton se convirtió en una especie de Jesús científico e inglés, capaz de acceder a la mente eterna de Dios y mostrarnos cómo realizó sus divinas manualidades.

Pero la termodinámica dio al traste con todo esto. Cuantificaba pérdidas e implicaba que, a pesar de los majestuosos movimientos planetarios, el tiempo avanza en una sola dirección: la extinción.

La cascada de Carnot

A principios del siglo XIX, científicos e ingenieros abordaron el problema de mejorar la eficiencia de las máquinas de vapor. El físico francés Nicolas-Léonard-Sadi Carnot, hijo de un ministro de la Guerra en el gobierno de Napoleón, comenzó a investigar los motores de vapor tras atribuir la reciente derrota de Francia a su uso por parte del enemigo, en el transporte de carbón, acero y armas. Si el secreto de la fuerza militar inglesa podía reducirse a la tecnología del vapor, entonces una mejor comprensión de ésta podría reforzar a Francia. Carnot observó que el calor siempre fluía de lo caliente a lo frío y nunca en sentido contrario, y que este flujo de calor, este paso inexorable del fuego al hielo, podía generar potencia. Así pues, con estas observaciones, y antes de la teoría atómica, Carnot fundó la ciencia de la termodinámica.

En su intento por incrementar la eficiencia de los motores de vapor, Carnot se sumergió en los principios subyacentes de la conversión del calor en trabajo. ¿Cómo funcionaría un motor de vapor idealizado y perfecto? En 1822, a los veintiséis años, Carnot concibió un motor perfecto hipotético que funcionaba según un ciclo reversible: el movimiento del pistón era circular y volvía a su posición original sin generar calor y sin pérdida de potencia mecánica. Aunque las máquinas reales nunca eran tan eficientes, la observación de Carnot sobre el comportamiento del calor proporcionó un enunciado clave de la segunda ley de la termodinámica: es imposible realizar trabajo a base de transferir calor de un cuerpo frío a uno caliente.

Carnot propuso que el calor fluía «cuesta abajo», como una cascada. Así como una cascada más alta proporciona más energía para hacer girar una noria, una diferencia de temperatura (gradiente) mayor proporciona más energía para accionar motores de vapor. La comparación de Carnot del calor que, en una caída de agua por un precipicio, se sume en el frío ilustraba bien las similitudes entre ambos procesos. El físico francés señaló que no sólo la temperatura de la caldera de vapor hacía que los pistones se movieran con fuerza y velocidad, sino también la diferencia de temperatura entre la caldera, muy caliente, y el radiador, más frío. «La producción de calor no basta para generar la potencia impulsora», escribió Carnot en sus *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (Reflexio-

nes sobre la fuerza motriz del calor). «Es necesario que haya frío; sin él, el calor sería inútil.»¹ Sin nombrarlo como tal, Carnot había reconocido implícitamente el papel del gradiente de temperatura.

En otras palabras, el calor solo no basta. Tiene que *fluir* (hacia el frío). La diferencia a lo largo de una distancia —el gradiente— es lo que establece las condiciones para que el flujo ocurra. Cuanto mayor sea el gradiente, más potencia para accionar la gran máquina del orgullo nacional. Si lo demás no cambia, el potencial de extracción de energía aumenta cuanto más intenso (pero no demasiado) es el gradiente.

Carnot se equivocó al afirmar que el calor fluía. La ciencia moderna asocia el calor a los átomos con velocidades medias más elevadas; éstos se mezclan con átomos de menor velocidad media, correspondiente a una temperatura más baja. Así pues, el calor no es un fluido, sino un índice tosco de las velocidades atómicas medias. Con todo, nuestra experiencia de un calor que fluye proporciona una buena aproximación práctica del comportamiento de un número enorme de partículas en movimiento, demasiado pequeñas para ser vistas. Se trata de una abreviación sensorial —como sucede también, por ejemplo, con nuestra percepción del amanecer (que en realidad corresponde a un giro de la Tierra) o de una película (que se reduce a una secuencia de imágenes estáticas)—. La termosfera, más allá de la estratosfera, a pesar de que se encuentra a una temperatura extremadamente alta, contiene tan pocas moléculas que si nos expusiéramos a ella moriríamos congelados. Sus moléculas, excitadas por la radiación solar, se mueven muy deprisa, pero son tan escasas que la termosfera nos quemaría de frío, no de calor.

Aunque erróneas en los detalles, las conclusiones de Carnot permitieron aprender cómo extraer eficientemente energía del medio. Y contenían, como una semilla, la idea de que los gradientes establecen la posibilidad de ciclos de trabajo. Con la ventaja de una mirada retrospectiva, podemos apreciar la importancia de sus observaciones: los gradientes, además de impulsar motores térmicos y máquinas artificiales, son la fuente de la concentración cíclica de energía en las máquinas naturales, que luego buscan más energía para mantenerse en marcha. En otras palabras, los gradientes también impulsan a los organismos. Pero éstos, máquinas naturales que, en lugar de fabricarse, se desarrollan, nunca extraen su energía de gradientes de temperatura, como sí hacen los motores térmicos. Clasificados como máquinas, los organismos deberían considerarse robots autorreplicantes nanotecnológicos, inteligentes y a menudo conscientes, que obtienen su energía de gradientes químicos. Los organismos fotosintéticos, como plantas, algas y bacterias fotosintéticas, son aún más sofisticados: obtienen su energía directamente del Sol, es decir, del gradiente solar.

Así pues, las *Réflexions* contienen dos afirmaciones cruciales. En primer lugar, el calor fluye de los cuerpos calientes a los fríos. En segundo lugar, es imposible convertir enteramente calor en trabajo: en todos los casos se pierde algo en la transformación. La casa siempre gana, y es imposible componer una máquina de movimiento perpetuo. No hay creación sin destrucción.

Un fluido sin sustancia

Carnot, que murió de cólera a los treinta y seis años, compartía la concepción de Black del calor como un fluido. Carnot y otros pioneros en la búsqueda de los secretos del calor creían en la existencia de este fluido invisible, que llamaron «calórico».

Que el calor fluía parecía obvio. Si uno, después de un paseo por la nieve, pone sus manos heladas en la espalda tibia de otra persona, notará cómo fluye calor a sus manos. Así, el calor era una especie de fluido invisible. Otro ejemplo: júntense dos barras de hierro a distinta temperatura, y pasará calor de la más caliente a la más fría. Joseph Black había sugerido que podría definirse una unidad de calor como la cantidad necesaria para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra (0,45 kg) de agua. El nombre que dio a esta unidad nos es familiar: «caloría».

El físico norteamericano Benjamin Thompson fue uno de los primeros en ver que esta explicación del calor era inadecuada.² Thompson (o el conde Rumford, como se le conocería después) había luchado en la guerra de la Independencia norteamericana. Puesto que había sido espía de los ingleses, no podía volver a casa, así que se trasladó a Inglaterra. El expatriado emigró luego a Alemania y fijó su residencia en Múnich. Allí, en 1798, reconoció que a veces el calor parecía surgir de la nada. Mientras observaba cómo se torneaban cañones de latón en una fábrica de armas, Thompson advirtió que tanto el taladro como el cañón se calentaban sobremanera. Sin embargo, ¿dónde estaban las rugientes llamas que los calentaban?

La búsqueda de la fuente del calórico resultó infructuosa: Thompson pesó el cañón y los recortes, y no encontró pérdida de peso, a pesar de la gran cantidad de calor producido por el torneado. Si se hubiera perdido algún fluido real, el conjunto formado por el cañón torneado y los recortes de metal habría pesado menos que el cilindro metálico inicial. Pero no era así.

Frustrado, Thompson se puso a buscar una respuesta. ¿Qué era el calor en realidad? Lejos de ser un fluido invisible, parecía ser una «cosa»

que se había estado suministrando al metal a medida que se calentaba: movimiento.

En 1842, el físico y médico bávaro Robert Julius Mayer, que compartía la sospecha de Thompson de que el calor no tenía sustancia, amasó pulpa de papel mediante grandes palas impulsadas por un caballo caminando en círculo. Mayer intentó, sin éxito, medir la cantidad de calor producido por este proceso, y publicó sus resultados.

Aunque no era concluyente, el experimento sirvió para que un científico aficionado inglés, James Prescott Joule, ideara mediciones más precisas, en condiciones de laboratorio rigurosas, de la conversión de calor en trabajo. El principio del aparato de Joule era similar al del experimento de Mayer. Pero en vez de un caballo, palas y pulpa de papel, Joule recurrió a un tanque de agua, y las palas eran impulsadas por un peso en caída libre casi sin fricción. Comparando el trabajo (peso \times altura) realizado por el peso al caer con el calor ganado por el agua, Joule determinó el equivalente mecánico del calor. En 1843 escribió: «El trabajo realizado por el peso de una libra a través de 772 pies (231,6 m) en Manchester, si se invierte en producir calor por fricción, eleva la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit».³ Joule había conectado la mecánica newtoniana clásica con la termodinámica. Ya no se ocupaba de la masa, la gravedad o la dinámica celeste, sino del calor.

Tras esta primera evidencia firme de la primera ley, Joule proporcionó su confirmación. La electricidad calentaba los conductores, debilitándose al hacerlo (lo cual constituía otro ejemplo de la capacidad de transformación de la energía). Como en las máquinas de vapor y los péndulos, la energía no se perdía del todo, sino que más bien se volvía inutilizable al disiparse en forma de calor. Joule midió esta producción de calor. El barón William Thomson, matemático y científico escocés —con otro título, el de Lord Kelvin, cuyo nombre pervive en la escala científica de la temperatura—, proclamó que el calentamiento eléctrico se debía a la fricción de la corriente eléctrica al atravesar los conductores.

Las mediciones de Joule vindicaron al un tanto místico Robert Julius Mayer. Influidado por la teología evangélica que le inculcaron cuando era estudiante en un seminario, Mayer creía que las energías química, eléctrica, térmica y demás emanaban de una única causa común. Como Carnot con su calórico. Mayer estaba en el buen camino. No se equivocaba al afirmar que el Sol producía luz y calor y que, a través de las plantas, convertía la energía química en alimento para que los animales pudieran moverse, respirar y sentir. El descubrimiento de Joule del equivalente mecánico del calor probó que la energía no era un fluido invisible. La energía era proteica: podía cambiar de forma. La idea de que la energía nunca

se perdía, sino que sólo se transformaba, se convirtió en la base de la primera ley de la termodinámica.

Adiós al reloj cósmico

En los albores de la termodinámica, a mediados del siglo XVII, el físico y químico inglés Robert Boyle ya había hecho un sutil descubrimiento. Mientras investigaba las propiedades físicas de los gases, demostró que el volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión y la temperatura. Siguiendo su estela, los comienzos de la termodinámica se centraron bastante en el estudio de relaciones simples entre presión, volumen y temperatura.

El ejemplo más corriente es la elevación de la temperatura y la presión cuando un pistón comprime un volumen de gas en un cilindro (figura 3.1). Aunque pocos lo advirtieron en su momento, los experimentos de Boyle violaban la reversibilidad newtoniana. Boyle hizo mediciones muy precisas y predicciones del comportamiento colectivo de una inmensidad de partículas, prescindiendo de sus posiciones y momentos individuales. Midió lo que luego se conocería como «macroestado», el comportamiento de enormes colecciones de partículas imposibles de medir individualmente.

Otra figura pionera en la historia del pensamiento termodinámico fue el físico francés Jacques Alexandre César Charles, que causó sensación al construir los primeros globos de hidrógeno y elevarse hasta casi dos kilómetros de altura en uno de ellos. Charles descubrió que gases distintos se expandían en la misma medida cuando se producía un incremento igual de temperatura. Antes que él, Guillaume Amontons ya había realizado observaciones parecidas.

Puede que este descubrimiento llevara a Amontons a postular, en el año 1699, la existencia de una cota inferior de frío, correspondiente al punto en el que los gases ya no pueden contraerse más. Este frío insuperable se convertiría en el «cero absoluto», la temperatura más baja posible, correspondiente al cero en la escala Kelvin.

Un siglo después, el químico francés Joseph-Louis Gay-Lussac determinó que la presión de cualquier gas, contenido en un volumen dado, aumenta o disminuye $1/273$ de su valor inicial por cada grado Celsius. A partir de estas observaciones se elaboró una «escala natural» de temperatura. Si partimos de un gas a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ como punto de referencia y lo enfriamos a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, o 0 K , se prevé que la presión del gas se reducirá a cero. A temperaturas extremadamente bajas, la materia muestra

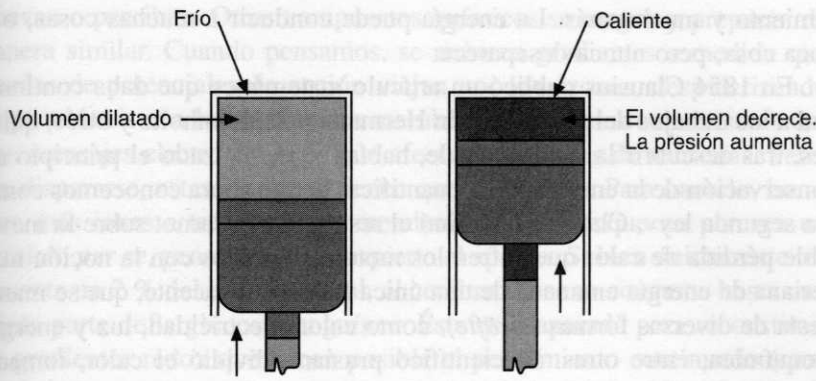


Figura 3.1. Un pistón que comprime un volumen de gas es un ejemplo de las relaciones termodinámicas entre volumen, presión y temperatura. A medida que el pistón sube, el volumen de gas decrece, con un incremento concomitante de la presión y la temperatura. El mismo número de moléculas está confinado en un volumen menor.

propiedades inusuales, como la superconductividad, la superfluidez y la condensación de Bose-Einstein. Con el objetivo de estudiar estos fenómenos, los científicos han inventado técnicas para conseguir temperaturas cada vez más bajas. La temperatura más baja registrada hasta ahora, conseguida en 1995 por científicos del National Institute of Standards de Boulder, Colorado, es de 20 nK (veinte milmillonésimas de grado por encima del cero absoluto). En el cero absoluto cesa toda acción molecular y, en teoría, el gas se comprime hasta un volumen nulo. La tercera ley de la termodinámica viene a decir 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».

En su periodo clásico, la termodinámica se erigió sobre dos grandes pilares: Carnot y el físico prusiano Rudolf Julius Emanuel Clausius. Si el concepto de Mayer de una superfuente universal (que llamó *Ursprach*) fue demasiado atrevido para el orden científico establecido, Clausius supo cómo respaldarlo empíricamente. Así, presentó la idea de una energía siempre cambiante en una versión más sobria, corregida como la primera ley de la termodinámica.⁴

Clausius reinterpretó los conductores eléctricos de Joule desde una perspectiva mayeriana, argumentando que el calor no era más que una de muchas formas de «energía», el dinero cósmico que podía comprar mo-

vimiento y mucho más. La energía puede conducir a muchas cosas, o a poca cosa, pero nunca desaparece.

En 1854 Clausius publicó un artículo matemático que daba continuidad a los trabajos del físico alemán Hermann von Helmholtz y otros, quienes, tras descubrir la obra de Joule, habían matematizado el principio de conservación de la energía. Para cuantificar lo que ahora conocemos como «la segunda ley», Clausius combinó el resultado de Carnot sobre la inevitable pérdida de calor que sufren los motores térmicos con la noción mayoritaria de energía emanada de una única fuerza subyacente, que se manifiesta de diversas formas (*Kräfte*), como calor, electricidad, luz y energía bioquímica, entre otras. El científico prusiano dividió el calor, tomado como una medida de la cantidad de energía, por la temperatura, que es una medida de la intensidad de energía. Esta razón aumentaba inevitablemente con el tiempo. La nueva magnitud resultaba extraña: era como la energía, pero tenía una dirección; siempre aumentaba. ¿Cómo había que llamar a aquella misteriosa magnitud?

Clausius la llamó «entropía». Si el dinero místico de Mayer era una especie de moneda cósmica que podía usarse para comprar nuevas cosas sin perderse en el proceso, este otro dinero estaba sujeto a un extraño proceso de inflación, hasta que no pudiese hacer que las cosas se movieran o cambiaran.

Clausius eligió el símbolo S para representar la nueva magnitud.⁵ Decidió «llamar a la magnitud S “la entropía del cuerpo”, a partir del término griego que significa transformación. He construido deliberadamente la palabra “entropía” para que se asemeje todo lo posible a la energía, ya que ambas magnitudes, que van a ser conocidas por estos nombres, están tan estrechamente relacionadas en su significado físico que parece deseable cierta similitud en sus designaciones».⁶

No sujeta a su manifestación calórica, la energía era un camaleón que podía cambiar, y cambiaba, de forma. Ardiente resplandor en las selvas de la noche, la potencia muscular del tigre de William Blake procede de la energía de los azúcares de la sangre, almacenada a partir de los animales que ha devorado, los cuales se alimentan de plantas que, a su vez, se alimentan del gradiente solar. En las mitocondrias de las células del cuerpo del tigre se generan flujos de electrones e iones —electricidad— a partir de la reacción de moléculas ricas en hidrógeno, procedentes del alimento, con el oxígeno. Las reacciones son posibles gracias a la diferencia de potencial químico entre el hidrógeno y el oxígeno, lo que se conoce como «gradiente redox». Las membranas mitocondriales transfieren este potencial a una molécula almacenadora de energía, el ATP, cuya descomposición libera la energía necesaria para que las formas de vida se

muevan o perciban. Otros compuestos químicos se cargan y preparan de manera similar. Cuando pensamos, se reducen gradientes a medida que oleadas de potenciales de acción viajan por los axones, despolarizando cargas eléctricas a lo largo de las membranas; los neurotransmisores envían mensajes electroquímicos que afectan a millones de neuronas. Pero, tras dispararse, estas neuronas tienen que recargarse. Para hacerlo, bombean más iones a través de sus membranas. Así, aunque no parezca un ejercicio *per se*, pensar mucho despierta el apetito. Si bien únicamente representa un 2 % del peso corporal, el cerebro humano consume hasta una quinta parte de la glucosa sanguínea. Ésta es acaparada para reconstituir los gradientes redox que hacen posible el pensamiento continuado (que, en el tigre, pronto vuelve a centrarse en cuándo y cómo acechar la siguiente comida). Cuando el tigre fija la mirada en su presa y salta, está consumiendo energía procedente del Sol (aunque muy transformada) en un proceso cíclico que consume energía para fortalecer la forma acumuladora de ésta. Dicho ciclo energético alcanza su máximo esplendor en el tigre, pero, en última instancia, se extiende al universo entero. Mirando al tigre con los ojos de su mente, William Blake se pregunta qué mano o qué ojo inmortal pudo enmarcar tan temida simetría.

La respuesta a esa pregunta parece clara: la energía, tal como la describe la termodinámica, esto es, cambiante, decadente, capturada y reciclada, y siempre adoptando nuevas formas.

De 1840 a 1865 Clausius completó la obra de Carnot formalizando la primera y la segunda leyes de la termodinámica e introduciendo la noción de entropía, una medida de la conversión irreversible de la energía en fricción y calor. Así pues, la primera ley nos dice que la *cantidad* total de energía en un sistema cerrado permanece invariable, mientras que la segunda ley nos habla de la calidad de la energía del sistema (que tiende a degradarse, a dejar de ser utilizable).

Como Carnot, Clausius se dio cuenta de que, aunque la energía se conservaba, era imposible volver a convertir todo el calor en trabajo, a causa de fricciones, pérdidas de calor e ineficiencias. La naturaleza no era como el idealizado motor reversible de Carnot. Una vez que la energía se convertía en calor y se disipaba, se perdía para siempre y no podía recuperarse para realizar trabajo. Tal vez el dinero se encuentre ahí, pero no podemos acceder a él. No podemos ganar. Algo se pierde para siempre. De esta energía residual, no reconvertible en trabajo, se dice que es la producción de entropía del sistema. En los ecosistemas, sin embargo, los residuos de un organismo se reciclan y nutren a otros organismos. La evo-

lución de organismos metabólicamente nuevos produce nuevos residuos, lo que propicia que otros organismos adquieran la capacidad de aprovecharlos. Así, lo que parece una pérdida entrópica cuantitativa puede en ocasiones recuperarse mediante la evolución de nuevos metabolismos, nuevas capacidades mentales o, en tecnología, un instrumental más potente. En este caso, la energía suele proceder del exterior, a través de un nuevo sistema cuyos mecanismos y aptitudes para reconocer gradientes y obtener trabajo de ellos se hacen posibles mediante la disponibilidad de una fuente de energía más rica. En general, el calor producido por un proceso irreversible puede realizar trabajo, pero no en el sistema que lo ha generado.

Los organismos de las profundidades no emplean el calor como fuente de energía, sino que aprovechan un gradiente químico. El calor, a pesar de que es utilizable por algunos artefactos tecnológicos, sigue siendo el «final de la línea» en los procesos orgánicos de transformación energética. En efecto, no puede reciclarse y usarse como alimento o energía para la vida. Tampoco la gravedad, —aunque algunos creyentes en los ovnis defiendan que puede impulsar naves con un consumo de energía nulo, y que si esto no es del dominio público es por una conspiración de las agencias de inteligencia gubernamentales y las compañías petrolíferas— sirve como fuente de energía para el metabolismo o la tecnología compleja (aparte de norias, centrales hidroeléctricas y otras cosas por el estilo). Algunas tecnologías simples pueden basarse en gradientes de temperatura, y la capacidad de aprovecharlos se hace más sofisticada mediante el ingenio tecnológico. Por ejemplo, hay motores de Sterling adaptados como dispositivos de mano que explotan un gradiente a primera vista inutilizable: la diferencia de temperatura entre una parte del cuerpo (la mano, pongamos por caso), unos 36 °C, y la temperatura ambiente, unos 25 °C. Este motor es capaz de hacer girar una rueda de 20 cm de diámetro. Aunque no resolverá la crisis de energía, este nuevo aparato demuestra que lo que usualmente consideramos calor disipado puede ser suficiente para producir trabajo en condiciones apropiadas.

En 1850, Rudolf Clausius dio los retoques finales al edificio de la termodinámica clásica con su formalización del enunciado de la segunda ley: «No es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la transferencia de energía de un cuerpo más frío a otro más caliente».⁷

Este enunciado es significativo no sólo porque implica que la flecha del tiempo es un rasgo intrínseco de la naturaleza, sino porque no excluye la aportación de energía para retardar o invertir el curso normal de los flujos. Por ejemplo, podemos usar energía de alta calidad, como la electricidad, para accionar una bomba que transporte agua hacia arriba. Esto

puede tacharse de «antinatural», pero no viola la segunda ley. Si dejamos caer el agua desde la misma altura para accionar un generador que produzca electricidad, sería imposible capturar toda la energía potencial, convertirla en cinética y luego en electricidad para bombear toda el agua de nuevo hasta la altura inicial. Los efectos de la degradación de energía pueden demorarse, pero no eludirse.

Newton retrató un universo en principio eterno, cohesionado por una gravedad invisible, que funcionaba como un reloj celestial. La termodinámica clásica dio al traste con el cuadro newtoniano. La fricción y la entropía comprometían la pretendida eternidad, la naturaleza celestial de la Tierra. El cambio terrenal era menos limpio, más difícil de medir y más claramente irreversible que los arcos, dientes y ruedas de la máquina sin fricción que era el sistema solar newtoniano. La fricción y la entropía introdujeron el factor tiempo. Para empeorar las cosas, en la misma época en que se estaban forjando las leyes de la termodinámica clásica, Darwin presentó su teoría de la evolución de la complejidad biológica por selección natural. La eternidad se retiró precipitadamente a la imaginación matemática de la que había salido.

Adiós al cosmos que funcionaba como un reloj.

Progresivo y regresivo, el mundo estaba ahora dividido por una autopista de tiempo. Le tocaría a una nueva termodinámica, la del no equilibrio, tomar un helicóptero para contemplar los dos sentidos del tráfico y presentar la evolución y la termodinámica como elementos de una misma corriente.

El científico no estudia la naturaleza porque es útil; la estudia porque se deleita en ella, y se deleita en ella porque es bella. Si la naturaleza no fuese bella, no valdría la pena conocerla, y si no valiese la pena conocer la naturaleza, tampoco valdría la pena vivir la vida.

Jules-Henri Poincaré

Probabilidades predecibles

En la segunda mitad del siglo XIX, Ludwig Boltzmann (un personaje atormentado que sufría migrañas y acabaría suicidándose) cambió la termodinámica para siempre, reformulándola en términos de la teoría de la probabilidad. Observó que en masas de partículas imposibles de seguir individualmente, el comportamiento del calor y los gases reflejaba tendencias consistentes. Inspirada en la idea darwiniana del cambio mediado por la selección natural, la obra de Boltzmann verificó las teorías y observaciones de la termodinámica clásica macroscópica: las cosas cambiaban en dirección a lo más probable. Es más, la tendencia de los átomos a entremezclarse y arruinar sus intrincadas configuraciones parecía dar a los habitantes de este universo (una especie de casino cósmico) su sentido del paso del tiempo. Este gran paso adelante, la unificación de la termodinámica clásica y la mecánica newtoniana, proporcionó una base científica para la percepción del tiempo lineal.

Sin embargo, personalidades como el matemático Jules-Henri Poincaré, el químico Johann Josef Loschmidt o el filósofo Friedrich Nietzsche se mostraron reticentes. En un tiempo infinito, objetaron, todo lo que tenga alguna posibilidad de ocurrir, por improbable que sea, ocurrirá, y no una vez, sino infinitas. Las condiciones aleatorizadas tienden a indicar fases tardías de los procesos, ya que dichos procesos se encaminan hacia el equilibrio.

Pero la vida y otros procesos parecen volverse más complejos con el paso del tiempo. La maquinaria replicadora de los seres vivos, su memoria y su creciente inteligencia les dan la oportunidad de comprender sus orígenes. En el caso de los seres humanos, podemos recordar nuestra infancia, reproducir un DVD y hacer hipótesis razonadas sobre los estados de alta energía de la radiación en las fases primordiales del universo.

¿Cómo es posible? ¿Tiene la vida algo de especial? Y si el futuro está definido por la aleatoriedad como dirección más probable, ¿en qué se diferencia el pasado? Si átomos y moléculas tienden a distribuirse de manera más probable y aleatoria en el futuro, ¿no deberían hacer lo mismo en el pasado?

El tiempo nos gobierna, pero cuando se nos pide que señalemos hacia ayer o mañana, no podemos hacerlo. En sus *Confesiones*, san Agustín escribió lo siguiente: «¿Qué es el tiempo entonces? Sé muy bien lo que es, siempre que nadie me lo pregunte; pero si me preguntan qué es, me desconcierto». No obstante, estas moscas en el bálsamo de Boltzmann (la repetición de todas las combinaciones posibles de las partículas dentro de un espacio cerrado en un tiempo infinito, y la incapacidad intrínseca de los modelos dinámicos de distinguir el pasado del presente) eran mayormente filosóficas. Boltzmann no había pretendido desmitificar el tiempo; su intención era explicar por qué el comportamiento de la materia obedece la segunda ley. Y a pesar de las direcciones opuestas que tomaban la termodinámica y la evolución biológica, el científico a quien Boltzmann más debía, como afirmó él mismo, no era otro que Darwin. Éste era el héroe de Boltzmann. El naturalista inglés había explicado el cambio de las especies mediante la observación de poblaciones (grandes números de variantes reproductoras). Boltzmann se propuso hacer lo mismo para la materia no reproductiva. Así, basándose en vastos números de átomos y sus disposiciones más probables, explicó la tendencia de la naturaleza a mezclarse con el paso del tiempo. Y lo hizo incluso antes de que los físicos se pusieran de acuerdo sobre la existencia de los átomos. El comportamiento de la materia, sostenía Boltzmann, también debía derivarse de sus «poblaciones» (aunque no pudieran verse). Fue un razonamiento extraordinario. Además, se demostró correcto.

Práctica, prometeica y basada en la observación, la termodinámica clásica era una suerte de ingeniería glorificada, espoleada por la antigua búsqueda humana del dominio del fuego. La termodinámica estadística, con sus predicciones del comportamiento de masas de partículas, situó la ciencia observacional sobre fundamentos matemáticos más firmes. Al hacerlo, incrementó su poder explicativo, ampliándolo a los gases y otros fenómenos.

A pesar del éxito que supuso el enfoque macroscópico de la termodinámica clásica, a finales del siglo XIX tres grandes científicos, dejando de lado un siglo de trabajo, adoptaron una nueva perspectiva. El austriaco Ludwig Boltzmann, el escocés James Clerk Maxwell y el norteameri-

cano Josiah Willard Gibbs concibieron un modelo microscópico que contrastaba con la visión macroscópica tradicional de la termodinámica.

Ludwig Boltzmann «nació en Viena el 20 de febrero de 1844, la noche antes del martes de carnaval y el miércoles de ceniza, al final de un baile de gala. Más adelante bromearía con que ésta era la razón de que su temperamento oscilara entre el júbilo y la pesadumbre». ¹ Boltzmann razonó que en un litro de aire había un inmenso número (billones) de átomos o moléculas, y sugirió que la termodinámica podía ser abordada con métodos probabilísticos y estadísticos. No había otra alternativa, porque era imposible llevar un registro de las coordenadas y momentos de tantas moléculas.

Así pues, Boltzmann aplicó la teoría de la probabilidad a la tendencia de la materia al equilibrio. Reconoció el poder de la estadística para tratar con números descomunales de partículas y observó que, con un número de casos suficiente, lo ideal y lo real convergían. Por ejemplo, si se quería conocer las posibilidades de obtener cara o cruz al lanzar una moneda perfectamente equilibrada, el comportamiento promedio sólo se apreciaba tras muchos lanzamientos. Sólo cuando hayamos lanzado la moneda un número enorme de veces la distribución de los resultados se aproximará a un 50 % de caras y un 50 % de cruces. Sin embargo, cuando estamos manejando 10^{23} moléculas, los promedios estadísticos convergen con la realidad: hay tantas partículas que su comportamiento colectivo promedio es indistinguible de su comportamiento colectivo real.

Las partículas se hacen tanto más predecibles cuanto mayor es su número en una sección mayor del espacio. Boltzmann empleó la teoría de la probabilidad para modelar los comportamientos colectivos de sistemas constituidos por un gran número de partículas. La ecuación de Boltzmann para la entropía termodinámica ($S = k \log W$) está grabada en la lápida de su tumba, situada en el Cementerio Central de Viena. S es la entropía; k , una constante; «log», el logaritmo natural, y W , el número de estados posibles. Por lo tanto, la entropía es el logaritmo de la probabilidad.

¿Qué significa esto? El logaritmo es el exponente que indica la potencia a la que se eleva un número (la base) para obtener un número dado. El logaritmo de 100 en base 10 es 2. Usar logaritmos implica comparar dígitos de números, lo cual resulta útil cuando se trata de estimar números descomunales, como los que se requerían para contar partículas que buscan el equilibrio en el mundo real. Pero esta taquigrafía logarítmica requerida para el manejo de grandes números no se restringe a la ciencia, los casinos y las compañías de seguros. La evolución también la ha implantado en nuestra herencia genética. Un grito que hiele la sangre, medido por la energía de las ondas sonoras que viajan por el aire, no es ni

mil, ni un millón, ni siquiera mil millones, sino un billón de veces más ruidoso que la caída de una aguja; la diferencia entre un susurro y una conversación normal es de mil veces. La escala de decibelios que refleja nuestra percepción auditiva es logarítmica. El oído reduce una diferencia multiplicativa poco manejable a una diferencia aditiva, economizando la percepción mediante una distorsión de la realidad.

Boltzmann reformuló la termodinámica en términos de la distribución estadística de los microestados energéticos dentro del sistema. Para entender los microestados, pensemos en canicas colocadas en el interior de cajas pequeñas, interconectadas dentro de una caja grande llamada macroestado. Considérese una caja con diez mil canicas en el interior de otra con diez cajas del mismo tamaño, y ninguna canica en las otras nueve. Si se abren las portezuelas de todas las cajas y la caja grande se sacude aleatoriamente durante un buen rato, es de esperar que, con el paso del tiempo, se alcance una distribución por compartimento de unas mil canicas, las cuales se comportarían como moléculas de gas. Esta equiprobabilidad de la distribución de las moléculas entre los compartimentos corresponde al macroestado de máxima entropía para el sistema cerrado. Si continuamos agitando la caja grande, es tremendamente improbable —pero no imposible— que todas las canicas vuelvan a distribuirse según la configuración de baja entropía correspondiente a las diez mil canicas en el interior de un solo compartimento. Del mismo modo, no es imposible que todos los átomos de oxígeno de nuestro dormitorio se concentren en una esquina, dejándonos asfixiados; pero las posibilidades son tan escasas, la improbabilidad tan enorme, que no tenemos por qué preocuparnos.

Gravedad y entropía

Se puede objetar que las canicas pueden reunirse en un solo compartimento si sostenemos la caja grande por un vértice y la sacudimos de manera que la gravedad haga que todas las canicas caigan hacia la esquina inferior de la caja. No obstante, el ejemplo de las canicas no es más que un modelo del comportamiento de las moléculas de un gas, que a escalas tan pequeñas no se ven afectadas por la gravedad. Aun así, hay que admitir que la gravedad genera gradientes y energía disponible en nubes estelares perturbadas por ondas. Pero este efecto sólo es apreciable a escala astronómica y no tiene relevancia para las relativamente delicadas operaciones de la vida, aunque podría tenerla en el futuro si la vida se expandiese lo suficiente. Si esto ocurriera, o hubiera ocurrido en el pasado, el hecho de que la naturaleza no aborrezca los gradientes a escala cosmoló-

gica podría ser muy bien una bendición, ya que sugiere que la vida en conjunto no será una víctima inevitable de la muerte térmica cósmica, sino que seguirá adelante para adoptar formas nuevas y audaces, las cuales quizás incorporen la gravedad como fuente de energía. Hasta ahora, sin embargo, la vida ha sido incapaz de explotar la energía potencial gravitatoria para su metabolismo y propagación.

Tal vez el dilema termodinámica-gravedad sea simplemente una cuestión de tamaño y masa. Jack McShea ha indicado que los cálculos de la gravedad newtoniana valen para sistemas de gran masa, como las canicas, las bolas de billar y los cuerpos celestes. Pero cuando se trata de cuerpos de tamaño y masa muy pequeños, las fuerzas termodinámico-estadísticas predominan, de ahí que el análisis termodinámico sea más apropiado. En efecto, para objetos muy pequeños, como las partículas que muestran un movimiento browniano, los procesos termodinámicos son relevantes. A estas escalas, los fenómenos estadísticos predominan sobre la gravedad. Los sistemas naturales parecen tener una granulación jerárquica, de manera que ciertos fenómenos son observables y mensurables sólo a ciertas escalas. De hecho, las leyes de la física no se aplican a todas las escalas, y algunas sólo rigen para cierto ancho de banda dentro de una escala jerárquica (McShea, comunicación personal, 2004). Hay una similitud fenomenológica entre los sistemas gravitatorios y los termodinámicos. En ambos casos los sistemas tienden a caer en sus pozos de mínima energía potencial. Se desconoce si esta propiedad común es indicativa de una posible unificación de estos principios dispares. Además, hay que decir que la direccionalidad profunda ya no puede quedar fuera de la ciencia, no sólo por la irreversibilidad termodinámica del trabajo (y la entropía) derivado de los gradientes, sino porque la medida cuántica define inevitablemente un antes y un después en relación con lo que se mide.² La medida cuántica y la entropía/trabajo son algo más que dificultades menores para la pretendida invariancia temporal de la ciencia moderna. Junto con la gravedad, sugieren o que el universo «realmente» no obedece la invariancia temporal (lo que quiere decir que va a alguna parte o hace algo) o que el dominio temporalmente invariante y sesgado de los físicos clásicos es sólo una de dos maneras «complementarias» (esto es, igualmente verdaderas pero mutuamente incompatibles) de contemplar el cosmos.³

La versión TNE de la segunda ley, el simple pero impersonal principio de que la naturaleza aborrece los gradientes, no es unívoca. El recipiente aislado que era el dominio idealizado de las observaciones en termodinámica clásica (la llamada «caja adiabática») es justo eso: una idealización. En realidad, está afectado, aunque sea imperceptiblemente,

por la gravedad. Así pues, la influencia de la gravedad no es inexistente, si bien puede despreciarse sin más al considerar, por ejemplo, la mezcla entrópica de la crema de nuestro café, o un gas en un recipiente cerrado.

Aun así, no nos parece que la capacidad de la gravedad para generar gradientes a escala cósmica invalide nuestra versión TNE de la segunda ley. Además de que la naturaleza aborrece los gradientes a todas las escalas biológicamente relevantes, desde el nivel molecular de la biología celular hasta el nivel planetario de los procesos biosféricos registrados por satélite, la gravedad no ha podido ser unificada con las otras tres fuerzas fundamentales de la física, esto es, las fuerzas nucleares fuerte y débil y el electromagnetismo. Resulta evidente que la gravedad, generadora de gradientes a escala cósmica, debe desafiar cualquier afirmación de que la segunda ley es inexorable y omnipotente. Recordemos, sin embargo, que la vida, disipadora de energía encargada de agilizar el cumplimiento de la segunda ley, se ha mostrado cada vez más capaz de «desafiar» la gravedad en la evolución, orgánica y mecánica, del vuelo. Aunque las ecuaciones de Newton que permitieron los viajes espaciales nunca habrían podido predecir la forma de las pisadas de Neil Armstrong en la Luna,⁴ las observaciones fenomenológicas de la expansión natural de los sistemas productores de entropía son congruentes con la llegada de la vida a ese satélite.

En última instancia, la gravedad y la entropía son aspectos de un único universo interconectado que empequeñece incluso la vasta mirada de ese monstruo esperanzado que es la humanidad. Más que en el sueño de una descripción minuciosa del futuro de los sistemas complejos, la termodinámica fija el horizonte de nuestras esperanzas en el trazado de las líneas generales que conectan la vida con aquellos sistemas energéticos en que se producen cambios direccionales reales, así como en la demostración de que tales cambios son naturales. Antes de rendirnos ante el avance apabullante de la gravedad como fuerza cosmológica suprema, deberíamos pensar que, en los modelos cosmológicos vigentes, más del 90 % de la materia y la energía del universo no se tiene en cuenta. Entre los cosmólogos, existe la creciente convicción de que lo que se observa como materia y energía ordinarias apenas constituiría un 5 % de la masa total del universo. Dicho de otro modo, según las teorías cosmológicas vigentes, la mayor parte del universo está desaparecida. Para nosotros, en consecuencia, la objeción gravitacional a la idea de la aversión de la naturaleza a los gradientes es irrelevante, salvo a escalas espaciotemporales más allá del dominio de la vida. Esto no significa que estas escalas no puedan estar algún día dentro del radio de acción de la vida, o que la gravedad no pueda tener un papel significativo en, pongamos por caso, el

metabolismo de los sistemas vivos. Significa únicamente que, para nuestros propósitos, «la aversión de la naturaleza a los gradientes» expresa de manera elegante el funcionamiento de la segunda ley en sistemas abiertos y cerrados a las escalas en que nos centramos en el presente libro.

También vale la pena notar que el consenso, creciente entre los cosmólogos, sobre la increíble coincidencia de accidentes afortunados, en cuanto a parámetros y constantes universales, en el origen del universo se asemeja a los cálculos creacionistas sobre la improbabilidad del origen de la vida. Resulta interesante comprobar, sin embargo, que cuando adoptamos una perspectiva termodinámica en que el surgimiento de las primeras células no es consecuencia de interacciones al azar, sino de un «diseño» funcional y natural para disipar gradientes, buena parte del misterio estadístico se esfuma. ¿Es posible que una perspectiva termodinámica pueda ayudar también a aliviar el misterio del «principio antrópico», al mostrar que las constantes universales y otros factores presentes en el origen del cosmos no son simplemente aleatorios (y, por ende, inconcebibles), sino que se enmarcan en el contexto más amplio de un universo, en gran medida invisible, que está «haciendo algo»? En última instancia, tanto la gravedad como la entropía muestran una flecha temporal (la una juntando las cosas, la otra desperdigándolas) en un universo cambiante que estamos lejos de conocer al completo. Parafraseando el comentario de Darwin acerca de la potencial recepción científica de su teoría de la selección natural, podemos decir que cualquiera que dé más peso a las incongruencias que a los numerosos hechos relacionados descartará, muy probablemente, la versión de la TNE contenida en nuestro libro.

Al adoptar una visión energética del surgimiento, continuación y expansión de la vida, vemos la transformación, la pérdida y el cambio como fenómenos reales. Bristol retrotrae el debate sobre si el universo es esencialmente inmutable o cambiante a los filósofos griegos Parménides (partidario de lo primero) y Heráclito (partidario de lo segundo).⁵ Según la postura consensuada de la ciencia moderna, representada por la física, el universo es esencialmente inmutable, en el sentido de que puede describirse mediante ecuaciones temporalmente reversibles, simétricas e invariantes. No obstante, considerar el cambio como un epifenómeno o una mera apariencia, un residuo flotante en el océano inmutable de la realidad, conduce a paradojas tales como la negación de la experiencia real del cambio, la evolución, el envejecimiento, etcétera. A pesar de oponerse a la corriente científica principal, la visión de Heráclito, que considera fundamental el cambio y no la estasis, fue adoptada por los estoicos, quienes oponían el principio del amor, que junta las cosas, al principio del roce, que las separa. Como principios filosóficos, el amor y el roce se pa-

recen a los principios físicos de la gravedad y la entropía. Sin embargo, tanto la gravedad como la entropía rigen dominios de cambio direccional real. Boltzmann hizo el descubrimiento fenomenológico (basado en la observación) de una entropía inofensiva para la física clásica, al conectar la mecánica, con su tiempo simétrico y reversible, al flujo del tiempo, que en la experiencia cotidiana es irreversible. Como señala Bristol, algunas de las mentes más brillantes de la ciencia y la filosofía han intentado reconciliar el aparente sentido único del flujo temporal, por un lado, con la reversibilidad esencial del dominio idealizado de los movimientos simétricos, las leyes intemporales y las ecuaciones eternas de la física, por otro. La «respuesta» podría ser que el dominio intemporal de la imaginación y el mundo real ligado al tiempo proporcionan dos perspectivas distintas, igualmente válidas, pero fundamentalmente irreconciliables. Como la luz, que ante nuestra percepción limitada aparece a la vez como partícula y como onda, la existencia, pese a la aparente contradicción, puede ser a la vez intemporal y temporal.

Ver el bosque, no los árboles

La formulación microscópica y estadística de Boltzmann validó las teorías y observaciones de la termodinámica clásica macroscópica. En efecto, la ley de Boyle (la proporcionalidad inversa entre la presión y el volumen de un gas), por ejemplo, se ajustó a la descripción probabilística de Boltzmann. La explicación de la ley de Boyle es que las moléculas del gas chocan con las paredes del recipiente y rebotan. El bombardeo de estas moléculas de trayectorias y velocidades aleatorias contra las paredes del recipiente genera una fuerza que conocemos como «presión del gas». Ahora supongamos que reducimos el volumen a la mitad. Puesto que el recipiente sigue conteniendo la misma cantidad de gas que antes, el número de moléculas por unidad de volumen se multiplicará por dos y, en consecuencia, también lo hará el número de impactos sobre las paredes del recipiente, lo que provocará que la presión se duplique.

Las relaciones de Charles y Gay-Lussac entre la presión, el volumen y la temperatura de los gases también encontraron acomodo en la mecánica estadística de Boltzmann. Cuando se calienta un gas en un sistema cerrado, las moléculas se mueven más deprisa. La ganancia de energía cinética conduce a un incremento del número de rebotes en la pared del recipiente por unidad de tiempo, lo que se traduce en un incremento de la presión. Además, debido a su mayor energía cinética, la fuerza de cada miniimpacto molecular también es mayor. La conclusión es que la pre-

sión aumenta según el cuadrado de la velocidad molecular. Lavoisier y Gay-Lussac habían mostrado que si un gas se mantiene a presión constante, su volumen decrece $1/273$ por cada descenso en la temperatura de un grado centígrado. A medida que la temperatura de un gas disminuye, sus moléculas pierden velocidad. En el cero absoluto cesa todo movimiento molecular. A una temperatura tan baja no puede haber vida auténtica, ninguna complejidad activa. Una vez que el sistema se calienta, sin embargo, todo comienza a moverse de nuevo (hacia el equilibrio). Nadie puede calcular las trayectorias individuales de 10^{23} partículas, pero se puede examinar su comportamiento colectivo. Esto es lo que hizo Boltzmann.

La termodinámica había encontrado una manera de tratar la materia como un bosque, no como una suma de árboles. Se renunciaba a la precisión del mundo perfecto de Newton, pero se ganaba la capacidad de predecir el comportamiento de números incontables de partículas. La paradoja era que, a escala humana, los hechos físicos de la dispersión de los gases y el paso del tiempo eran predecibles como probabilidades. Las partículas de la realidad cotidiana, a diferencia de los cuerpos celestes contables, eran inimaginablemente numerosas; *debían* considerarse en conjunto. Además, mientras que las ecuaciones de Newton podían dar marcha atrás para restablecer el estado inicial del sistema, en termodinámica el estado inicial se perdía en el proceso de cambio. Que empecemos con diez mil moléculas en una casilla concreta de una partición de la caja mayor es irrelevante para el resultado final. La agitación aleatoria de la caja compartimentada borra su historia y conduce paso a paso a su estado más probable, el equilibrio. No se puede desandar lo andado, molécula a molécula, para volver al estado original: el método de Boltzmann era un procedimiento brillante para captar una realidad escurridiza y reconocer, en lugar de ignorar, su tendencia perversa a borrar sus propias pisadas.

El Dios del universo newtoniano podría haber hecho las cosas como eran y dejar que continuaran así, gloriosamente, para siempre. La termodinámica de Boltzmann era diferente. Su tratamiento colectivo de vastas poblaciones de partículas constituyó un triunfo supremo del arte de la aproximación. El universo tenía granos demasiado finos como para ser descrito punto por punto. Debíamos comprenderlo teóricamente tal como nuestros sentidos lo entendían en la práctica: no de una manera abrumadoramente detallada, sino a grandes rasgos. Así como la palabra *hoja* continúa siendo útil aunque pueda aplicarse a cualquier número de hojas individuales (sean de arce u orégano, un *Coleus* de delicada nervadura o un trébol mordisqueado por orugas), las matemáticas de Boltzmann sintetizaban el enorme número de microestados con el símbolo de trabajo

(realmente tan bueno como nuestros sentidos) del macroestado. La realidad atómica, más finamente granulada que la capacidad de resolución de nuestros sentidos y más detalladamente específica que nuestras palabras, también se encontraba más allá de la capacidad de resolución de las matemáticas de Boltzmann. Sin embargo, la noción termodinámica de macroestado, como nuestros sentidos, cumplía su función. Por primera vez en la ciencia matemática, el comportamiento del macroestado, su tendencia al equilibrio, se ajustaba a nuestro sentido cotidiano del paso del tiempo.

El tiempo no espera a nadie

Pero los enigmas del tiempo persisten. El alcance de estos enigmas puede apreciarse comparando la famosa teoría del eterno retorno de Nietzsche (todo lo que puede ocurrir ocurrirá, y no una vez, sino un número infinito de veces) con las ideas del biólogo teórico Stuart Kauffman. Matemáticamente, el tiempo transcurrido desde el origen del universo ha sido desoladoramente insuficiente para acomodar todas las combinaciones posibles de sus partículas constituyentes. En términos matemáticos, el cosmos es «no ergódico», no repetitivo. Esta observación es importante, ya que la termodinámica (el estudio de la energía y sus transformaciones) se ha basado tradicionalmente en la estadística de la mezcla en sistemas cerrados. Cuando la crema se mezcla con el café, el conjunto tiende al equilibrio a medida que avanza el flujo temporal: se entremezclan, y la temperatura del café se iguala a la del ambiente. Simplemente, el café y la crema tienen muchas más maneras de mezclarse que de separarse, y hay muchas más situaciones en las que el calor del café se mezcla con el frío del ambiente que al revés. No obstante, puesto que no ha transcurrido tiempo suficiente desde la gran explosión, y puesto que la organización presente de las partículas que componen la vida depende de ensamblajes ancestrales, la improbabilidad se exagera. La evolución de la vida y la tecnología humana están, según Kauffman, «cinéticamente atrapadas».⁶ Las ecuaciones de Newton nunca habrían predicho las pisadas humanas en la Luna. Es más, incluso las ecuaciones de Einstein y Bohr, y virtualmente todas las de la ciencia moderna, asumen incorrectamente que podemos establecer de antemano el entorno que queremos predecir. «Me encanta no conocer el futuro», escribió Nietzsche. No podemos aplicar leyes porque la evolución es demasiado poderosa. Kauffman, inspirándose en una especulación de su amigo el cosmólogo Lee Smolin —quien ha propuesto una selección natural de universos en que los agu-

jeros negros dan lugar a nuevos universos con nuevas constantes y leyes—,⁷ llega a preguntarse si lo que tomamos por leyes naturales eternas no surgen en realidad a lo largo del tiempo evolutivo, como los códigos humanos. El movimiento reglado de los cromosomas en las células (meiosis), por ejemplo, no existía en el origen de la vida. El último trilobite que saltó hacia la izquierda en lugar de hacia la derecha y fue devorado se llevó con él, para siempre, los genes de todo un linaje. La primera ardilla voladora en realidad había nacido con unos grotescos pliegues cutáneos que resultaron ser prácticos cuando saltaba.

Kauffman argumenta que estos raros eventos, los cuales suceden a medida que el cosmos y la vida avanzan contingentemente hacia un futuro siempre conectado al pasado, no pueden darse por sentados de antemano. La visión de Kauffman tiene reminiscencias de la expresada por el novelista checo Milan Kundera en *La insoportable levedad del ser*: la idea de que los hechos nunca se repiten exactamente, sino que más bien flotan a la deriva, para nunca repetirse o rescatarse, en una nube existencial que se dispersa hasta el infinito. La vida no es un experimento repetible. Nada ocurre dos veces de la misma manera. Podemos reconocer cuánto debe esta postura a la formulación termodinámica de la entropía. Aún más extraña es la visión boltzmanniana que se ve modificada por ella: la de la eterna recurrencia.

En la física clásica no hay direcciones preferentes. Sí, todos los átomos de oxígeno de la habitación podrían converger en una esquina y hacer que muriésemos de asfixia. Pero la probabilidad de que esto ocurra es prácticamente nula. Las moléculas de O₂ siguen llenando la habitación y siendo respirables. El matemático francés Jules-Henri Poincaré, sin embargo, señaló que en un tiempo infinito (un periodo ciertamente largo) todas las moléculas de oxígeno se concentrarán en una esquina de la habitación ¡un número infinito de veces! Todo sistema dinámico aislado acabará regresando a un estado tan próximo a su condición inicial como queramos. Éste era su «teorema de recurrencia»: en un tiempo infinito, todo lo que puede ocurrir ocurrirá. Tu pelo estará peinado, enmarañado, cortado al cepillo y al cero, con la raya en medio y en todos los estilos imaginables. Estarás leyendo estas líneas, estarás comprando este libro, escribirás notas en los márgenes. Morirás, y no sólo volverás a vivir y morir otra vez, sino infinitas veces. Es posible que la objeción de Poincaré a la lógica probabilística del tiempo lineal de Boltzmann influyera en el filósofo alemán Friedrich Nietzsche y su doctrina del eterno retorno.

Loschmidt, colega de Boltzmann y el primero en estimar el tamaño de los átomos, tenía una «paradoja de la reversibilidad» ligeramente distinta: si el movimiento de las partículas se rige por ecuaciones dinámicas

adireccionales respecto del tiempo, ¿cómo puede un flujo temporal termodinámico derivarse del movimiento de los átomos, aun *con* la ayuda de la teoría de la probabilidad? Si la transición entre estados se basara realmente en la probabilidad, tan probable sería un incremento de la entropía como una disminución. Por ejemplo, Boltzmann no había caído en la cuenta de que nada obligaba en principio a que la entropía del pasado fuese menor que la del futuro. De este modo, introdujo subrepticamente la asimetría entre pasado y futuro, que no podía derivarse de las trayectorias simétricas de las partículas en la dinámica clásica (William Thomson, o Lord Kelvin, objetó lo mismo en 1874).

Loschmidt no admitía la invocación de Boltzmann a la fisiología, es decir, que la baja entropía sea una propiedad intrínseca de la vida (ésta sería la causa de que nuestra entropía actual sea baja) y que simplemente resultemos ser la clase de criaturas para las que un aumento de entropía supone un avance en el tiempo. Loschmidt tenía una propuesta alternativa: los procesos productores de entropía en el presente emanaban de condiciones iniciales especiales de nuestra región del universo, no de las leyes que gobernaban los movimientos de las partículas, ni de ninguna fisiología especial.

Einstein le dio la razón a Loschmidt, y señaló que las ondas que se propagan desde un centro, pero nunca convergen espontáneamente hacia él, también admiten un tratamiento estadístico que no explica su asimetría; ellas también deben resultar de condiciones iniciales especiales.

Los cálculos de Poincaré y la paradoja de Loschmidt arrojaron dudas sobre la asociación entre el incremento de entropía y la flecha del tiempo. Si en un sistema aislado todo se repite con una recurrencia infinita, no hay flecha del tiempo, a pesar del incremento de entropía percibido. Los decrecimientos locales y el aumento global de la entropía pueden ser interpretados por ciertos seres como una flecha del tiempo, pero, dadas las leyes de la mecánica y la prevalencia de la energía, no puede haber una asimetría temporal global.

A la luz de los cálculos de Poincaré, Boltzmann reconsideró su interpretación y se fue convenciendo de que el tiempo lineal es una ilusión de seres confinados en ciertas regiones del universo. En una carta a Ernst Zermelo, discípulo de Plank, reconocía que o bien «el universo entero se encuentra en el momento presente en un estado muy improbable» (pero, entonces, ¿de dónde procedía esta improbabilidad y por qué se hacía extensiva al pasado evolutivo observable?), o bien

«asumimos que los eones que dura este estado improbable, y la distancia de aquí a Sirio, son ínfimos comparados con la edad y tamaño

del universo entero. En semejante universo, que globalmente está en equilibrio térmico y por lo tanto muerto, se encontrarán aquí y allá regiones relativamente pequeñas del tamaño de nuestra galaxia [...]. En el conjunto del universo los dos sentidos del tiempo son indistinguibles, del mismo modo que en el espacio no hay arriba ni abajo. Sin embargo, así como en cierto punto sobre la superficie terrestre podemos llamar “abajo” a la dirección hacia el centro de la Tierra, un organismo vivo que se encuentre en un mundo así en cierto periodo de tiempo puede definir el “sentido” del tiempo como el que va del estado menos probable al más probable (siendo el primero el “pasado” y el segundo el “futuro”) y, en virtud de esta definición, encontrará que su pequeña región, aislada del resto del universo, “inicialmente” siempre está en un estado improbable». ⁸

Boltzmann creía que sólo de esta manera podía sortear las objeciones de Loschmidt y el teorema de recurrencia de Poincaré. Únicamente considerando que el tiempo lineal era una ilusión podía aceptarse la segunda ley «sin invocar a un cambio unidireccional del universo entero desde un estado inicial definido hasta un estado final», una direccionalidad difícil de conciliar con la eterna recurrencia de Poincaré.

Así pues, la derivación del tiempo lineal de la teoría de la probabilidad, aunque fascinante, continúa siendo un misterio. ¿Por qué el pasado está congelado y fijado, mientras que el futuro parece estar abierto a nuestras opciones y decisiones, maleable por nuestro libre albedrío? ¿De dónde viene la asimetría del tiempo? Einstein colaboró con el matemático Kurt Gödel para perfeccionar la visión probabilística del tiempo criticada por Poincaré, para explicar matemáticamente la asimetría temporal, esa congelación del esquivo «ahora» en un pasado inmutable a medida que nos deslizamos imperceptiblemente hacia el futuro. Antes de que Gödel se le uniera en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Einstein había intentado por tres veces derivar la irreversibilidad de la segunda ley a partir de la mecánica y la probabilidad. Finalmente arrojó la toalla y se dedicó a cuestiones más ligeras (sus teorías de la relatividad, también por influencia de Poincaré). Sin embargo, en los años cuarenta Gödel le mostraría a Einstein que la ligazón del tiempo y el espacio en la teoría de la relatividad implicaba lógicamente tanto el viaje en el tiempo como la ausencia de una base objetiva para nuestra percepción del paso del tiempo. Aun así, Einstein no dejó de expresar cierta perplejidad ante el aparente flujo del tiempo, que él, como Gödel y Boltzmann, contemplaba como una especie de espejismo cósmico. Unos meses antes de su muerte, evocó el comentario de Boltzmann de que la diferencia entre el antes y el des-

pués es «una mera ilusión emanada de nuestro punto de vista especialmente restringido». Einstein escribió una misiva a la familia de su confidente intelectual y mejor amigo en los tiempos de estudiante en Zúrich, el científico e ingeniero Michele Besso, que acababa de morir. «Michele se me ha adelantado en dejar este extraño mundo», escribió Einstein a la hermana y el hijo de Besso. «Es algo sin importancia. Para nosotros, físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro es sólo una ilusión, por persistente que ésta sea.»⁹

Nuestras mentes pueden aprehender la eternidad, el dominio de las Ideas puras del que nuestra existencia terrenal no es más que una copia imperfecta, según Platón. Pero la copia imperfecta es un proceso medular en el mundo real y corruptible regido por la segunda ley de la termodinámica. Nuestros cuerpos están destinados a envejecer, y nada dura para siempre. Las idealizaciones matemáticas pueden estar muy alejadas de los sistemas abiertos de la realidad viva. De hecho, su relación con la realidad puede ser absolutamente perversa. Prigogine propone dos mundos: uno dinámico, de trayectorias reversibles y con unas ecuaciones de Newton suficientes para llevar al hombre a la Luna; y otro termodinámico, de procesos y flujo temporal (el mundo temporalmente orientado que nos permite reconocer la reversibilidad en el movimiento de un péndulo ideal).

El tenue vínculo entre dinámica y termodinámica, entre partículas reversibles y vida irreversible, no tiene por qué obsesionarnos. La recurrencia eterna se aplica a sistemas aislados con suministros de energía inagotables, no tanto a sistemas abiertos. Además, si el cosmos se expande indefinidamente, entonces puede continuar evolucionando para siempre, sin repetirse. De hecho, el monstruoso número de microestados accesibles por seres cíclicos explotadores de gradientes, a pesar de su enormidad, puede constituir un subconjunto cada vez más pequeño de los microestados posibles de una infinidad de partículas interactivas en un universo en expansión. Si Einstein no pudo ahondar en el vínculo entre dinámica y tiempo, no tenemos la necesidad de rompernos la cabeza intentando dilucidarlo. En este caso, la situación respecto a la termodinámica se asemeja a la llamada «interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica: las cosas son así, y podemos describirlas de una manera matemáticamente elegante, aunque nuestras mentes demasiado humanas no sean capaces de abarcar un cuadro de todas las conexiones.

Einstein y Loschmidt apuntaron la existencia de condiciones iniciales especiales en el origen del universo. La cosmología moderna, que enfatiza el ajuste preciso de las constantes desde el principio del universo, es consistente con esta interpretación. El físico Lee Smolin ha sugerido que

los agujeros negros pueden dar lugar a nuevos universos, cada uno con distintas leyes y constantes físicas, y que sólo uno como el nuestro podría llegar a ser entendido por seres como nosotros.¹⁰ Como señaló Einstein, lo más misterioso del universo es que podamos comprenderlo. Tal vez parte del problema estriba en que formamos parte de la estructura que intentamos observar, por lo que únicamente podemos hacernos una representación parcial de ella. Si la entendemos en un sentido, puede que tengamos que renunciar a entenderla en el otro: no estamos fuera del rompecabezas que intentamos componer, sino que somos piezas de ese rompecabezas.

La visión de Boltzmann sobre la energía y la selección natural

Boltzmann intentó entender la vida en el marco de su nueva termodinámica estadística. Sin embargo, aunque quiso emular el recurso de Darwin a la selección natural para explicar el cambio de grandes colectivos (poblaciones y especies), los colectivos de Boltzmann tendían a la simplicidad, el caos molecular y la aleatoriedad, al olvido más que a la memoria. Los sistemas con tendencia al equilibrio contradecían la descripción darwiniana de un incremento evolutivo de complejidad por selección natural. A Boltzmann le preocupaba esta contradicción: la materia viva presentaba una organización estructural y unas combinaciones químicas que nunca durarían mucho en un recipiente aislado. El científico austriaco sabía muy bien que los sistemas vivos no tomaban el camino del equilibrio estadístico, sino que continuaban creciendo y evolucionando. En todo caso, en el curso de su desarrollo, los organismos parecían minimizar, no maximizar, su entropía interna.

En 1886, Boltzmann sugirió proféticamente que el gradiente energético impuesto por el Sol sobre nuestro planeta impulsa los procesos de la vida. Postuló la existencia de una competencia por la entropía, al estilo darwiniano, entre los sistemas vivos consumidores de energía:

«Entre la Tierra y el Sol, sin embargo, hay una colosal diferencia de temperatura, de manera que entre ambos cuerpos la energía no se distribuye en absoluto conforme a las leyes de la probabilidad [...]. Las formas intermedias adoptadas por la energía solar hasta que desciende a la temperatura terrestre pueden ser altamente improbables, lo que nos permite usar fácilmente la cesión de calor del Sol a la Tierra para la realización de trabajo, como la transferencia de agua de la retorta al condensador en un destilador. La lucha general de los seres ani-

mados por la existencia no es, por lo tanto, una lucha por las materias primas (que, para los organismos, son el aire, el agua y el suelo, todas disponibles en abundancia) ni por la energía, que cualquier cuerpo posee de sobra en forma de calor (aunque, desafortunadamente, no sea transformable), sino una lucha por la entropía, disponible en virtud de la transferencia de energía del Sol caliente a la Tierra fría. Para explotar al máximo esta transferencia, las plantas extienden su inmensa superficie foliar y fuerzan a la energía solar, antes de que su temperatura caiga hasta la terrestre, a llevar a cabo, de manera aún inexplorada, ciertas síntesis químicas de las que nadie en nuestros laboratorios tiene hasta ahora la menor idea. Los productos de esta cocina química son el objeto de la lucha del mundo animal». ¹¹

Salvo por el término «entropía», que es mejor reemplazar por una magnitud como la energía libre de Gibbs, el análisis de Boltzmann es esencialmente moderno. Una versión actualizada podría leerse así:

Los organismos luchan no sólo unos contra otros, sino por sobrevivir en un entorno desafiante; a menudo colaboran y hasta se unen para acceder mejor a la energía libre absolutamente indispensable. Siempre tiene que haber energía disponible para mantener los sistemas informacionales de la vida. Estos mismos sistemas, por su parte, se encargan de extraer la energía necesaria para su propio funcionamiento. Las organizaciones funcionales, sean aves, abejas, bacterias o internautas, reducen gradientes. Que los sistemas abiertos persistan y aumenten de complejidad refleja su capacidad de adquirir información para obtener energía.

Demonios y ángeles de Maxwell

Las investigaciones de Boltzmann eran de naturaleza estadística. Los críticos pusieron objeciones a su trabajo porque contenía un tratamiento probabilístico defectuoso de la segunda ley. No era limpio, sin mácula: había una posibilidad, aunque fuera ínfima, de que las diez mil moléculas volvieran a agruparse en su microestado original, de que optaran por la vía de la *improbabilidad*. Se ha demostrado que cuanto menor es el tamaño del sistema y más corto el intervalo de tiempo, mayor es la posibilidad de que se produzcan estas improbabilidades. En parte porque los fenómenos cuánticos son considerados temporalmente reversibles, el denominado «teorema de fluctuación» sugiere que las posibilidades de que

la entropía no aumente se incrementan a escalas submoleculares e intervalos de tiempo extremadamente cortos. En 2002, tras medir el efecto de las moléculas de agua sobre glóbulos de látex mantenidos entre láseres, investigadores de la Universidad Nacional de Australia observaron «violaciones» de la segunda ley.¹² Sin embargo, como ha señalado el astrofísico Stephen Hawking, la segunda ley difiere de la mayoría de leyes naturales en su carácter probabilístico.¹³ Una observación improbable no viola la segunda ley más que un número de lotería ganador viola la sentencia de que jugar a la lotería es dinero perdido. Irónicamente, la consecuencia práctica más importante del resultado de los investigadores australianos no es una mayor esperanza en un orden universal, sino todo lo contrario. En efecto, ahora parece claro que los artefactos nanotecnológicos (como las cápsulas de millonésimas de milímetro imaginadas por los científicos para transportar fármacos a través del torrente sanguíneo) tendrán más defectos de funcionamiento improbables cuanto más pequeños sean.

El físico escocés James Clerk Maxwell era plenamente consciente de la naturaleza estadística de la segunda ley. Un año antes de su muerte, escribió, en la reseña de un libro para la revista *Nature*, que «la verdad de la segunda ley es [...] una verdad estadística, no matemática, porque depende del hecho de que los cuerpos con los que tratamos consistan en millones de moléculas [...]. De ahí que la segunda ley de la termodinámica se viole constantemente, y en considerable medida, en cualquier grupo de moléculas lo bastante pequeño perteneciente a un cuerpo real».¹⁴ Podríamos decir que las reglas pueden incumplirse, pero que eso no las invalida: la gente gana al bingo y al veintiuno a diario, pero eso no impide que la casa tenga todas las de ganar. Y el casino cósmico tiene una ventaja añadida: no podemos abandonarlo.

Nadie estaba más obsesionado con el incumplimiento de la segunda ley, cuya posibilidad había visto desde el principio, que Maxwell. Este brillante científico, contemporáneo de Boltzmann, puso la segunda ley a prueba mediante un test mental. Imaginó un diminuto duende. Este duende percibiría la tendencia de la materia a fluir en direcciones de alta probabilidad, y le pondría freno. En teoría, el demonio de Maxwell, como se le conocería, podría incluso invertir el flujo del tiempo a base de intensificar el gradiente (en lugar de reducirlo) y almacenar energía (en lugar de consumirla).

«[C]oncibamos un ser finito», escribió Maxwell a su colega Peter Guthrie Tait en 1867, «que conozca las trayectorias y velocidades de todas las moléculas mediante una simple inspección, pero que no pueda realizar ningún trabajo, salvo abrir y cerrar un agujero en el diafragma

por medio de una corredera sin masa.»¹⁵ Tait había enviado a Maxwell un manuscrito sobre la historia de la termodinámica. Maxwell lo revisó y encontró lo que para él era un resquicio en la segunda ley: su contravención deliberada. Un sistema inteligente podría reconocer y recoger las partículas rápidas, contraviniendo la supuestamente inevitable tendencia de la entropía a aumentar. Aunque la naturaleza aborrezca los gradientes (no se decía así en la época de Maxwell), el demonio podría invertir este proceso, creando e incrementando diferencias, retornando sistemas «gastados» a un estado diferenciado de no equilibrio, susceptible de producir trabajo adicional. El duende selectivo ni siquiera tendría que invertir energía en el proceso. Maxwell escribió lo siguiente:

«Sólo se ha empleado la inteligencia de un ser muy observador y diestro [...]. En resumen, si el calor es el movimiento de porciones finitas de materia, y si podemos aplicar herramientas a tales porciones de materia que nos permitan tratarlas por separado, entonces podemos servirnos del movimiento diferente de las diferentes porciones para, a partir de un sistema uniformemente caliente, restaurar la desigualdad de temperaturas o los movimientos de grandes masas. Pero no podemos hacerlo: nos falta el ingenio necesario para ello».¹⁶

El demonio de Maxwell se encontraba en el interior de un recipiente cerrado, junto a una trampilla sin rozamiento. Desde esta situación privilegiada, el duende podía ver las moléculas que se aproximaban y juzgar cuáles eran las más rápidas (figura 4.1). A éstas las dejaría pasar. Cuando se aproximaran moléculas más lentas, cerraría la puerta. Como un selectivo portero de una discoteca de moda (aunque falto de peso) que sólo deja pasar a la gente guapa, el demonio de Maxwell discriminaba. Puesto que la velocidad molecular se correlaciona con el calor, tal favoritismo elevaría poco a poco la temperatura de una mitad del recipiente, a pesar de la segunda ley. Aplicando su percepción, el duende crearía un gradiente en lugar de deshacerlo.

El diminuto portero que negaba la entrada a las moléculas lentas podría haber sido reemplazado por algún dispositivo puramente mecánico. En qué podría consistir exactamente es un asunto que aún subyuga a los físicos. Si fuera factible, el resultado sería fantástico: podría hacerse fluir calor de un cuerpo frío a uno caliente, con lo que obtendríamos energía **gratis**. Con la tecnología demoniaca requerida, podríamos tomar una **sauna** en medio de la nieve, o asar salchichas con el calor emitido por nuestro refrigerador. Con un mecanismo que separara los átomos de movimiento más rápido, podríamos generar gradientes de temperatura para

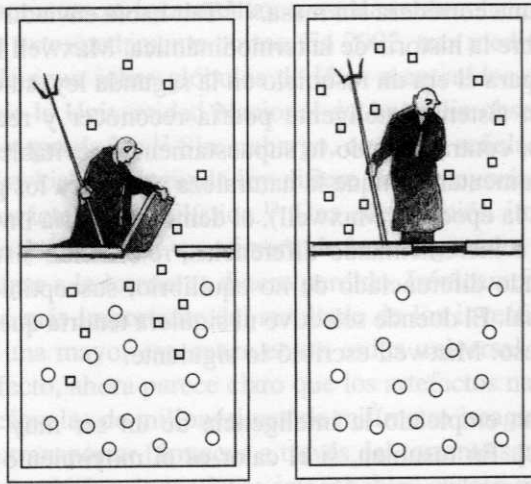


Figura 4.1. El demonio de Maxwell es un experimento mental termodinámico. James Clerk Maxwell imaginó una pequeña entidad informada y de dedos ágiles (el demonio) capaz de discriminar entre moléculas «calientes» de movimiento rápido y moléculas «frías» más lentas. El demonio abría una trampilla y sólo permitía el paso de las moléculas rápidas (cuadrados) a un lado de la cámara, mientras que las lentas (círculos) quedaban segregadas en el otro lado. Esto lo conseguía sin ningún trabajo por su parte. Aunque posible en teoría, este concepto desafiaría la segunda ley, porque de la nada crearía un gradiente del que podría extraerse trabajo.

alimentar electrodomésticos e impulsar vehículos con nada más exótico que el aire. Con la «demonotecnología», podríamos tener refrigeradores sin desagüe, nadar desnudos en un lago glacial sin congelarnos y cambiar la factura de la electricidad por mecanismos inteligentes capaces de detectar y acumular partículas rápidas.

En la vida real no existen duendes generadores de gradientes, ni sus equivalentes mecánicos. De hecho, la oficina de patentes estadounidense ni siquiera se molestaría en comprobar diseños que violen la segunda ley, a menos que junto a la solicitud se aporte un modelo que funcione. Lo que más se aproxima al demonio de Maxwell en la vida real son los propios seres vivos. Los seres inteligentes sienten, escogen y actúan de maneras muy sutiles. Las bacterias remontan gradientes de azúcar; las diatomeas marinas discriminan entre distintas formas y tamaños de cuentas de vidrio para construir sus esqueletos de sílice. Como mucho, el discernimiento y la sensibilidad de las células, ya expertas en maquinaciones microscópicas, podrían explotarse para generar gradientes de temperatura y así obtener energía gratis. Pero esto plantearía el problema de las patentes de formas de vida.

Sin embargo, el duende imaginario de Maxwell no era una completa entelequia. Si la inteligencia no ha tenido mucho éxito en crear gradientes, al menos los gradientes se han convertido en una especie de inteligencia. Es lo que llamamos «ordenadores». La idea de Maxwell de un demonio mínimo ayudó al sabio Leo Szilard a advertir que la presencia o ausencia de una partícula representaba un bit de información. Hoy en día, cuando corrientes de bits electrónicos recorren las placas madre de los ordenadores portátiles, la inteligencia inanimada se debe en parte a la conexión entre energía e información establecida por Maxwell. El cursor centelleante en la pantalla de nuestro ordenador, que da sentido a un gradiente eléctrico (en lugar de crear un gradiente usando su inteligencia), representa el demonio vuelto del revés.

El argumento más convincente contra el demonio de Maxwell es que éste sería tan pequeño que interaccionaría significativamente con las moléculas entrantes. Si se tratara de un dispositivo mecánico, debería estar formado por unos pocos átomos y moléculas. Cuanto menor es el número de partículas constituyentes del demonio, mayor es la fluctuación estadística y su tendencia a errar. Pero Maxwell insistió en que no veía «por qué no se podría prescindir de la inteligencia y que la cosa actuara por su cuenta».¹⁷

Por otra parte, la idea de una trampilla en miniatura que se abría sólo hacia un lado, permitiendo así acumular moléculas en una mitad de la cámara, daba que pensar. El físico polaco Marian von Smoluchowski prescindió de los dedos hábiles del duende y se quedó únicamente con una trampilla que se abría hacia la izquierda. Al principio la válvula podría dejar entrar unas pocas moléculas rápidas y rechazar las lentas, que rebotarían en ella. Sin embargo, Smoluchowski llegó a la conclusión, en 1912, de que cualquier trampilla lo bastante pequeña como para separar moléculas de esta manera, absorbería calor y comenzaría a vibrar tanto que no podría funcionar.

Más adelante, el físico norteamericano Richard Feynman concibió su propia versión del demonio mecánico. Consistía en un mecanismo de trinquete que permitía que un peso colgado de una polea subiera, pero no bajara, al ser bombardeado por un número suficiente de moléculas rápidas. No obstante, este dispositivo también era presa de la variación aleatoria: se calentaba y, como reconoció el propio Feynman, «pronto comienza a agitarse [...] tanto que no sabe si viene o va, y mucho menos si las moléculas vienen o van».¹⁸ Los modelos de ordenador han confirmado las predicciones de Feynman y Smoluchowski sobre la interferen-

cia de las fluctuaciones aleatorias en el funcionamiento de un demonio de Maxwell mecánico.

El matemático Otto E. RöSSLer, de la Universidad de Tubinga, autor de más de 250 trabajos sobre caos determinista y antiguo profesor invitado de ciencia no lineal en el Centro de Estudios No Lineales de Los Álamos, todavía tiene esperanzas de conseguir un demonio de Maxwell que funcione. Su idea es emplear un microscopio de efecto túnel para separar átomos de uranio rápidos y lentos sobre una capa de oro u otra superficie lisa. RöSSLer ha hurgado en la curiosa preservación, por vía católica, de la idea clásica de la *pericoreisis* (que significa «sin mezcla»), la palabra que empleó Anaxágoras para describir los efectos del *nous*, o mente. El término fue instituido como dogma en el año 400 por el papa Gregorio, con respecto a la mezcla de agua y vino y la combinación de Padre, Hijo y Espíritu Santo en la Trinidad. El propio RöSSLer dice conservar un «optimismo ingenuo» acerca del proyecto de devolver la realidad a su condición prístina.¹⁹ Esto constituiría, si se piensa en ello, el proyecto demoníaco definitivo. RöSSLer quiere creer (con Einstein) que el azar primario e irreducible de la mecánica cuántica es demasiado pesimista. A pesar de más de dos milenios de trabajo (si bien esporádico) sobre el problema, la matemática de la mezcla infinita no aclara si la realidad, contemplada como un sistema dinámico determinista, puede «desmezclarse» al cabo de un tiempo infinito. Si esto es posible (y el trabajo de algunos colegas de RöSSLer sugiere que sí, al menos en un ordenador), tal vez por obra de un ser fuera del sistema dinámico (algo así como un programador de caos jugueteando con su programa), entonces quizá puedan restablecerse los gradientes originales. Si el universo que vemos tiene, sin que lo sepamos, un exterior, entonces podría tratarse de un sistema abierto. Y si es así, puede recuperarse el paraíso, o al menos la complejidad inicial del universo (la idea que tiene del cielo un teórico del caos).

Incluso si no creemos que el primordio pueda reconstituirse como un zumo de naranja, resulta evidente que lo que se suele contemplar como desecho entrópico puede revelar, si se lo mira con lupa, una organización o capacidad de trabajo. David Feinstein, discípulo del fallecido Richard Feynman, recuerda su estupefacción cuando, tras un aumento de fondos que le permitió comprar instrumentos más caros, pudo observar que, en realidad, lo que antes era entropía estaba organizado en gradientes susceptibles de proporcionar trabajo. Consultó a Feynman sobre este desconcertante asunto, que parecía inconsistente respecto a la interpretación física de la entropía como la pérdida absoluta de la capacidad de trabajo. Después de considerar la cuestión, Feynman le replicó que la mecánica cuántica dictaba un nivel de entropía absoluto, más allá del cual ninguna

instrumentación podía rescatar la entropía o restaurar su aleatoriedad (David Feinstein, comunicación personal, febrero de 2002). Aun así, la experiencia de Feinstein sugiere que a menudo la entropía no es más que ignorancia: puede recuperarse con una percepción más aguda, una inteligencia superior o mejores técnicas. Lo que parece inexorablemente perdido sigue estando ahí si sabemos verlo. El ejemplo físico más famoso de ello es un experimento en el que se agita una gota de tinta entre dos capas de glicerina. Se trata de una variante del flujo de Couette, y parece extender irremediamente la gota de tinta en una línea. Ahora bien, si invertimos el sentido de giro de la agitación, la tinta recupera su condición inicial de gota. Así pues, se diría que estamos inmersos en trazas de organización previa que una inteligencia superior, quizá nuestros propios descendientes, restaurarán algún día. Con la entropía podría ocurrir lo mismo que con el ámbito de lo muy pequeño, sobre el que Feynman vaticinó proféticamente en los años sesenta que no se nos escaparía eternamente, sino que se convertiría en el dominio de la futura nanotecnología. Hasta los límites permitidos por la mecánica cuántica (si no más allá, hasta llegar a toda la realidad), y con la condición de una inteligencia maxwelliana suficiente, la entropía irreversible (que por el momento se ha visto relegada al dominio de lo irrecuperable) podría ser revertida.

Los demonios externos al universo no son demonios: son dioses. Los demonios reales, ya sean microbios que discriminan entre granos de sílice, ya computadoras, no pueden percibir el sistema global del que forman parte. Además, dependen de fuentes de energía externas. En cuanto sistemas abiertos, su comportamiento complejo se alimenta de su entorno energético y es estimulado por éste.

Como se ha apuntado, buena parte de la era de la información tiene su origen en el demonio de Maxwell, por el modo en que el físico escocés (que ya había ligado la electricidad al magnetismo) conectó la información con la energía. En 1929, Leo Szilard convirtió el demonio de Maxwell en un ángel tras introducir en la cuestión el procesamiento de información. Szilard se dio cuenta de que el «demonio» sólo tenía que calcular en qué mitad de una cámara estaba una molécula de gas errante. Y la «percepción» de la situación de la molécula sólo requería una notación binaria (uno o cero, que indicaban izquierda o derecha respectivamente). El demonio mecánico podría no ser capaz de violar la segunda ley de la termodinámica. Si pudiese hacerlo, acumulando energía utilizable en un sistema aislado, semejante prodigio sería equivalente a una máquina de movimiento perpetuo. Quizá la idea de tal actor independiente,

que obtenía energía de la nada, fuera un reflejo de la noción occidental del individuo: un solitario autosuficiente, separado del resto del universo.

Pero el demonio mecánico podía hacer algo casi tan profundo como el movimiento perpetuo: demostrar una especie de inteligencia basada en el flujo de energía. Aunque decimos de ella que es «artificial», la inteligencia de los ordenadores es una extensión de la nuestra. Nuestros cerebros, nuestra tecnología y nuestra capacidad de extraer energía de la naturaleza son parte del «entorno» de los ordenadores, así como la biosfera y sus reservas de energía constituyen el entorno complejo y nada neutral en el que evolucionaron los cerebros humanos. Todo sistema abierto refleja no sólo su propia naturaleza, sino también la del entorno al que está conectado. En el caso de los ordenadores, dicho entorno incluye, en su historia, grandes cerebros como los de Szilard y Maxwell.

La inteligencia, ya sea en ordenadores inconscientes o en animales conscientes, tiene que ver con el procesamiento de datos en áreas de flujo de energía. Reducida a su esencia, es posible que la mente, más que basarse en el cerebro, sea posibilitada por éste. Es contextual. Mente y materia residen en un mismo dominio.

El propio Maxwell tuvo esta intuición. En un artículo que escribió en 1878 para la *Encyclopaedia Britannica*, abordó la relación entre información y energía:

«La energía disipada es energía que no podemos atrapar y dirigir a placer, tal como la energía de la confusa agitación de las moléculas que llamamos “calor”. Ahora bien, la “confusión”, como el término correlativo “orden”, no es una propiedad de las cosas materiales en sí mismas, sino sólo en relación con la mente que las percibe [...]. Sólo para un ser en la fase intermedia, que puede atrapar algunas formas de energía, mientras que otras eluden su captura, la energía parece estar pasando inevitablemente del estado disponible al estado disipado».²⁰

Maxwell afirma aquí que sólo el rompedor de gradientes puede reconocer, usando su percepción imperfecta, el gradiente que lo alimenta, en medio de la confusión de un mundo rico en energía y con una gradación fina. Así como el demonio imaginario crea gradientes sin nada más que su percepción, así también los duendes reales extraen la energía que necesitan del entorno a base de reconocer gradientes y actuar para acceder a ellos. Si se vuelven más perceptivos (por ejemplo, del dulzor, un gradiente de azúcar) o más inteligentes (y así parece que ocurre a lo largo del tiempo evolutivo), los organismos tendrán más gradientes a los que recurrir para alimentar su crecimiento.

A pesar de lo majestuoso de su integración de las probabilidades en la ciencia, adoptada luego por la mecánica cuántica, Boltzmann fue atacado desde el principio. La línea de ataque más básica que sufrió en vida fue su uso de los nunca-antes-vistos-ni-medidos «átomos» microscópicos. Recuérdese que Boltzmann presentó sus ideas al respecto unos cincuenta años antes de la detección de los átomos por científicos como Sir J.J. Thomson y Lord Rutherford. La oposición a Boltzmann, que incluía a la elite de la física europea de la época, tenía un poder formidable. Max Planck (autor de la versión de la ecuación de la entropía grabada en la lápida de Boltzmann), Ernst Zermelo, Ernst Mach y Friedrich Wilhelm Ostwald se mostraron implacables, no porque Boltzmann afirmara la irreversibilidad del tiempo, sino por haber tenido la osadía de sugerir que la materia estaba hecha de átomos. Este grupo llegaría a ser conocido como el Círculo de Viena, integrado por «positivistas lógicos» que insistían en que la única ciencia lícita era aquella cuyos objetos de estudio eran visibles y comprensibles. Su principal objeción a las tesis de Boltzmann era que no había manera de verificar la existencia de los átomos y moléculas en cuyo comportamiento se fundamentaba su visión probabilística.

Un estudiante alemán describió así el debate que se produjo entre Ostwald y Boltzmann en la Conferencia Científica de Lübeck de 1885: «La disputa entre Boltzmann y Ostwald era como la de un toro contra un cimbreante matador. Pero esta vez el toro venció al torero, a pesar de todo su arte y dominio de la esgrima. Los argumentos de Boltzmann se impusieron. Todos los matemáticos jóvenes estábamos del lado de Boltzmann».²¹

Los años de debate y disputas causaron una honda conmoción en la vida de Boltzmann, que parecía haberse quedado solo con sus teorías. Director del Instituto de Física de la Universidad de Viena desde 1894, en sus últimos años su salud se deterioró sobremanera. El asma, los problemas cardíacos, la depresión y las migrañas minaron su capacidad de trabajo. El hombre que había dedicado toda su vida a su obra teórica se vio sumido en una existencia dolorosa.

El 5 de septiembre de 1906, mientras descansaba en la costa adriática, Boltzmann tomó la decisión irreversible de suicidarse. Sólo un año antes, Einstein había publicado su trabajo sobre el movimiento browniano y la cinética térmica microscópica. El movimiento browniano puede observarse al microscopio como un incesante ajeteo de las partículas (de una micra o menos) suspendidas en el agua. Las partículas son zarandeadas por algo aún más pequeño que ellas: las moléculas de agua. Este

trabajo de Einstein proporcionó la «prueba» que exigían los críticos para aceptar la teoría cinética del calor: los átomos invisibles ya podían ser observados, inquietos y chocando con partículas mayores.

Por primera vez, los científicos podían seguir las leyes de la mecánica estadística en acción. Los átomos rebotaban aleatoriamente de acuerdo con la segunda ley, y su existencia resultaba ahora obvia incluso para los positivistas lógicos. Boltzmann fue vindicado. Su recurso a los métodos estadísticos pasó de cuestionable a brillante. La teoría de la probabilidad se introdujo en el núcleo de la ciencia, primero en termodinámica y luego en mecánica cuántica. La fe de Einstein en el determinismo, delatada por la inmortal frase «Dios no juega a los dados», que dirigió a su colega Max Born en una carta, parece ahora equivocada. Dios no sólo juega a los dados en el casino cósmico de la realidad material, sino que parece ser un jugador compulsivo. La biología evolutiva, la termodinámica y la mecánica cuántica integran el azar en sus visiones del mundo. Puede que esto refleje nuestra estupidez, nuestra incapacidad para encontrar la razón real que se esconde tras los fenómenos, o puede que el azar sea irreducible, real y primario más allá de nuestra comprensión. «Sólo dos cosas son infinitas», reza otra sentencia menos famosa de Einstein, «el universo y la estupidez humana; y no estoy seguro de la primera.»

Josiah Willard Gibbs

Josiah Willard Gibbs constituyó la contribución norteamericana a la termodinámica clásica. Hijo de un catedrático de literatura sagrada en Yale, se doctoró por la misma universidad en latín y filosofía natural. Tras graduarse, permaneció tres años en Europa, asistió a cursos de las principales instituciones científicas y decidió dedicarse a la termodinámica. Nombrado profesor de matemáticas en Yale, regresó a Estados Unidos, y raramente volvió a salir de su estado natal de Connecticut. Nunca se casó, y compartía casa con sus hermanas. Casi la totalidad de sus principales artículos los publicó en la revista local *Journal of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, donde en 1873 vio la luz su primer gran trabajo, «Graphical Methods in the Thermodynamics of Fluids». Poco antes de su muerte publicó la que quizá sea su obra más importante, *Elementary Principles in Statistical Mechanics: The Rational Field of Thermodynamics* (1902).

El punto de partida de Gibbs para analizar la termodinámica de un sistema era el estado de equilibrio. Después procedía a deshacer la energía del sistema, mostrando la relación entre energía libre (la energía con-

vertible en trabajo) y otras partidas de energía-entropía. Gibbs pulió el tratamiento matemático de agregados de partículas, inaugurado por Boltzmann y, de manera independiente, por Maxwell. Su examen de sistemas energéticos de toda clase, sobre todo reacciones químicas, amplió la termodinámica bastante más allá de los estudios del calor y el trabajo.

Hasta ahora hemos discutido sistemas termodinámicos aislados en el sentido de Boltzmann, es decir, sin flujos de materia ni energía a través de sus paredes. Todas las acciones tenían lugar en cajas negras o sus equivalentes, donde el número de partículas y la energía total del sistema eran constantes.

Gibbs extendió la termodinámica a los sistemas cerrados y abiertos que permitían el intercambio de energía entre el «sistema» y el mundo exterior. Su concepto de *energía libre* emancipaba el sistema estudiado de su entorno cerrado. La energía libre de un sistema termodinámico es la cantidad de trabajo útil que puede obtenerse de él. El sistema está en equilibrio cuando se minimiza la energía libre de Gibbs, se maximiza la entropía y cesa toda acción. La energía libre equivale a la energía total del sistema menos el producto de la temperatura por la entropía, y representa el balance entre la entropía y la energía del sistema. La ecuación es $G = H - TS$, donde G , la energía libre, es la energía emitida o absorbida en un proceso reversible a presión y temperatura constantes; H es una medida de la energía interna; T , la temperatura, y S , la entropía. En los sistemas químicos, los cambios en la energía libre de Gibbs pueden servir para predecir si una reacción se mantendrá fuera de equilibrio o tenderá espontáneamente a él.

Así pues, las termodinámicas microscópica y macroscópica habían sido pulidas lo suficiente como para admitir descripciones ajustadas de numerosos flujos de energía y transformaciones energéticas naturales. De hecho, para muchos científicos, la historia de la termodinámica llegó a su fin con Boltzmann y Gibbs. En las mentes de quienes así piensan, la termodinámica se reduce a descripciones de cajas negras rígidas y de aburridas tablas de presión de vapor. Pero lo cierto es que la termodinámica, que también se aplica a sistemas abiertos y en evolución, no había hecho más que comenzar su andadura.

En su obra clásica *Thermodynamics and the free energy of substances*, de 1923 (pág. vii), Gilbert Newton Lewis y Merle Randall comparaban los logros científicos de la termodinámica con una catedral medieval:

«Hay catedrales antiguas que, aparte de su propósito sagrado, inspiran solemnidad y reverencia. Hasta el visitante curioso habla de co-

sas serias, en voz baja, y el eco de cada susurro que reverbera a través de la nave abovedada parece acarrear un mensaje de misterio. La labor de generaciones de arquitectos y artesanos se ha olvidado, el andamiaje erigido para sus quehaceres se desmontó hace tiempo, sus errores se han borrado o han quedado enterrados por el polvo de los siglos. A la vista de la impresionante perfección de la obra completada, la atribuimos a una agencia sobrehumana. Pero a veces entramos en uno de tales edificios y constatamos que aún está parcialmente en proceso de construcción; entonces el sonido de los martillos, el tufo de tabaco, las bromas triviales que pasan de obrero a obrero, nos permiten darnos cuenta de que estas grandes estructuras no son más que el resultado de dotar al esfuerzo humano ordinario de una dirección y un propósito.

»La ciencia tiene sus propias catedrales, producto del esfuerzo de unos pocos arquitectos y muchos obreros. En los monumentos más elevados del pensamiento científico ha surgido la tradición de que los usos fáciles del habla coloquial dejen paso a cierta severidad y formalidad. Aunque a veces esto puede promover el pensamiento preciso, más a menudo se traduce en la intimidación del neófito. Por eso hemos procurado, a la hora de conducir al lector a través del edificio clásico de la termodinámica e introducirlo en los talleres donde la construcción sigue en curso, atemperar la acostumbrada severidad de la ciencia hasta donde sea compatible con la claridad de pensamiento». ²²

Demos un paseo por este edificio, fijándonos en las partes que se están construyendo, salas y vidrieras que creemos pertenecerán a la futura catedral de la termodinámica. Porque, a pesar de las aparentemente incommensurables direcciones de la evolución biológica y la aleatorización de la materia, Boltzmann se inspiró en la actuación de la selección natural darwiniana para cambiar la materia viva. En una alocución para una reunión formal de la Academia Imperial de Ciencias, en mayo de 1886, Boltzmann juzgaba así el progreso de la ciencia decimonónica:

«Si contemplamos el aparato de la ciencia experimental como un conjunto de herramientas para obtener beneficios prácticos, ciertamente no podemos negar su éxito. Se han logrado resultados no imaginados. Las fantasías que soñaban nuestros antepasados en sus cuentos de hadas se han visto superadas por las maravillas que la ciencia, conjuntamente con la tecnología, ha hecho realidad ante nuestros atónitos ojos. Al facilitar la circulación de hombres, cosas e ideas, la ciencia ha contribuido a elevar y difundir la civilización de una manera sólo

comparable en el pasado a la invención de la imprenta. ¿Y quién va a fijar un plazo para el avance del espíritu humano? La invención de una aeronave dirigible no es más que una cuestión de tiempo. Sin embargo, pienso que no son estos logros los que dejarán su sello en nuestro siglo: si me preguntan cuál es mi convicción más íntima acerca de cómo será recordado este siglo, si como el siglo del hierro, el vapor o la electricidad, responderé sin dudarle que será conocido como el siglo de la visión mecánica de la naturaleza, la visión de Darwin». ²³

Aunque para muchos la evolución darwiniana todavía parece contradecir la segunda ley, nada menos que un pensador como Boltzmann fue un firme creyente en ambas.

Tras Darwin y Boltzmann, la termodinámica necesitaba nuevas herramientas. Las críticas de Schrödinger exigían una respuesta. ¿Por qué tantos sistemas evolucionan hacia la complejidad y la organización incrementada? Lo virtualmente opuesto a la distribución aleatoria de energía y materia propuesta por Boltzmann y sus colegas parece darse por todas partes en el mundo real.

Los sistemas abiertos permiten el paso de flujos entrantes y salientes de energía y materia a través de sus límites. Son sistemas que, en lugar de alcanzar un equilibrio final predeterminado y desaparecer, aceleran el tránsito hacia el equilibrio de su *entorno*. Es cierto que los sistemas aislados están previsiblemente abocados a la ruina, pero tales sistemas son raros. Casi todos los sistemas reales, aparte de los estudiados en el período clásico de la termodinámica, son abiertos. Incluso los recipientes térmicamente aislados están sometidos a la acción de la gravedad, aunque hasta ahora sus efectos se hayan ignorado. Ni siquiera se sabe si el propio universo se comporta como un sistema cerrado o, más bien, como un sistema abierto. Y aunque estuviera completamente aislado, si el universo fuera infinito podría no comportarse como los sistemas finitos de la termodinámica clásica. Quizá pueda burlar la muerte térmica.

La termodinámica proporciona los fundamentos para la comprensión no sólo de la génesis química de la vida, sino también de su función presente, desde los ecosistemas amazónicos hasta la economía global. La vida no sólo no elude el imperativo termodinámico de la segunda ley, sino que es su manifestación más impresionante y sobrecogedora. La genética, como intuyó Schrödinger desde el principio, únicamente es una parte de la historia.

Este apasionante programa de investigación aún está en marcha. Veremos el polvo en el aire, las disputas sobre los diseños y herramientas requeridos para renovar la catedral de esta nueva termodinámica. Tal vez tengamos que ponernos el equivalente intelectual de un casco de construcción. Más allá del rechinar de los cinceles, del sudor y del esfuerzo, el marco de la nueva ciencia emerge para reemplazar su venerado fundamento, la catedral de la termodinámica clásica.

La naturaleza aborrece los gradientes

La simple nueva
de que la Naturaleza reveló
con delicada majestad
su mensaje es
confiada a manos que no puedo ver.

Emily Dickinson

Es probable que, en la actualidad, la mayoría de científicos y estudiantes de física e ingeniería crea que el apogeo de la termodinámica se vivió en el siglo XIX, con la obra de Carnot, Clausius, Boltzmann y Gibbs. Pero la termodinámica también tiene sus héroes del siglo XX. En 1908, la termodinámica dio un paso de gigante con la obra del matemático alemán Constantin Carathéodory, quien demostró que el «incremento de entropía» no es tanto el enunciado general de la segunda ley como su observación más fundamental: que todos los fenómenos naturales son irreversibles.

Los procesos irreversibles bloquean los estados previos. El pasado se hace inaccesible. Las puertas se cierran. Si pinchamos un globo inflado hasta cierta presión, el estado presurizado particular deja de ser accesible. Las torres del World Trade Center podrían reconstruirse, pero ya no serían las mismas. Hay un punto de no retorno.

A diferencia de las definiciones previas, la elegante demostración matemática de Carathéodory no depende de la naturaleza del sistema, ni de los conceptos de entropía o temperatura. Y aunque puede formularse poéticamente, el «enunciado de Carathéodory» (como se lo conoce) es matemáticamente formidable.¹

El matemático Don Mikulecky, profesor emérito de la Universidad de Virginia, ha mostrado que los experimentos de Joule pueden usarse para verificar la tesis de Carathéodory.² Recuérdese el experimento que James Prescott Joule concibió con un recipiente adiabático (aislado), en cuyo interior dispuso unas palas sumergidas en agua que se accionaban mediante el trabajo mecánico aportado desde fuera por una manivela sin rozamiento. La temperatura del recipiente aumentaba como consecuencia de la fricción que el movimiento de las palas generaba en el agua. Con un

termómetro de alta precisión, Joule fue capaz de medir el equivalente mecánico del calor. Este experimento es un ejemplo de la primera ley de la termodinámica, la relacionada con la conservación de la energía: existe una equivalencia entre el trabajo aplicado y la energía interna; la agitación conlleva un incremento de la temperatura. Sin embargo, como señala Mikulecky, la investigación de Joule ilustra algo más que la conservación de la energía. El principio termodinámico fundamental que ilustra este experimento es el de la irreversibilidad: podemos elevar la temperatura de un fluido a base de agitarlo, pero no hay manera de recuperar la energía mecánica invertida en la agitación a partir del calor generado.

Mikulecky se apoyó en la unidireccionalidad del experimento de las palas de Joule para elaborar una demostración matemática rigurosa de la interpretación de la segunda ley de Carathéodory. Convertir trabajo en calor es un camino sin retorno. Después, podemos olvidarnos de aprovechar el fluido calentado para hacer girar las palas y la manivela y recuperar así el trabajo invertido en el sistema. Las palas giratorias constituyen uno de los «estados» que, según Carathéodory, resultan inaccesibles a lo largo de cualquier «trayectoria adiabática reversible o irreversible». Son como nuestra niñez. Si las palas de Joule pudieran accionarse con el calor generado por ellas mismas, podríamos arrancar una hoja de un bloc de notas y trazar el esquema de una pequeña máquina de movimiento perpetuo.

Desde la óptica de Carathéodory, el experimento de Joule revela otro principio termodinámico de gran importancia: la diferencia entre la memoria cíclica de los sistemas complejos y el «olvido» de las condiciones iniciales por parte de los sistemas aislados. La conversión del movimiento de las palas en calor muestra la insulsez hacia la que tienden los sistemas de la termodinámica clásica. Al encaminarse hacia el equilibrio, desdibujan las trayectorias por las que han llegado hasta allí; es como si borrarán sus huellas. Por ejemplo, el mismo incremento de energía interna producido por las palas giratorias podría conseguirse metiendo el recipiente en un baño de agua tibia, una vez despojado de su estuche aislante. Esto muestra que la transferencia de calor es un proceso «independiente de la trayectoria».

Mikulecky señala que si, en ausencia de Joule, un colega decidiera quitar el estuche aislante y calentar el recipiente con un mechero Bunsen, cuando Joule regresara al laboratorio ni él ni ningún otro experimentador sería capaz de determinar la trayectoria seguida por el sistema para pasar de un estado más frío a otro más caliente. Ni un Sherlock Holmes termodinámico sería capaz de averiguar qué combinación de calor y trabajo se había empleado para causar el incremento de temperatura.

Hasta el trabajo de Carathéodory, las demostraciones de la segunda ley se basaban en experimentos mentales y físicos asociados a motores de Carnot perfectos, o en la mecánica estadística. Aunque rigurosas, su alcance era limitado. La generalización de Carathéodory se centra en la irreversibilidad de los procesos termodinámicos, más que en los incrementos de entropía en sí mismos. De esta manera, sorteando la dificultad de medir la entropía o la producción de entropía en situaciones de no equilibrio. Recuérdese que la entropía o la producción de entropía sólo pueden calcularse en sistemas que están en equilibrio o tienden a él. Esta capacidad de desprenderse de los grilletes que suponen las mediciones de la entropía nos proporciona una mayor claridad teórica para seguir explorando los sistemas termodinámicos.

Hemos estado considerando sistemas adiabáticos confinados en recipientes rígidos, aislados del resto del «universo». El trabajo realizado en estos sistemas puede modelarse mediante mecanismos ideales ficticios, que incluyen pistones, paredes deformables y motores conectados a un peso. Un proceso irreversible puede entenderse como una serie de ligaduras internas suprimidas una a una hasta que el sistema llega al equilibrio. Las ligaduras pueden ser mecánicas, como, por ejemplo, una serie de puertas que dividen el sistema en compartimentos. Imagínese una caja dividida en cuatro compartimentos con puertas que se abren y se cierran (figura 5.1). Uno de los compartimentos contiene 10.000 moléculas de un gas, mientras que en los otros tres se ha hecho el vacío. Lo que tenemos es un gradiente de presión bloqueado por las puertas, que representan las ligaduras. Si abrimos la primera puerta, el gas pasa al compartimento contiguo. Esta parte del sistema alcanzará un equilibrio local con unas 5000 moléculas por compartimento, sin ningún gradiente apreciable entre ambos. Repetimos el proceso abriendo las puertas restantes, de manera que las moléculas se repartan entre las cuatro secciones, a razón de unas 2500 moléculas por compartimento. Cada vez que se deshace una ligadura, esa parte del sistema se acerca al equilibrio. Una vez que el sistema entero se instala en el equilibrio, no podemos determinar el orden de apertura de las puertas. Si cambiamos las puertas por pistones, podría extraerse trabajo del sistema en su tránsito hacia el equilibrio. Este principio del olvido del pasado a medida que se produce trabajo a camino del equilibrio se aplica a una amplia variedad de sistemas termodinámicos, desde las reacciones químicas hasta una taza de té caliente que se va enfriando.

En 1965, George Hatsopoulos, un experto en termodinámica, y Joseph Henry Keenan, un ingeniero mecánico del MIT, propusieron formalmente un principio que subsumía las leyes cero, primera y segunda de

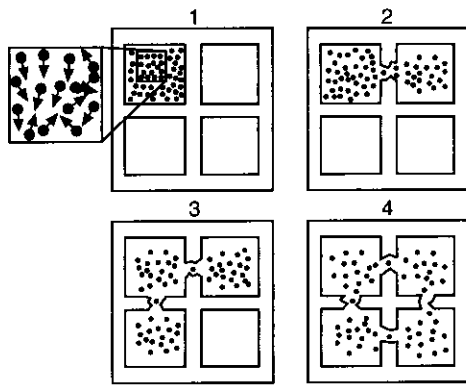


Figura 5.1. Un sistema de moléculas de un gas ideal que se encamina hacia el equilibrio en una serie de pasos.³ Una caja grande se divide en cuatro compartimentos aislados. Inicialmente todas las moléculas de gas están confinadas en una sección, mientras que en el resto se ha hecho el vacío. Hay un gradiente de presión entre el compartimento que contiene moléculas y los que no. Abrir las separaciones entre los compartimentos deshace los gradientes de presión, lo que se traduce en un reparto equitativo del gas entre las cuatro secciones. Esta configuración final de las moléculas de gas se encuentra en equilibrio. A partir del estado final de equilibrio es imposible inferir el orden de apertura de los compartimentos.

la termodinámica. Hatsopoulos y Keenan lo llamaron «ley del equilibrio estable»: «Cuando en un sistema aislado tiene lugar un proceso, tras la supresión de una serie de ligaduras internas, el sistema siempre alcanza un único estado de equilibrio. Este estado de equilibrio es independiente del orden en que se suprimen las ligaduras. El estado de equilibrio único se caracteriza por un valor máximo de la entropía».⁴ Un enunciado similar de irreversibilidad, el «principio unificado de la termodinámica», fue propuesto en 1966 por Joseph Kestin, de la Universidad Brown.⁵

A pesar de ser poco conocida, la unificación y simplificación de la segunda ley llevada a cabo por Hatsopoulos, Keenan y Kestin significó un paso notable. En efecto, proporciona un paraguas conceptual para el comportamiento de sistemas que se encuentran a cierta distancia del equilibrio y que, una vez suprimida alguna ligadura, llegan a un equilibrio local. Estos enunciados formales de la segunda ley incluyen la entropía sin mencionarla. Señalan una dirección y un estado final de equilibrio para todos los procesos. Por todo ello, constituyen la antesala de una termodinámica en la que la degradación espontánea de los gradientes resulta capital.

En ninguna parte se aprecia más claramente la obra de Hatsopoulos, Keenan y Kestin que en el principio de Le Châtelier:

«Todo sistema en equilibrio químico, bajo la influencia de un cambio en cualquiera de los factores de equilibrio, experimenta una transformación en un sentido tal que si dicha transformación tuviera lugar por sí sola, produciría un cambio en el sentido opuesto del factor en cuestión. Los factores de equilibrio son la temperatura, la presión y la fuerza electromotriz, correspondientes a las tres formas de energía: calor, electricidad y energía mecánica».⁶

El físico italiano Enrico Fermi, en sus lecciones de termodinámica de 1936,⁷ hizo notar que el efecto de un cambio en las condiciones externas sobre el equilibrio de una reacción química viene dado por el principio de Le Châtelier. Si se alteran las condiciones externas de un sistema termodinámico en equilibrio, dicho sistema tenderá a moverse en sentido opuesto a dicha alteración. En química, las reacciones «exotérmicas» son aquellas que producen calor. Por ejemplo, considérese una reacción química en que el reactante A reacciona con el reactante B para dar C y D, más algún calor. Podemos escribirlo en forma de ecuación química: $A + B \rightarrow C + D + \text{calor}$. Gibbs proporcionó la termodinámica para tales sistemas.

Fermi señaló que si una reacción química es exotérmica, un incremento de temperatura en el reactor desplazará el equilibrio químico hacia la izquierda de la ecuación. Puesto que la reacción (que en la notación química procede de izquierda a derecha) es exotérmica, el desplazamiento del equilibrio hacia la izquierda se traduce en una absorción de calor que contrarresta la elevación de temperatura. De forma similar, un cambio de presión (a temperatura constante) tiene como consecuencia un desplazamiento del equilibrio químico que tiende a contrarrestarlo. Este comportamiento termodinámico de las reacciones químicas, que vale tanto para sistemas cerrados como abiertos, fue descrito de manera independiente por Henri-Louis Le Châtelier, en Francia, y Karl Ferdinand Braun, en Alemania. Mientras que Kestin se refiere a él como «principio de represalia», Prigogine prefiere denominarlo «principio de moderación». Puede ser considerado como una versión de la segunda ley para sistemas abiertos.

Retrospectivamente, podemos ver que los principios anteriores reflejan la aversión de la naturaleza hacia los gradientes. Éstos pueden ser de presión, concentración química, temperatura o cualquier potencial relativo al trabajo. Si un gradiente externo aparta al sistema del equilibrio, éste cambia de estado para oponerse al gradiente aplicado. En general,

cuanto más se fuerza a un sistema a apartarse del equilibrio, más energía se requiere para mantenerlo en esa situación.

Entre las vías disponibles para contrarrestar los gradientes, se encuentra el desarrollo de estructuras y procesos altamente organizados. De manera un tanto paradójica, a base de organizarse internamente, los procesos complejos suprimen con más eficacia los gradientes de su entorno.

Don Mikulecky ha construido una red electrónica matemática, hecha de resistencias y condensadores, para modelar dos recipientes a distintas temperaturas, separados por una pared diatérmica que permite el paso de energía pero no de materia.⁸ Su objetivo era aplicar la termodinámica de redes para examinar la cuestión teórica de la reducción espontánea de gradientes en los sistemas aislados. Tras elaborar este modelo, Mikulecky dedica cinco páginas a ecuaciones y concluye:

*«Vemos aquí claramente cómo se traduce la segunda ley de la termodinámica en la reducción de gradientes con el paso del tiempo. Este sistema simple y su análisis reticular demuestran de manera inequívoca que la segunda ley de la termodinámica se traduce simplemente en una tendencia a la reducción de gradientes, que se manifiesta sólo cuando el sistema está aislado y se le permite llegar al equilibrio. En los estados estacionarios de no equilibrio, esta tendencia persiste en el flujo estacionario a través del sistema que resulta en la disipación continuada de energía».*⁹ (La cursiva es del original.)

Tras un fin de semana de discusión con Mikulecky, uno de nosotros, Eric D. Schneider, escribió un resumen sobre todo ello para un encuentro de la Sociedad Internacional de Ciencias de Sistemas. Titulada «La naturaleza aborrece los gradientes», hacía referencia a la elegante demostración de Mikulecky, la cual dejaba claro que la reducción de gradientes es una propiedad termodinámica tan fundamental como el cambio de entropía. En este sentido, reiteramos que el corolario de Hatsopoulos, Keenan y Kestin sortea el problema de definir la entropía sin conocer variables importantes que sólo pueden definirse en el equilibrio. Centrarse en la reducción de gradientes, y no sólo en la producción de entropía, permite un análisis más completo de estos sistemas.

A los estudiosos del caos determinista les gusta señalar que un pequeño cambio puede tener efectos desproporcionados (el aleteo de una mariposa puede acabar dando lugar a una violenta tormenta). Pues bien, los pequeños cambios también pueden tener efectos desproporcionados en el espacio conceptual. El mundo cambia cuando se contempla a través de la óptica de la reducción irreversible de gradientes, en lugar de cen-

trarse únicamente en los incrementos y decrementos de entropía. Un globo que explota iguala el gradiente de presión entre el interior y el exterior. Las células de Bénard, los vórtices de Taylor y los ciclos químicos son organizaciones promovidas por la degradación de gradientes. Nuestra segunda ley reformulada se presenta como una fuerza activa, no como un mero conjunto de ecuaciones que describen acciones de la naturaleza. Si se hierva agua en un bidón metálico de gasolina y se enrosca rápidamente el tapón tras dejar escapar el vapor, se creará un vacío. Para reducir el gradiente de presión, el gradiente resultante —esencialmente una anomalía probabilística consistente en una ausencia local, en el interior del bidón, de la mezcla de gases (en su mayor parte nitrógeno) que llamamos aire— propiciará, como si de una violenta e intencionada mano invisible se tratara, la compresión del metal. Un kilo por centímetro cuadrado aplasta el metal, y el gradiente de presión se reduce al mínimo. La segunda ley puede estrujar latas, accionar pistones e impulsar motores, así como propiciar ciclos elaborados dentro de membranas en sistemas que acabarían convirtiéndose en células replicantes.

En esta corriente, uno puede ver una pauta siempre cambiante de vórtices, ondulaciones, olas, salpicaduras, etcétera, que evidentemente no tienen existencia independiente como tales. Más bien se abstraen del movimiento fluyente, surgiendo y desvaneciéndose en el proceso total del flujo. Tal subsistencia transitoria, en la medida en que puedan poseerla estas formas abstraídas, implica tan sólo una relativa independencia o autonomía de comportamiento, no una existencia absolutamente independiente como sustancias últimas.

David Bohm

Hacia una ciencia de la destrucción creativa

A pesar de su agilidad y de su capacidad para tomar al toro del tiempo y el cambio por los cuernos, los matadores de la termodinámica clásica y la termodinámica estadística tuvieron que dejar paso a toreros aún más ambiciosos, cuya meta era una termodinámica generalizada que estudiase sistemas no confinados en límites artificiales. El crecimiento natural de tales sistemas, que se alimentan de la destrucción de gradientes, constituye el objeto de estudio de la ciencia naciente de la «destrucción creativa».* Puesto que esta ciencia de los sistemas abiertos, la TNE, todavía se encuentra en desarrollo, narrar su historia no resulta fácil. Aun así, en

* La locución «destrucción creativa», que Alan Greenspan, ex presidente de la Reserva Federal de Estados Unidos, tomó prestada para referirse a la nueva economía impulsada por Internet, se asocia con el economista austriaco de Harvard Joseph Alois Schumpeter, cuya obra (1939, 1942) resaltaba la capacidad del capitalismo para crear nuevos productos (como el automóvil de Henry Ford o el ordenador personal), aunque en ese proceso destruya las industrias no competitivas (la empresa Ford fue desbancada por General Motors, «destruida» a su vez por la competencia japonesa). Así pues, Greenspan rindió tributo a Schumpeter. Sin embargo, la idea aparece bastante antes, no ya en la filosofía hindú (en la forma de la totalmente destructiva Shiva) o en la obra de filósofos alemanes como Friedrich Nietzsche (cuyo *Así habló Zaratustra* sostiene que las viejas estructuras sociales deben destruirse para crear otras nuevas), sino también en la economía, en los trabajos de Werner Sombart. Nosotros empleamos la expresión en sentido termodinámico, pero ello incluye la economía, que examinamos en el capítulo 19. (*N. de los AA.*)

este capítulo proponemos un trazado a grandes rasgos para una historia futura, con hitos como las obras de Lotka, Onsager y Prigogine. Como los sistemas de los que se ocupa, cuya organización depende del flujo de energía, la TNE (y la termodinámica de la vida, subdisciplina de la que trata el presente libro) se encuentra en un estado fluyente. Bucearemos en este flujo, quizá prematuramente, con la intención de discernir, aunque sea de un modo borroso, rasgos clave de una disciplina que puede ser tan importante para el futuro de las ciencias de la vida como la biología molecular lo fue en su pasado.

Formado en química física, Alfred Lotka trabajaba para una compañía de seguros como analista estadístico, y en sus ratos libres estudiaba biología. Casi una generación antes que sus colegas, Lotka sugirió que la vida era un proceso disipativo metaestable. Con esto quería decir que, aunque estable y tomada por una «cosa», la vida era en realidad un proceso. La materia viva se encontraba en flujo continuo, apartada del equilibrio por la energía solar. Lotka subrayó que la vida en la Tierra era un sistema abierto. Se trataba de un fenómeno bioenergético y biofísico, y por tanto termodinámico.

No obstante, la termodinámica aún no había descrito esos sistemas abiertos y a veces inquietos, caracterizados por un flujo continuo a través de sus contornos. Lotka observó que los sistemas cercanos al equilibrio parecen estáticos, pero que en realidad se encuentran en un estado estacionario, «comiéndose» un gradiente. Un flujo de calor, electricidad, reactivos químicos o materia difusa podía crear un estado estacionario invariable (un proceso o un flujo, más que un objeto) y mantenerlo a cierta distancia del equilibrio. Lotka argumentó que la composición química de la superficie terrestre se encontraba en ese estado «metaestable»: su química se mantenía invariable no porque fuera la más probable, sino porque continuamente se añadían y sustraían nuevas partículas, que se reciclaban *in situ*, sin cambios que evidenciaran este trasiego, como alguien que pedalea en una bicicleta estática.

Un ejemplo simple de metaestabilidad podría ser una pelota de ping-pong suspendida sobre la columna de aire que despide una aspiradora. Esta demostración puede verse en el departamento de electrodomésticos de algunos grandes almacenes. La pelota se bambolea ligeramente, flotando sobre la corriente de aire ascendente emitida por el tubo de escape. La altura de la bola puede controlarse variando el flujo de aire que la sostiene. Cuando la aspiradora se apaga, la pelota cae al suelo, entre lavadoras y secadoras. Los organismos son similares: no caen hacia el equilibrio, ya que se produce un aporte continuo de energía a nivel celular.

El primer tratamiento teórico completo de los sistemas metaestables (o estacionarios) lo publicó en 1931 el profesor Lars Onsager, de la Universidad de Yale, que fue Premio Nobel en 1968. Onsager hizo cuatro observaciones importantes, todas en el dominio que él mismo contribuyó a descubrir.¹

La primera observación poseía un carácter «contraintuitivo»: en procesos cercanos al equilibrio tales como la difusión del calor, o «termodifusión», se produce una sorprendente generación de estructura. Las moléculas de gas se segregan en respuesta a un gradiente de calor: las rápidas se acumulan en el extremo caliente del recipiente, y las lentas en el frío. La termodinámica clásica indicaba que el calentamiento del sistema causarían un movimiento aleatorio de las moléculas. Sin embargo, basta la aplicación de un gradiente para establecer una distribución simple pero estructurada de las moléculas de gas.

La segunda observación de Onsager consiste en las «relaciones de reciprocidad». En la región cercana al equilibrio que lleva su nombre, fuerzas y flujos se acoplan. Por ejemplo, el flujo de agua de una tubería está directamente relacionado con la presión (la fuerza), mientras que la presión está linealmente relacionada con el flujo. Leyes bien conocidas de la química y la física concuerdan con las relaciones recíprocas de Onsager para los procesos cercanos al equilibrio. Por ejemplo, la ley de Fourier establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura; la ley de Fick describe la relación de proporcionalidad entre la difusión y el gradiente de concentración química; y la ley de Ohm cuantifica el acoplamiento entre corriente y resistencia. Todas ellas, versiones de las relaciones recíprocas de Onsager.

La tercera observación deriva de la segunda. Los sistemas de Onsager obedecen la ley de Kirchhoff, la cual enuncia que cualquier flujo material es análogo, en cuanto a volumen y masa, al flujo eléctrico de un circuito, y que los potenciales (en este caso, de concentración química) suman cero en un bucle conectado. La potencia se conserva.*

La cuarta constatación de Onsager fue que la metaestabilidad se consigue a cierta distancia del equilibrio. Un sistema abierto con gradientes moderados se instalará en un estado estacionario de mínima producción

* Durante la segunda guerra mundial, las teorías de Onsager fueron aplicadas a la puesta a punto de un método («difusión gaseosa») para la separación del uranio-235 y el uranio-238. Este paso fue esencial para la producción de bombas nucleares. (*N. de los AA.*)

de entropía. Este «permanecer vivo», este mantenimiento de un proceso en los confines de un gradiente, anticipa las actividades de la vida.

La termodinámica clásica describe procesos que tienden a la máxima entropía, al agotamiento. En el dominio de Onsager, en cambio, vemos sistemas que minimizan su producción de entropía. Los científicos suelen asignar a los sistemas cierta producción de entropía. Sin embargo, resulta más adecuado emplear como magnitud la producción de entropía específica, que no es más que la entropía producida por unidad de masa. A esto nos referiremos cuando hablemos de «producción de entropía». Otras medidas de entropía específica son la producción de entropía por unidad de volumen o flujo, o bien por unidad de superficie. El deseo de ofrecer generalizaciones ha llevado a algunos autores a sugerir que los sistemas alejados del equilibrio maximizan o minimizan la producción de entropía. Pero no es tan sencillo. Ningún sistema sujeto a un flujo continuo de energía y materia puede llegar al equilibrio. Como dicen Ilya Prigogine y su colaboradora Isabelle Stengers: «Cuando las condiciones de contorno impiden que el sistema llegue al equilibrio, éste hace lo mejor que puede hacer: se instala en un estado de mínima producción de entropía, esto es, un estado lo más cercano posible al equilibrio».²

Es cierto: en estos sistemas cercanos al equilibrio, a veces las fuerzas parecían débiles, como si se tratase de terneras criadas para la producción de carne. No obstante, el examen de los estados metaestables cercanos al equilibrio dejó claro que el becerro de una futura ciencia de la vida estaba comenzando a engordar. Poniéndose de pie sobre sus temblorosas patas, salía del enclaustramiento de la termodinámica clásica. Onsager y Prigogine habían introducido una nueva termodinámica de estados estables fuera del equilibrio. Ahora se tenían herramientas para el análisis de los flujos de materia y energía en sistemas abiertos simples. Pronto se aplicarían a la vida.

Las estructuras disipativas de Prigogine

Más allá de la región de Onsager cercana al equilibrio, se encuentran los sistemas «alejados del equilibrio», como los llamaron Ilya Prigogine y sus colaboradores Gregorie Nicolis y P. Glansdorff en la Universidad Libre de Bruselas. Estos sistemas captan y utilizan energía, y despliegan intrincados flujos materiales. Experimentan cambios de organización impredecibles, a veces súbitos; son, en una palabra, indomables.

Conocido principalmente por su trabajo sobre reacciones químicas cíclicas, Prigogine popularizó la noción de «estructura disipativa». Estos

«sistemas disipativos» (término introducido por Lotka) mantienen su estado estable de baja entropía a base de importar materia y energía a través de sus fronteras. Los sistemas disipativos son sistemas dinámicos de no equilibrio, abiertos y con gradientes internos. Degradan energía y exhiben ciclos materiales y energéticos. Las estructuras disipativas adquieren complejidad mediante la exportación —disipación— de entropía al entorno.³

Ilya Prigogine recibió el Premio Nobel de química por su trabajo sobre las reacciones químicas cíclicas y sus bifurcaciones en nuevos estados. Prigogine y sus colaboradores encontraron que, a medida que un sistema se aleja del equilibrio, pasa por transiciones súbitas (o bifurcaciones).⁴ Cuanto más se aleja el sistema del equilibrio, más bifurcaciones pueden producirse, hasta que el sistema se instala en un estado menos articulado, como la turbulencia aleatoria. En ocasiones, el sistema alcanza estados dinámicos macroscópicos estables (figura 6.1). Los procesos disipativos de Prigogine requieren 1.º Un sistema abierto capaz de intercambiar materia y energía con el mundo exterior y 2.º Una serie de relaciones reguladoras no lineales. La teoría de bifurcaciones de Prigogine indicaba que las perturbaciones pueden hacer que un sistema pase de un estado estable a otro.⁵

Prigogine falleció en mayo de 2003 en Bruselas, ciudad donde había ejercido toda su carrera.* Un obituario escrito por uno de sus discípulos decía lo siguiente:

«Sus clases resultaban fascinantes para los estudiantes, porque prefería dejar de lado los detalles tediosos e incluir paréntesis sobre arte, música y filosofía. Sus libros para el gran público, como *La nueva alianza*, escrito juntamente con Isabelle Stengers, *From Being to Becoming* y su última obra, *La fin des certitudes*, fueron éxitos de ventas en todo el mundo. Fue un auténtico humanista en el sentido más amplio de la palabra, y atrajo muchas disciplinas. Su muerte cierra un capítulo importante en la historia de la ciencia».⁶

* Prigogine y sus padres emigraron de Rusia a Bélgica. Hombre de baja estatura y aspecto querúbico, seducía por igual a líderes corporativos, reyes y reinas, y en su pequeño país era tratado como un miembro más de la realeza. Destacó por defender el papel de la ciencia en la toma de decisiones globales. En las reuniones científicas, solía asistir a prácticamente todas las ponencias; incluso se dejaba ver por sorpresa en los seminarios para estudiantes. Aunque para la mayoría de éstos era un honor que un Premio Nobel asistiera a sus exposiciones, debían estar preparados para verle saltar en medio del aula, gritando acaloradamente «¿Qué significa esto?», si el estudiante se había equivocado o no había dejado claro algún punto. (*N. de los AA.*)

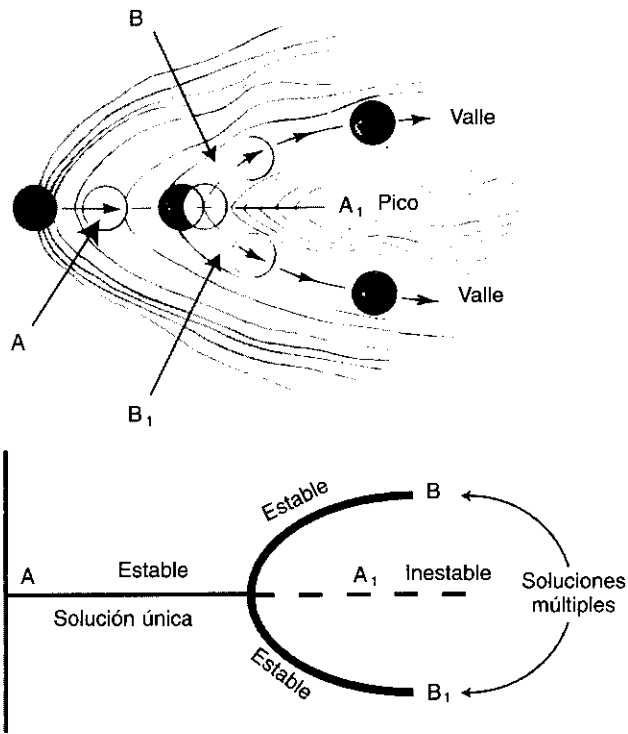


Figura 6.1. Los sistemas alejados del equilibrio pueden ser empujados hasta más allá de sus regiones de estabilidad. Estos sistemas se bifurcan a menudo en dos o más estados estables nuevos. El proceso de bifurcación puede visualizarse como una bola que rueda hasta el fondo de un valle (estado estable). Ante una singularidad, la bola puede «optar» por caer en uno u otro valle. Estas bifurcaciones pueden conducir a nuevos estados estables, fenomenológicos y matemáticos.

Ratoneras y dinamita

Los organismos obtienen energía y materiales del entorno, pero están separados de él por membranas, pieles, cortezas o caparazones. Son sistemas de no equilibrio, normalmente considerados como alejados del equilibrio, aunque a pequeña escala esto puede no ser cierto. El estado organizado de baja entropía en el interior de una estructura disipativa, viva o no, depende del incremento de entropía del sistema «global» en el que está inmersa. No se viola la segunda ley, pero su tendencia «descendente» puede «contenerse» si las estructuras canalizan la energía hacia el mantenimiento de ciclos químicos o bioquímicos.

El químico Frank L. Lambert, profesor emérito del Occidental College de Los Ángeles, afirma que la segunda ley explica lo mejor y lo peor de la vida. Para los organismos, el equilibrio representa la muerte, pero por el camino se crean todas las magníficas estructuras de la vida, la tecnología y la cultura. Como señala el propio Lambert, la cinética química (es decir, la dinámica química) es la contrapartida de la segunda ley, que «sujeta firmemente la flecha del tiempo en el arco tensado de la termodinámica desde milisegundos hasta milenios». ⁷ La cinética levanta obstáculos que, a todos los efectos, se comportan como máquinas naturales; aunque no manufacturadas, captan energía y realizan trabajo. Estas máquinas químicas, interpuestas entre la segunda ley y su «meta» natural del equilibrio, tienen la degradación continua como función general, si bien poseen otras funciones específicas. Por un lado, nuestra capacidad, como seres vivos creativos, de canalizar la energía hacia obras de teatro, ciudades, telescopios en órbita, etcétera, constituye nuestra mayor fuerza. Pero, por otro lado, la segunda ley no sólo es la «madre» de esos epigramas humorísticos conocidos colectivamente como «leyes de Murphy», sino también el implacable principio conducente al tipo de equilibrio termodinámico que nuestra evolución nos ha llevado a temer: la muerte y la descomposición.

Nos encontramos continuamente amenazados por una producción de entropía cuyo exceso destruiría nuestros delicados cuerpos. La energía de activación (E_a) —la cantidad de energía necesaria para que la segunda ley venza el obstáculo del enlace molecular en la mayoría de reacciones químicas— impide que nuestros cuerpos exploten en nubes de humo. Si esta página, por ejemplo, fuera a alcanzar su máximo de entropía, ardería espontáneamente. Pero tal cosa no ocurre sin la E_a de una cerilla. En la vida, la tendencia química, inherente a la segunda ley, del hidrógeno de los cuerpos a reaccionar con el oxígeno atmosférico no procede violentamente, como en el combustible de un cohete, sino que se canaliza a través del complejo sistema químico que conocemos como metabolismo. De esa manera, mediante intrincados bucles retroactivos autorreguladores, «ardemos» *lentamente*, metabolizando en vez de quemándonos. Sin embargo, estos sistemas químicos, como una noria que reconduce una corriente poderosa para impulsar un molino, pueden fallar. Es posible que no obtengan suficiente energía libre, o que sus procesos de síntesis sean defectuosos. La capacidad de la vida de canalizar la energía puede verse comprometida por la enfermedad y la disfunción, y ser destruida por la muerte. No obstante, la materia viva ha encontrado una manera de burlar la inevitable degradación entrópica de sus sistemas: la reproducción. Mediante la reproducción se producen nuevos cuerpos, nuevas máquinas

metabólicas naturales, que continúan el trabajo disipativo de sus progenitores.

La segunda ley nos la dio, la segunda ley nos la quitó.

Los fuegos químicos orquestados son los motores de los sistemas vivos, y la segunda ley, su combustible. Lambert cita a Alfred Nobel, fundador de los premios que llevan su nombre. Nobel quiso inventar explosivos más seguros después de que su hermano y cuatro trabajadores murieran en la fábrica de nitroglicerina de la familia. El químico e ingeniero sueco acabaría haciendo fortuna con la dinamita, nitroglicerina oleosa mezclada con sílice y moldeada en forma de barras. A diferencia de la fórmula inicial, el explosivo así empaquetado no estallaba al caer al suelo. Era menos peligroso porque tenía una mayor E_a . Había que encenderlo. La cinética química retrasa la ejecución de la segunda ley. Actúa como un invento del tebeo, o como el juego infantil de la ratonera, consistente en una serie de dispositivos de plástico tal que una entrada inicial de energía se canaliza de manera intrincada, convirtiendo energía potencial en cinética. Por ejemplo, la pulsación de una tecla puede hacer bajar una palanca, que a su vez libera una canica que abre el pestillo de una portezuela, a través de la cual cae un peso que aterriza en el disparador de una ratonera. Las disposiciones intrincadas de fichas de dominó que caen de manera secuencial constituyen un ejercicio parecido. Estos rodeos, cuando se tornan cíclicos, resultan fundamentales para el funcionamiento de los sistemas complejos, incluidos los de la vida.

Sistemas «alterorganizados»

Los sistemas organizados no vivos, como los tornados y los láseres, así como los sistemas vivos, desde las células hasta los ecosistemas, obedecen las reglas de la termodinámica no lineal. Aunque el término «autoorganización» sale a relucir con frecuencia, no deja de ser un tanto incorrecto, como advierte el físico Jorge Wagensberg, director del Museo de la Ciencia de Barcelona. La mayoría de sistemas «autoorganizados» requieren alguna fuente externa de energía libre para mantener su organización: en realidad, son organizados por los gradientes que reducen. De ahí que sea más adecuado describirlos no como sistemas autoorganizados, sino como sistemas organizados por gradientes con atributos autorreferenciales. Esto vale también para simulaciones por ordenador como el Juego de la Vida y los autómatas celulares, que dependen de un gradiente eléctrico creado por una fuente de energía externa para ejecutar sus intrincados ciclos.

Como pago por su entropía reducida, los sistemas alejados del equilibrio exportan un incremento concomitante de entropía al entorno que los rodea. Un ejemplo bien familiar, aunque problemático, de este necesario desorden medioambiental es la polución. Todos los organismos, no sólo la humanidad tecnológica, producen desechos. La entropía no es más evitable que la muerte, que es lo que ocurre cuando un sistema termodinámico no lineal fuera de equilibrio pierde la capacidad de canalizar la energía externa y es arrastrado al equilibrio con ella. Un cuerpo vivo y un cadáver fresco difieren en que, en el segundo, un proceso termodinámico no lineal específico se ha detenido. Intentemos permanecer totalmente quietos. No podemos. Y en la mayoría de ocasiones, cuando un organismo finalmente se queda estático —cuando muere—, otros organismos que procesan energía activamente enseguida le hincan el diente. Una jungla bien desarrollada conserva su materia. Cuando un insecto muerto o una hoja caen al suelo de un ecosistema maduro como la selva amazónica, sus moléculas se reciclan y pasan a formar parte de nuevos organismos. En la naturaleza no hay contenedores de reciclaje: todo se utiliza y reutiliza de manera elegante, porque los organismos, pese a ser irracionales, han evolucionado para hacer uso de materiales relativamente limitados en un entorno con una energía disponible relativamente ilimitada. El único desecho que los organismos no pueden reciclar es el calor, el estado final de las transformaciones energéticas. Incluso los microorganismos más primitivos tienen mucho que enseñarnos en cuanto a reciclaje. Bacterias y hongos descomponen moléculas complejas en sus partes constituyentes, produciendo entropía en forma de calor, devolviendo cuerpos antes vivos al equilibrio relativo y la estasis, disgregando y diseminando, deshaciendo identidades en nuevas formas que pueden reincorporarse al ecosistema vibrante. «La energía fluye; la materia se recicla», en palabras de Harold Morowitz.⁸

Para visualizar el proceso termodinámico de un ser vivo, considérese un paramecio. Vayamos a un estanque, tomemos un poco de agua y observemos al microscopio los microbios que contiene. Vemos paramecios y otros ciliados, así como seres más pequeños, como espiroquetas y otras bacterias, además de rotíferos y algas. Lo primero que advertimos es que el cuerpo del paramecio está separado del medio líquido por una clara membrana. En su interior hay tres núcleos (uno grande y dos pequeños) rodeados de mitocondrias y otras partes celulares diferenciadas, llamadas orgánulos. El metabolismo, la locomoción y la reproducción organizan dentro del paramecio una estructura cuyo funcionamiento continuado mantiene el cuerpo celular a cierta distancia del equilibrio, a través del consumo de la energía obtenida del alimento. El paramecio busca activa-

mente bacterias y las engulle, además de absorber oxígeno. Ingresa ciertas cosas y se desprende de otras, manteniendo así los ciclos cinéticos que previenen la muerte y la disolución. El paramecio se diferencia de su entorno en que es más complejo y más activo, precisamente porque es un centro de degradación de energía dentro de dicho entorno.

Buena parte de la producción de entropía específica de un organismo es en forma de calor y alimento degradado. Si un microbio no come o no puede obtener alimento, pronto se marchitará. Para mantener una biomasa estable, debe ingerir alimento rico en energía y de baja entropía, en cantidad suficiente como para reponer el material desechable de baja energía y alta entropía producido por su actividad metabólica. Como ocurre con la muerte y los impuestos, la reducción de gradientes es ineludible.

Ondas de choque

Al contemplar las nuevas estructuras añadidas a la catedral termodinámica en construcción, nuestra visión del universo se torna más abarcadora. Los sistemas vivos son procesos metaestables que mantienen su identidad. Todos comparten la construcción anabólica de sus cuerpos y la disipación catabólica de energía mediante flujos de materiales nutritivos que entran y salen de sus fronteras. Ahora bien, ¿está la vida muy alejada del equilibrio termodinámico? Y si es así, ¿a qué distancia se encuentran los organismos del equilibrio? ¿Y qué significa esta frase? De hecho, el apelativo «alejado-del-equilibrio» quizá sea más aplicable a los motores que petardean que a las formas de vida.

Los sistemas alejados del equilibrio (una lejanía que, en realidad, nunca fue definida con precisión por Prigogine y la escuela de Bruselas) parecen surgir cuando existe un ciclo energético y material suficiente pero no excesivo. Comoquiera que los llamemos, lo que sí sabemos es que estos sistemas pueden manifestar comportamientos marcadamente no lineales y mantener estructuras estables más allá del ámbito de las relaciones recíprocas de Onsager. Además, a pesar de que no existe una definición para el dominio «lejos-del-equilibrio», tradicionalmente se ha considerado que es el posterior a la primera bifurcación. Con todo, Eugene Yates, físico y médico de la Escuela de Medicina de UCLA, ha señalado que, técnicamente, las ondas de choque están lejos del equilibrio: «Hasta en el cilindro de un automóvil, el pistón y las reacciones químicas que impulsan al vehículo por la carretera proceden SIN SALTOS, y son descriptibles mediante modelos con coeficientes termodinámicos

estándar. Es el petardeo lo que intentan evitar los ingenieros. El petardeo sí que está lejos del equilibrio».*

De forma similar, el científico inglés Arthur Peacocke argumenta que la termodinámica de equilibrio local vale incluso para sistemas que a escala microscópica revelan comportamientos alejados del equilibrio (incluyendo todos los procesos biológicos que ocurren en un medio líquido), pero no para sistemas densos, gases muy enrarecidos u ondas de choque.⁹ La propia vida parece ser un fenómeno alejado del equilibrio. Seguramente se trata de una colección improbable de estructuras y procesos. Pero cuando observamos las reacciones químicas constituyentes, la vida no parece tan extraña: existen reacciones menores que no requieren elevadas energías de activación. En la química de la vida no hay ondas de choque ni «petardeos». La vida incluye muchas reacciones en el dominio de Onsager, por lo que quizá no se encuentre tan «lejos» del equilibrio como se ha sugerido. Ni siquiera las reacciones intracelulares de alta energía implican grandes «chispazos». No están alejadas del equilibrio. Por el contrario, las ondas de choque y las explosiones sí están lejos del equilibrio a escala microscópica. Yates y Peacocke sostienen que toda la biología reside en la región termodinámica cercana al equilibrio.** Con todo, esta conclusión no invalida la obra de Prigogine y su equipo, ya que la delimitación de la frontera entre la cercanía y la lejanía del equilibrio es menos importante que el concepto de estabilidad en tales sistemas, del

* Yates (en una carta que nos dirigió en 1998) continúa así: «En 1905, Einstein, como todos recordamos, en un artículo de una página, “desempaquetó” D , la difusión, echando mano del término de Stokes para las pérdidas por fricción mediante un término f , correspondiente al movimiento de una partícula esférica de radio r a través de un medio de viscosidad v , de manera que $f = 6\pi r v$. Con argumentos inteligentes, posteriormente Einstein dotó a D de dimensionalidad y sentido físico como $D = RT/(6\pi r v) = RT/f$. Nótese que el tiempo no aparece en la fórmula de D , donde R es la constante de los gases y T es la temperatura. Siempre que un sistema difusional tenga una relación fuerza-flujo proporcional a una constante (como D), con independencia de otras consideraciones, ese sistema está cerca del equilibrio termodinámico y son válidas las relaciones recíprocas de Onsager. Y aunque a escala macroscópica no hay equilibrio, a todos los efectos hay reversibilidad microscópica. (Prigogine está intentando encontrar irreversibilidad microscópica en tales casos, pero él y su equipo están solos en esta búsqueda.) Pero siempre que $D = g(T, r, v, t)$, donde t es el tiempo, tenemos una condición de lejanía del equilibrio termodinámico, y la (casi) reversibilidad microscópica no se mantiene. Habrá sacudidas y golpes». (N. de los AA.)

** En la actualidad, Arthur Peacocke es una de las autoridades sobre vida y termodinámica. Sacerdote anglicano de sonrisa tímida y experto mundial sobre ciencia y cristianismo, su libro *The Physical Chemistry of Biological Processes* es un tratado aún no superado sobre los procesos biológicos en relación con la termodinámica. El ensayo, altamente técnico, abarca temas como los sistemas disipativos en biología, los modelos de autoorganización cinética y la evolución de la complejidad biológica. A Peacocke se lo conoce sobre todo por su respetado trabajo filosófico acerca de la reconciliación entre ciencia y religión (1986). (N. de los AA.)

que han sido pioneros. Por su parte, Lambert distingue entre metaestabilidad como cercanía al equilibrio (por ejemplo, la pelota de ping-pong suspendida sobre un chorro de aire) y metaestabilidad como pauta (por ejemplo, el sistema interconectado de relaciones que constituye un organismo). Nosotros argumentaríamos que el organismo puede ser metaestable en ambos sentidos. Cualquier reacción individual sólo está ligeramente apartada del equilibrio a causa de la energía libre extraída del alimento o la fotosíntesis. Sin embargo, como sistema complejo de ciclos interconectados, como forma material específica, el organismo está lejos del equilibrio. Somos inventos nanotecnológicos del tebeo, y nuestros pasos físicos interconectados se reproducen unos a otros en cada generación, aunque se añadan otros nuevos. Así como un brochazo individual de un Monet o un Cézanne puede parecer bastante ordinario, así también nuestras reacciones químicas a nivel subcelular no resultan tan peculiares. Pero juntas constituyen una obra maestra, un tapiz schrödingeriano.

Unas palabras sobre nanotecnología

Éste puede ser un buen momento para realizar una breve digresión sobre nanotecnología, la ciencia que se ocupa del diseño de máquinas moleculares o atómicas. Estas máquinas se han convertido en un tema candente tanto en la ciencia real como en la ciencia ficción (los escritores de este género han imaginado, por ejemplo, enjambres de nano-abejas y robots intravenosos para el diagnóstico de enfermedades), e incluso en la bolsa. Los promotores de la nanotecnología auguran grandes avances en ciencia de materiales (como blindajes ligeros o filtros de cigarrillo inteligentes), en medicina (como marcapasos y otras prótesis apenas visibles por IRM) y, a más largo plazo, en computación y síntesis de estructuras químicas átomo por átomo. En última instancia, máquinas diminutas dotadas de herramientas de captación de hidrógeno podrían construir cualquier estructura imaginable conforme a un diseño atómico especificado.

Superficialmente, podría parecer que existen argumentos termodinámicos que demuestran la imposibilidad de construir tales máquinas. Los detractores de la nanotecnología han aducido que el ruido térmico, esencialmente el movimiento browniano aleatorio de átomos y moléculas a cualquier temperatura por encima del cero absoluto, imposibilitaría en principio el diseño de máquinas moleculares precisas. Pero, como señala el teórico de la nanotecnología Ralph C. Merkle,¹⁰ este argumento puede contestarse sobre la base de una ecuación fundamental, propuesta por Drexler,¹¹ que relaciona el ruido térmico con

«la incertidumbre posicional s , la constante de Boltzmann k , la temperatura absoluta T y la rigidez ks (normalmente, en newtons/metro) [...]. La inspección de esta ecuación indica que el ruido térmico puede controlarse de dos maneras: bajando la temperatura T o incrementando la rigidez ks . La evaluación numérica de esta ecuación revela que se puede conseguir una incertidumbre posicional de menos de un diámetro atómico a temperatura ambiente si se presta la atención debida a la rigidez del diseño. Dicho de otro modo, pese al ruido térmico a temperatura ambiente, es factible construir brazos robóticos muy pequeños (~100 nanómetros) capaces de posicionar con precisión herramientas moleculares altamente reactivas».¹²

Tal como expuso, en lo que a veces ha dado en llamarse «la primera ley de Clarke», el agudo escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke (autor de *2001, una odisea espacial*, entre otras obras, y uno de los primeros, si no el primero, en entrever los satélites de comunicación): «Cuando un científico distinguido pero anciano declara que algo es posible, es casi seguro que tiene razón. Cuando declara que algo es imposible, muy probablemente se equivoca».*

Una refutación mucho más directa y general de la pretendida imposibilidad termodinámica de la nanotecnología es la propia existencia de organismos, los cuales, como ya se ha sugerido, son comparables a las mismas máquinas que algunos consideran inviables. Los organismos ejemplifican principios de ensamblaje molecular, como la replicación a temperatura ambiente y la computación basada en el carbono, prematuramente descartados sobre la base de la termodinámica. Otra objeción contra la factibilidad de las máquinas moleculares, ésta procedente de la mecánica cuántica, también es puesto en entredicho por la existencia real del nanoensamblaje celular y corporal (y por el hecho de que el inicio formal de la nanotecnología suele atribuirse a Richard Feynman,¹³ reconocido a su vez como una de las figuras más sobresalientes de la mecánica cuántica). Lejos de ser inconciliable con la termodinámica, la factibilidad de la nanotecnología se sigue de la consideración de la vida como un fenómeno natural. Si la vida, con toda su sutileza, gloria y potencia de cálculo natural, se compone de hidrógeno, azufre, oxígeno, carbono y otros átomos comunes en el universo, entonces puede conseguirse que

* No confundir con el corolario de Asimov: «Cuando el público profano suscribe una idea puesta en tela de juicio por científicos distinguidos pero ancianos, y la apoya con gran fervor y emoción, es que los científicos distinguidos pero ancianos están en lo cierto, después de todo». Ambas citas proceden del portal de la Canadian Society for Biomechanics (*N. de los AA.*)

esos mismos átomos, desde la dirección humana, realicen al menos una fracción de las operaciones nanotecnológicas que ya ejecutan de manera natural, dentro de los sistemas termodinámicos evolucionados que llamamos células.

La termodinámica no es sólo una buena idea: es la ley

El microbiólogo Kenneth Nealson —con quien volveremos a encontrarnos a propósito de la necesidad de aplicar criterios termodinámicos a la búsqueda de vida extraterrestre— tiene un interesante cuadro que suele proyectar en clase. Lleva por título «La termodinámica no es sólo una buena idea: es la ley». Bajo el título hay una larga lista de reacciones químicas empleadas por las bacterias para extraer energía de gradientes químicos naturales. Las leyes de la termodinámica no son ni triviales ni nuevas. Y la más crucial para comprender la complejidad es, sin lugar a dudas, la segunda ley. En la más rotunda defensa de la potencia y la certeza de la segunda ley, el astrónomo británico Sir Arthur Eddington escribía:

«Si alguien nos dice que nuestra teoría del universo favorita está en desacuerdo con las ecuaciones de Maxwell, entonces tanto peor para las ecuaciones de Maxwell. Si es contradicha por la observación, bueno, esos experimentadores a veces cometen errores. Pero si resulta que nuestra teoría se opone a la segunda ley de la termodinámica, entonces no hay nada que hacer, salvo hundirse en la más profunda humillación».¹⁴

Las leyes de la termodinámica fueron difíciles de obtener. La segunda ley fue, de hecho, la primera en comprenderse, por obra de Carnot, quien vio la necesidad de una diferencia de temperatura para que los motores funcionaran, y reconoció la pérdida irremediable inherente a todos los procesos energéticos macroscópicos reales del universo. El calor pasa al frío, no al revés. La primera ley, la segunda en enunciarse formalmente, fue presentada por Rudolf Clausius y Lord Kelvin como la ley de conservación de la energía. La tercera ley, por su parte, se derivó de los experimentos de Lavoisier y Joseph-Louis Gay-Lussac sobre las relaciones entre presión, temperatura y volumen en los gases. Estos autores demostraron que la presión de un volumen fijo de cualquier gas aumentaba o disminuía $1/273$ del valor inicial por cada grado Celsius. Si se parte de un gas a 0 °C como punto de referencia y se enfría a -273 °C o 0 K , la presión se anula y se supone que cesa todo movimiento molecular. Más

adelante, en 1906 y 1911 respectivamente, los físicos alemanes Walther Nernst y Max Planck relacionaron esta idea con la entropía termodinámica. En el cero absoluto la entropía del sistema es nula. La ley «cero» de la termodinámica, enunciada formalmente en 1931, tiene que ver con dos conceptos medulares: equilibrio y temperatura. Cuando un sistema termodinámico situado en el interior de un recipiente cerrado de paredes rígidas y adiabáticas llega a un punto en el que ya no hay cambio, el sistema ha alcanzado un estado de equilibrio térmico. La ley cero informa todas las leyes de la termodinámica y proporciona un importante sostén para una termodinámica basada en gradientes. Otro principio importante para la termodinámica del no equilibrio que algunos elevan a la categoría de cuarta ley, aunque quizá sería más adecuado interpretarlo como una consecuencia lógica de las leyes primera y segunda es que en las regiones de flujo de energía la materia describe ciclos. Tales ciclos, visibles en las estructuras complejas naturales, incluidas las vivas, se producen cuando unos recursos materiales limitados se apresuran a proporcionar un vehículo para la exportación de entropía. En el Apéndice hemos sintetizado los principios generales de la termodinámica de sistemas abiertos. Esa parte, aunque relegada al final del libro, merecería un estudio detenido por parte de aquellos realmente interesados en el tema. Muchos de estos principios se aplican a los sistemas vivos.

La búsqueda de Kauffman

El biólogo teórico Stuart Kauffman sugiere que la aparentemente incesante adopción de nuevas configuraciones químicas por parte de la vida justifica la promulgación de una cuarta ley de la termodinámica. Kauffman, miembro del Santa Fe Complexity Institute, argumenta en su obra *Investigaciones* que la biosfera, incluida la humanidad tecnológica adjunta, despliega un comportamiento nomotético de complejidad creciente no reconocido por la vetusta segunda ley.¹⁵ La idea abstracta de que, a base de expandirse y evolucionar, la vida explora todo un espacio de posibilidades conforme a una ley todavía no descubierta, la cual podría regir el universo entero (y que Kauffman está más cerca que nadie de descubrir), constituye la presunción directriz de las *Investigaciones*. El espacio de posibilidades abstracto explorado por la vida, que Kauffman llama «lo adyacente posible», es recorrido por una vasta panoplia de combinaciones químicas y funcionales.

El problema, aquí, es que la segunda ley no es sinónimo de movimiento inexorable hacia la muerte térmica o el equilibrio. Es contenida

por la cinética, y ésta crea magníficas estructuras cíclicas y elegantes máquinas naturales que cambian, sí, pero también se repiten (en sus vías metabólicas, por ejemplo). Recordemos que la segunda ley se formuló bajo condiciones artificiales de clausura. Su enunciado general debe aplicarse a los sistemas abiertos, predominantes en el universo. No hay necesidad de promulgar una cuarta ley cuando se puede ampliar la segunda.

Nos congratulamos de que Kauffman haya vuelto la vista a la termodinámica para una nueva comprensión de la naturaleza física de los organismos y las biosferas. Sin embargo, Kauffman y otros parecen haber pasado por alto la rica herencia científica que nos ha legado la termodinámica de la vida, y que nosotros estamos intentando exponer aquí. De hecho, su anterior búsqueda (en *Origins of Order*) de pautas matemáticas para explicar la complejidad evolutiva le llevó a acuñar la expresión «orden gratuito» (lo cual significa «no sujeto a la selección natural»),¹⁶ que es doblemente problemática: primero, porque sugiere que la complejidad organísmica es ante todo una cuestión de orden, más que de organización funcional derivada de un flujo de energía; y, segundo, y más importante, porque implica equivocadamente que la complejidad organísmica no tiene, en todo tiempo y lugar, un precio «pagado» por la riqueza de gradientes preexistentes.

La explicación algebraica booleana de Kauffman sobre la manera en que los genes reguladores pueden reducir un número enorme de posibilidades a otro manejable («orden gratuito») concuerda superficialmente con el número real de genes reguladores humanos y el número relacionado de tipos celulares. (Aunque las células de un embrión tienen los mismos genes, su desarrollo se regula para dar lugar a distintos tipos; las células hepáticas, las dérmicas y las nerviosas son ejemplos de tipos celulares animales.) Aquí al menos, las matemáticas de las ciencias de la complejidad parecen explicar un proceso biológico real. Sin embargo, el incremento de tipos celulares (uno de los diversos tipos de incremento evolutivo de la complejidad) también puede tener una base energética. Hace 570 millones de años, el número más alto de tipos celulares distinguibles en un animal era 2; hace 500 millones de años ya había aumentado a 75; hace 400 millones de años, a 125; y en el presente, sólo en la especie humana (si bien la concentración médica en nosotros mismos puede haber inflado la cifra), asciende a 220. Puesto que los tipos celulares reflejan la diferenciación fisiológica de tejidos dedicados a distintas tareas, este fenómeno se asemeja a la clase de complicación típica de los sistemas que adoptan más vías energéticas a medida que la reducción de gradientes lleva a nuevas rutas estables. De nuevo, la directriz fundamental puede ser la termodinámica, que se refleja en la diferenciación ce-

lular mediante la activación y desactivación de genes. Así ocurre en el aumento y la fijación de los tipos celulares durante el desarrollo animal, y en la producción de entropía específica en el curso de la sucesión ecológica (véase el capítulo 13). No pretendemos haber desentrañado todos los mecanismos relevantes, pero creemos probable que las descripciones matemáticas de las tendencias ecológicas y evolutivas reflejen incrementos de los flujos cíclicos de energía y materia en sistemas termodinámicos en crecimiento. Insistimos, no hay necesidad de una cuarta ley cuando basta con reformular la segunda ley para hacerla extensiva a los sistemas abiertos.

La sugerencia de Yates y Peacocke de que muchos de los sistemas etiquetados como «alejados del equilibrio» en realidad no estarían más allá del dominio de Onsager no debería ensombrecer nuestro deleite al identificar semejanzas entre las estructuras disipativas de la naturaleza. Los sistemas individualizados (entre los cuales se encontrarían los ciclos químicos confinados en bolsas membranosas que precedieron a las primeras formas de vida) importan, disipan y degradan energía a medida que emergen de su entorno y mantienen su estructura, expandiéndola con su crecimiento y, cuando hay reproducción, copiándola. La química de nuestros cuerpos obedece todas las leyes de la termodinámica; 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.

La vida no es una condenada cosa tras otra.
Es la misma condenada cosa una y otra vez.

Edna St. Vincent Millay

La «cuarta ley» de Morowitz

El profesor Bill Early, del departamento de química del Jesuit College de la Universidad de Georgetown, cuenta una anécdota que le sucedió cuando volvía de una clase de química sobre la reacción de Belousov-Zhabotinsky. Dos sacerdotes jesuitas subieron con él en el ascensor; mientras miraban el tubo de ensayo que Early sostenía en su mano, el líquido cambió de color llamativamente, y luego volvió a cambiar.

—¿Está viva esa cosa? —quiso saber uno de los sacerdotes.

Hubo un silencio mientras Early reflexionaba.

—Es como usted, padre —respondió Early al fin—: metaboliza pero no se reproduce.

Cuando fue encontrada, en 1799, no era más que una roca. Pero el bloque de basalto negro portaba inscripciones de tres clases: jeroglíficos, caracteres demóticos y griego. Se la conoció como la piedra Rosetta, y permitió descifrar la escritura jeroglífica egipcia. Los ciclos, que no dejan trazas de historia grabadas en piedra, sino en las células, quizá sean la piedra Rosetta de la nueva termodinámica. Se encuentran ciclos en la pauta eólica de huracanes y tornados, en los remolinos y en reacciones químicas no biológicas. En los sistemas abiertos, los ciclos están presumiblemente detrás del crecimiento, la complejidad, el cambio y, en última instancia, la evolución por reproducción diferencial de variantes.

En 1910, Alfred Lotka se convirtió en el primer científico que analizaba detenidamente la autoperpetuación que opera en un ciclo natural. Este análisis constituye el origen de las redes ahora descritas en los sistemas físicos, químicos, biológicos, sociales y tecnológicos. En tales redes, elementos dispares se conectan en un sistema cíclico. Lotka llamó

«autocatálisis» al proceso de formación de redes. Por ejemplo, el producto de una reacción química promueve su propia producción. Lotka concibió una serie de ecuaciones autocatalíticas en las que el producto de una reacción era el reactante de otra. Tras observar que estas ecuaciones eran cíclicas, las empleó para resolver un problema de poblaciones cambiantes de parásitos y huéspedes.

En el innovador libro de Harold Morowitz *Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal Physics*, cuya primera edición fue publicada en 1968, se enunciaba lo que a veces se conoce como la cuarta ley de la termodinámica: «En los sistemas en estado estacionario, el flujo de energía a través del sistema desde una fuente hasta un sumidero acarreará al menos un ciclo en el sistema».¹ Este enunciado —candidato a la cuarta ley de la termodinámica mejor situado que el de Kauffman— conecta lo vivo con lo no vivo. Al acumular complejidad con el paso del tiempo, los ciclos energéticamente impulsados incorporan una memoria natural, un recuerdo de sus estados pasados. Últimamente, Morowitz se ha dedicado a comparar metabolismos bacterianos en busca de vías metabólicas compartidas, algunas de las cuales podrían ser anteriores al ADN o los mecanismos de replicación altamente estables. «El metabolismo», afirma Morowitz, «recapitula la biogénesis.» Dicho de otro modo, los ciclos bioquímicos de las células actuales pueden contener reminiscencias no sólo de sus ancestros bacterianos, sino de los ciclos termodinámicos a partir de los cuales evolucionaron las propias bacterias. Morowitz, miembro del comité asesor del Santa Fe Complexity Institute, parte de la premisa de que las células vivas contienen rastros metabólicos del origen de la vida. Teóricamente, estos ciclos termodinámicos reminiscentes son fósiles químicos de más de 3500 millones de años de antigüedad, reliquias todavía activas de la robusta reducción de gradientes por la que la materia cobró vida.

El sol de medianoche

Esta caza de los orígenes más remotos de la bioquímica resulta fascinante, pero ¿podría restar algo más de los ciclos orgánicos prebióticos en los organismos actuales? Además de la bioquímica del origen de la vida, en nuestras células podrían persistir formas arcaicas de sensibilidad. Los ciclos termodinámicos primordiales o hiperciclos (véase más adelante) que condujeron a la vida habrían degradado mucha más energía a la luz del día que en la oscuridad. Puesto que la rotación de la Tierra era bastante más rápida hace miles de millones de años, es posible que nues-

tros biorritmos guarden trazas de unos días y noches más cortos. Somos pedazos de «materia estelar que se enfrió por accidente, pedazos de una estrella malograda», escribió Sir Arthur Eddington.² Nuestros ancestros, cuyos ciclos se activaban en presencia de la luz solar, quizá participaran en un juego del escondite primordial a medida que la Tierra giraba. Si eran sensitivos (y, quién sabe, quizá lo fueran), los ciclos termodinámicos y sus descendientes vivos seguramente se habrían concentrado en el Sol como primer y último objeto de deseo. Antes de que hubiera amantes infieles o padres desaparecidos, antes de la vida decadente o el cambio de las estaciones, existieron las atenciones fluctuantes del Sol.³ ¿Podría ser que persistieran reminiscencias de este flujo diurno, este empobrecimiento cíclico de la actividad de los ciclos termodinámicos primordiales, al cabo de millones de años de ciclos celulares? ¿Cuánto debe la asociación del amor verdadero con el verano y la luz del Sol, lugar común de la música popular, a una conexión primordial de los ciclos termodinámicos sensitivos con el Sol? Esta especulación incumbe a las raíces de la psicología. Si podían sentir, aunque sólo fuera un poco, aquellos ciclos primordiales y células posteriores que anhelaban el Sol, que sufrían la turbadora oscuridad de su ida y anticipaban el deleite de su vuelta, podrían haber tenido una ventaja selectiva. Al sentir la luz del Sol, estaban mejor preparados para desplazarse en busca de más luz y, si lo demás permanecía igual, almacenar más energía en sus ciclos autocatalíticos, sus redes bioquímicas. Antes de que hubiera madres e hijos, antes de la preocupación humana por la presencia o ausencia de Dios, hubo el resplandor cíclico primordial, la luz diurna proveedora de energía y la desaparición nocturna del Sol. Los orígenes —no sólo de la biología, sino también de la psicología y, quizás, otras ciencias— pueden residir dentro de nosotros, aguardando la hora propicia, repitiéndose cíclicamente, esperando a que futuros investigadores lo suficientemente inteligentes y equipados desentrañen las antiguas redes termodinámicas de la vida.

¿Qué son los ciclos, y en qué se diferencian los ciclos biológicos de los no biológicos? Muchos de los ciclos más básicos (como el del día y la noche) parecen basarse, al menos parcialmente, en la gravedad. Los ciclos más simples incluyen la oscilación de un péndulo, el ciclo día-noche asociado a la rotación de la Tierra y las estaciones. Otro tipo de ciclo, no necesariamente biológico, es el conjunto de reacciones autocatalíticas descrito por Lotka, en que A produce B, que a su vez produce C, y así sucesivamente, hasta llegar de nuevo a A. El inicio de un sistema autocatalítico de esta clase puede deberse a que un fotón cause una excitación

química que produzca un incremento de A. Como consecuencia, se produciría un incremento de compuestos intermediarios, lo cual incrementaría la producción de A. Un ciclo más sutil pero no menos realista sería, dentro de un sistema en equilibrio, la acción de una minúscula fluctuación que elevase momentáneamente una partícula a un nivel de energía más alto, antes de volver a su estado de equilibrio.

En abstracto, el círculo bidimensional representa un ciclo eterno, mientras que la onda sinusoidal $\sim\sim\sim$ representa un ciclo extendido en el tiempo. También hay representaciones tridimensionales de ciclos helicoidales, con el tiempo como tercera variable. Esta representación helicoidal, en forma de sacacorchos, es útil a la hora de pensar a escala ecosistémica y evolutiva. El acoplamiento de procesos y ecuaciones lineales y no lineales suele manifestar periodicidad en sus resultados, lo cual equivale a la existencia de ciclos. Antes del advenimiento de los ordenadores, calcular los resultados de tales sistemas de ecuaciones era una tarea intimidadoramente laboriosa. Pero la informática ha traído consigo la capacidad de analizar rápidamente y «ver» el comportamiento de ecuaciones no lineales acopladas.

Reacciones BZ

A pesar de su interés, la mayoría de ciclos simulados por ordenador no responden a lo que encontramos en la naturaleza. Un ciclo natural es el que se da en ciertas reacciones químicas.⁴ Puesto que se trata de sistemas abiertos, estas reacciones pueden comportarse como una bola de nieve «recogiendo» materiales del entorno. Cuando A produce más A a través de una serie de intermediarios químicos, tenemos un ciclo autocatalítico positivo o de «retroacción positiva»: cuanto más A hay, más A habrá. Un ejemplo no químico de retroacción positiva es el de un micrófono que, situado demasiado cerca de un altavoz, comienza a chirriar. La causa es que el ruido del altavoz es captado por el micrófono y amplificado de vuelta al altavoz. La salida de un proceso se convierte en la entrada de otro. Abiertas a su entorno, las redes autocatalíticas importan materia y energía; y si toman más de lo que devuelven, crecen.

Lotka destacó los atributos universales de la autocatálisis, aplicables por igual a los sistemas físicos, químicos y biológicos. En 1910 formuló una serie de ecuaciones que simulaban la autocatálisis. Las soluciones de estas ecuaciones tenían carácter cíclico. Aunque poco discutidas, las ecuaciones de Lotka conectaron la vida a la física y la química de manera novedosa y definitiva.

El comportamiento cíclico predicho por las ecuaciones de Lotka puede observarse en algunos sistemas químicos reales. El más conocido es la reacción de Belousov-Zhabotinsky (BZ), llamada así en honor de los químicos que la descubrieron y estudiaron a finales de los años cincuenta y principios de los sesenta. (Actualmente, Anatol M. Zhabotinsky trabaja en la Universidad Brandeis, en las afueras de Boston, donde continúa estudiando ondas químicas.) Belousov, cuya pretensión era modelar ciclos metabólicos, se quedó asombrado al ver que sus reacciones daban lugar, a una escala de varios centímetros, a cambios de color periódicos. Los constituyentes a escala microscópica se conglomeraban a escala macroscópica. Billones y billones de átomos y moléculas se sincronizaban en estructuras organizadas. La reacción autocatalítica final que estudiaba Belousov era la oxidación del ácido cérico por el bromato potásico, que a su vez era catalizada por el cerio como parte de una serie de reacciones redox. Varias de las reacciones autocatalíticas de los relojes químicos estudiados por Belousov seguían vías químicas alternativas. En un caso, por ejemplo, cuando las sustancias químicas permanecían un tiempo relativamente largo en el reactor, y éste era sometido a una agitación continuada, el sistema se comportaba como un sistema abierto cercano al equilibrio: alcanzaba un estado estacionario. Pero si se acortaba el tiempo de residencia de las sustancias químicas en el reactor, el sistema se tornaba de un color amarillo pálido, indicativo de un exceso de Ce^{4+} (una forma iónica del cerio). Posteriormente la solución se decoloraba (lo que indicaba un exceso de Ce^{3+} , otra forma del cerio). Con la temperatura, presión y concentraciones químicas adecuadas, se conseguían varios cambios de color por minuto, de amarillo a incoloro, de incoloro a amarillo, y así sucesivamente, siguiendo una pauta regular.⁵

A veces, aparentemente tras una leve perturbación o inhomogeneidad en las condiciones iniciales, la reacción adquiere una pauta regular bandeada que sube y baja a lo largo del recipiente. En tales relojes químicos, o ciclos límite, billones de moléculas actúan coordinadamente a escalas espaciales del orden de un centímetro, muchos órdenes de magnitud por encima del tamaño de las moléculas participantes en la reacción. Posteriormente el patrón de bandas se hace estático: bandas horizontales amarillas se alternan con bandas claras, y el sistema parece haber alcanzado un estado estacionario. Pero la reacción aún no se ha completado. Al cabo de unas horas, las bandas desaparecen. No es extraño que el jesuita preguntara al profesor Early si aquello estaba vivo.

Estas observaciones indican que las redes de reacciones químicas no lineales pueden comportarse de una manera inesperada. Así, pueden parecer instaladas en un estado uniforme y aburrido para, de pronto, vol-

verse inestables. Esta transición de un estado aparentemente estable a uno radicalmente distinto es típica de los sistemas químicos de no equilibrio. La coexistencia de dos o más estados estables bajo las mismas ligaduras o condiciones de contorno se conoce como «biestabilidad». Los nuevos estados dependen de las condiciones experimentales concretas y de la historia de reacciones pasadas.

Las reacciones BZ que hemos estado considerando ocurren en condiciones de agitación y cebado continuo de reactantes. En otras ocasiones, la reacción se lleva a cabo sobre una capa fina que permite la formación de patrones espaciales. En estas condiciones proliferan espectaculares frentes de onda que adoptan la forma de círculos concéntricos y espirales dextrógiras y levógiras. Estos frentes de onda, visibles a simple vista, se mueven sin distorsión y a velocidades predecibles (figura 7.1). Más de 10^{20} moléculas se coordinan en el espacio y el tiempo, como en una coreografía, o como si se enviaran mensajes de una parte a otra de la reacción mediante alguna forma de telecomunicación miniaturizada.

Los hiperciclos de Eigen

El químico alemán Manfred Eigen, Premio Nobel de química en 1967, fue uno de los primeros en aplicar la autocatálisis a la biología.⁶ Conoció los hiperciclos, redes de reacciones cuyos procesos parecían arrojar luz sobre el origen de la vida. Los hiperciclos de Eigen se basaban en la replicación del ARN como cimiento cinético para la organización y producción de proteínas catalizadoras de ciclos. Cada replicador genera una proteína que contribuye a la replicación de otro replicador, hasta un paso final que conecta el sistema en un todo funcional. Eigen sugiere que la vida comenzó en un medio provisto de una maquinaria primitiva de replicación y acoplamiento ARN-proteína. Con el paso del tiempo, este sistema habría encontrado una manera de sintetizar proteínas, introduciéndolas en el proceso replicativo. Los ancestros termodinámicos de las bacterias podrían haber sido hiperciclos de este estilo. Según Eigen, los hiperciclos tienen las siguientes propiedades:

1.º Todo hiperciclo tiene propiedades de crecimiento autocatalítico. (Recuérdese que los sistemas de retroacción positiva son autoamplificativos.)

2.º Los ciclos compiten entre sí por los materiales y la energía, y son seleccionados por su capacidad de intensificar la actividad autocatalítica del sistema como un todo.

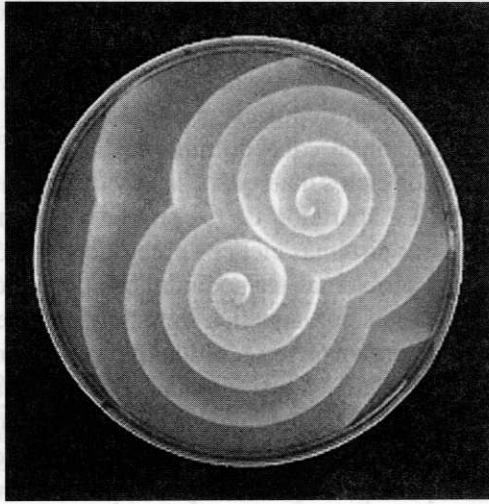


Figura 7.1. Algunos sistemas disipativos rompen la simetría temporal y exhiben un comportamiento oscilatorio y ondulatorio, que se visualiza muy bien en ciertos sistemas químicos. El ejemplo más conocido es la reacción de Belousov-Zhabotinsky (BZ). Básicamente, una reacción BZ es la oxidación catalítica de un compuesto orgánico soluble como el ácido malónico ($\text{CH}_2[\text{COOH}]_2$). La solución continuamente agitada y cebada pasa de amarilla a incolora de manera periódica. Cuando la reacción se lleva a cabo en una placa de Petri, se forman ondas espirales. Surgen frentes de onda a lo largo de los límites de oxidación-reducción. Prigogine modeló el comportamiento de estos sistemas químicos complejos mediante un esquema de reacción autocatalítico de tres pasos. Los modelos matemáticos de estos sistemas muestran oscilaciones violentas en el tiempo y el espacio, muy parecidas a las observadas en las reacciones químicas reales. Billones de moléculas se organizan en estructuras macroscópicas complejas y presentan comportamientos generados por un gradiente químico simple. (Fuente: <http://www.chem.arizona.edu/tpp/chemt/CTNew/Graphics/belousov%20alone%20felice%20frankel.jpg>.)

3.º Debido a las no linealidades entre ciclos, la selección puede ser abrupta, lo cual puede suponer la eliminación súbita de algunos.

4.º Los procesos selectivos entre ciclos se decidirán por ventajas muy pequeñas. Una vez consumada la selección, el sistema evolucionará muy deprisa. La evolución puede proceder mediante «mutaciones» que proporcionan alguna ventaja selectiva por promoción o represión. Las pequeñas variaciones de eficacia darán ventaja a unos hiperciclos sobre otros.

5.º Los hiperciclos catalíticos son autoinstructivos y acumulan información en los ciclos acoplados.

Podemos encontrar ciclos materiales asociados a flujos de energía en toda una gama de fenómenos, desde los torbellinos y las ondas químicas hasta los átomos de carbono incorporados por las plantas, los cuales, tras la muerte de éstas, forman depósitos subterráneos que sólo volverán a ser puestos en circulación al cabo de millones de años, a causa de una erupción volcánica. Los ciclos materiales de la vida tienen un contexto termodinámico amplio. La aparición de los primeros genomas no fue enteramente accidental. Los sistemas cíclicos prebióticos y bióticos ofrecieron soluciones estables a problemas termodinámicos concretos de ruptura de gradientes. Nos alineamos con aquellos investigadores de la complejidad que buscan fuentes de organización u orden que suplementan la selección natural, en oposición a aquellos que intentan reemplazarla por otros principios evolutivos. Sin embargo, creemos que la termodinámica es especial, porque proporciona no sólo una fuente suplementaria de complejidad, sino la base metaestable para el crecimiento y la reproducción, que, en razón de su imperfección, es el equivalente de la selección natural.

Ulanowicz y la autocatálisis ecológica

De los hiperciclos moleculares pasamos ahora a unos ciclos termodinámicos con una escala mucho mayor. El ingeniero químico y autoproclamado metabiólogo Robert Ulanowicz, catedrático de ecología teórica en el Laboratorio Biológico de Chesapeake, adscrito a la Universidad de Maryland, ha dedicado buena parte de su carrera a concebir métodos para cuantificar el flujo de energía en los sistemas biológicos. Ulanowicz conviene con nosotros en que la segunda ley genera complejidad en la naturaleza, pero subraya que posteriormente la autocatálisis selecciona entre las nuevas combinaciones aquellas que seguirán formando parte de sistemas en evolución. Su noción de «ascendencia», que depende del flujo de energía y de las conexiones entre las partes del sistema, mide el rendimiento efectivo del sistema.

La obra de Ulanowicz ha pasado en gran medida inadvertida, en parte porque la mayoría de biólogos se echa atrás ante cualquier tratamiento matemático que vaya más allá del álgebra o la estadística elemental. Cuantificar el flujo de carbono a través de un ecosistema da idea del procesamiento energético total. Ulanowicz distingue entre los flujos materiales y energéticos que atraviesan el sistema en línea recta y aquellos que describen uno o más ciclos dentro del ecosistema (figura 7.2). La idea de ciclos y nodos conectados que se constituyen en redes mayores, recientemente generalizada a las interacciones sociales y las redes de Internet, puede remontarse a las ideas biológicas sobre la autocatálisis.

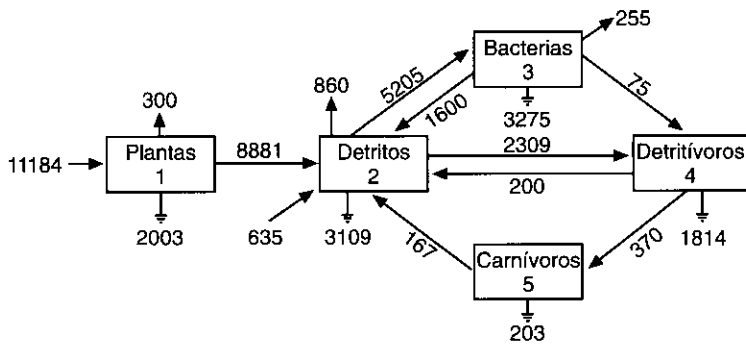


Figura 7.2. El conjunto de flujos de energía (en kilocalorías por metro cuadrado y año) en el ecosistema de Cone Spring, Iowa. Se trata de un pequeño manantial en cuyo reducido ecosistema pueden distinguirse cinco compartimentos básicos: algas y plantas verdes (productores primarios), detritos, bacterias, detritívoros (anélidos y moluscos) y carnívoros (insectos). Las flechas que no parten de un rectángulo representan entradas desde fuera del sistema, como energía solar o detritos. Las flechas que no van a parar a un rectángulo representan salidas de energía útil del sistema. Los símbolos de tierra representan disipaciones. Trazar los flujos de energía entre compartimentos vivos permite determinar los flujos, los ciclos y la estructura jerárquica de un ecosistema.⁷

A lo largo de sus estudios, Ulanowicz ha encontrado procesos cíclicos en todos los niveles de la organización ecosistémica. Muchos son autorreforzantes, bucles retroactivos positivos. Podría argumentarse que los organismos y las poblaciones no son catalizadores, sino que estrictamente son los agentes químicos que aceleran las reacciones. Pero Ulanowicz hace una sólida defensa de las relaciones autocatalíticas en los ecosistemas. A modo de ejemplo, nos invita a considerar las hojas de la planta carnívora *Utricularia*, que crece en lagunas someras. Sus hojas y ramas están cubiertas de comunidades de algas microscópicas elegantemente simétricas, conocidas como diatomeas. A su alrededor nadan crustáceos microscópicos (el llamado zooplancton) que se alimentan de esas algas. Para cerrar el círculo, *Utricularia* atrapa y devora el zooplancton.

Como señala Ulanowicz, un incremento «de cualquiera de estas tres poblaciones, digamos el zooplancton, contribuiría al aumento de sus copartícipes “corriente abajo”. Esto es, habría más zooplancton disponible para los planctívoros [...]. Al crecer, *Utricularia* proporcionaría más sustrato para las diatomeas que nutren al zooplancton, etcétera».⁸ Así pues, cada miembro de la red autorreforzante de *Utricularia* está actuando, a todos los efectos, como un catalizador.

Los procesos autocatalíticos son intrínsecamente autopromotores. Ulanowicz subraya la importancia de tales procesos en biología. Cualquier crecimiento dentro de una red autocatalítica, sea viva o no, sea parte de un hiperciclo prebiótico o de un ecosistema más que humano, puede engendrar un crecimiento del sistema *entero*, asumiendo, por supuesto, que los materiales requeridos están disponibles. (Aunque a veces puedan asemejarse a la habichuela mágica del cuento, que crecía por encima de las nubes, las redes autocatalíticas no pueden crecer indefinidamente. Hay procesos de retroacción negativa derivados de la física, la química y la biología que contrarrestan la tendencia al crecimiento sin freno. Por ejemplo, en el Pacífico central las poblaciones de algas no están limitadas estrictamente por los nutrientes, sino tal vez por el hierro requerido como catalizador en la fotosíntesis algal. Los factores limitantes de los sistemas biológicos incluyen el espacio, el alimento e, incluso, en el caso de las habichuelas, la gravedad a partir de cierta altura.)

Ulanowicz, como Eigen, también observa la existencia de selección dentro de los sistemas autocatalíticos y entre ellos. Si otra especie puede sumarse al proceso catalítico con más eficacia que una especie existente, la nueva especie se incorporará al sistema. «En particular, si el cambio en un compartimento acarrearía accidentalmente más recursos necesarios, permitiéndole funcionar a un nivel elevado, entonces dicha adquisición será recompensada. Puesto que la presión selectiva que favorece la adquisición de recursos se aplica a todos los miembros de la configuración, el propio bucle se convierte en un atractor de materia y energía, una tendencia que se puede calificar de centrípeta (por usar el término acuñado por Newton, de lo más apropiado aquí). Considerado como unidad, el ciclo autocatalítico no se limita a reaccionar respecto a su entorno, sino que crea activamente su propio dominio de influencia.»⁹

La obra de Ulanowicz sugiere que debemos contemplarnos a nosotros mismos no sólo como individuos, o como miembros de una sociedad, sino también como parte de una red autorreforzante. Esto se aplica tanto a los ciclos celulares que ocurren en nuestro interior como a los ciclos ecosistémicos que nos rodean. Por ejemplo, cuando a la hora de comprar un producto hacemos una elección económica, o cuando entablamos una unión de algún tipo con un organismo de nuestra propia especie o de otra, estas acciones se producen en el contexto de una red autocatalítica; y nuestras elecciones fortalecen o debilitan conexiones de esa red. Ulanowicz señala el hecho sobrecogedor de que los procesos autocatalíticos abiertos sobreviven a sus componentes materiales. Aquí, en la organización de ciclos conectados, nos reconocemos como procesos ecológicos y evolutivos, no únicamente como objetos materiales y particulares.

«Heráclito tenía razón», afirma Popper, «no somos cosas, sino llamas. O, más prosaicamente, somos, como todas las células, procesos metabólicos, redes de vías químicas.»¹⁰ Los procesos autocatalíticos ligados constituyen buena parte de lo que hoy denominamos vida. Pero, por su propia naturaleza, los procesos autocatalíticos pueden integrar nuevos elementos. Ésta es una de las razones por las que la vida es tan difícil de definir: no se trata de una cosa sin más, sino que es algo abierto; recluta nuevos objetos, nuevos materiales y nuevos genomas, así como partes del entorno en sus ciclos expansivos. Como una pintura cubista que integra recortes de periódicos, o como un tilonorrinco que decora su nido con detergente azul y chapas de refrescos, la autocatálisis introduce nuevos jugadores que potencialmente pueden incrementar la armonía y la funcionalidad y agrandar el conjunto. Consideremos el nitrógeno, uno de los elementos indispensables para la construcción de las proteínas celulares y corporales. El químico Roald Hoffmann, de la Universidad de Cornell, ha apuntado que, debido a la fijación industrial de nitrógeno para producir fertilizantes, un europeo o un norteamericano contemporáneo pueden contar con que un 40 % de los átomos de su cuerpo ha pasado en algún momento por una fábrica de abonos; en China la cifra se acerca al 70 %. (Para el azufre, los porcentajes son algo menores.) Los sistemas abiertos de la vida se extienden ahora a la tecnología y la agricultura, y estos procesos se están integrando en ciclos biosféricos más antiguos. Para nuestra sorpresa y horror, la biosfera se está convirtiendo en un proceso tecnológico, o biotecnológico.

Los ciclos autocatalíticos anidados mantienen su estructura a través de un continuo que va desde las escalas cuánticas hasta los ecosistemas, abarcando numerosos órdenes de magnitud. En los sistemas biológicos, la escala temporal de las reacciones puede ir de los 10^{-14} segundos hasta un número indeterminado de siglos, en cuanto que su escala espacial puede ir de 10^{-9} cm hasta el planeta entero. Dentro de estos vastos límites espaciotemporales, redes anidadas almacenan y recuperan la energía necesaria para su funcionamiento cíclico.¹¹

El universo autoorganizativo de Erich Jantsch

Inspirándose en Prigogine, el astrofísico austriaco Erich Jantsch argumentó que el universo entero en el que surgieron las estructuras disipativas es autoorganizativo. Los sistemas abiertos complejos surgen de su entorno. En su principal obra, *The Self-Organizing Universe* —libro que escribió apresuradamente, poco antes de morir de cáncer—, Jantsch de-

fendió un enfoque «de arriba abajo», en el que no sólo las partes internas son relevantes, sino también la totalidad del universo exterior al objeto estudiado.¹² Así, para entender la evolución celular debemos comprender la evolución planetaria, y para imaginar el futuro lejano debemos saber algo del pasado remoto. La cosmología de Jantsch complementa (y quizá con un fundamento epistemológico más sólido) las visiones mecanicistas de la naturaleza que describen los sistemas complejos como construcciones a partir de partes menores. El astrofísico austriaco afirmaba que la principal dicotomía que afecta a los sistemas complejos es la disyuntiva entre novedad y confirmación. La novedad puede entenderse como la introducción de nuevos procesos o materiales en una red cíclica u organización termodinámica superviviente. La confirmación, por su parte, es la repetición de lo ensayado y acertado. La interacción entre aquello que funciona y el riesgo de intentar algo que podría funcionar aún mejor, o bien no funcionar, el toma y daca entre novedad y confirmación, está en el meollo de la competencia entre sistemas complejos abiertos.

La primera síntesis termodinámica de Jantsch, dedicada a Prigogine, integra la cosmología con la obra de la bióloga Lynn Margulis, de la Universidad de Massachusetts, y el químico atmosférico independiente James Lovelock, del Reino Unido. Lovelock, inventor del dispositivo de captura de electrones capaz de registrar cantidades ínfimas de compuestos clorofluorocarbonados (aquellos que degradan la capa de ozono), cayó en la cuenta de que la atmósfera terrestre no estaba en equilibrio termodinámico. Esta constatación le llevó a explorar las maneras potencialmente interconectadas en que los organismos, que son sistemas abiertos, mantienen el entorno en un estado metaestable. Lynn Margulis le hizo ver que los microbios intercambiadores de gases eran la causa de que nuestra atmósfera se encontrase en un estado altamente energético y químicamente improbable. El genio de Jantsch consistió en mostrar que el universo podía comprenderse mejor como un vasto proceso de flujo que como una construcción mecánica. Había que concebirlo termodinámicamente, de arriba abajo, de fuera adentro.

La humanidad puede ser el límite, pero ¿de qué? Así como la mejor comprensión de la vida incluye el tiempo darwiniano, así también la mejor comprensión de la complejidad (incluida la biológica) requiere la consideración del contexto termodinámico. La perspectiva de arriba abajo de Jantsch enlaza con las ideas occidentales de totalidad e implicación mutua (la dependencia de cualquier entidad de todas las demás) y con la importancia de la energía. Puesto que los organismos son sistemas abiertos, con ciclos complejos mantenidos durante generaciones, para Jantsch la vida es un proceso temporal y espacialmente vinculante: nuestros cuerpos retienen ciclos de la biosfera primitiva y, al hacerlo, mantienen vivos

entornos pasados que de otra manera habrían desaparecido. Así, según Jantsch, cada uno de nosotros es un flujo prigogineano, un torbellino reticular de genes y células en una biosfera fuera de equilibrio, prolongada en un universo creativo y generador de novedades.

La vida, de acuerdo con cualquiera de las muchas definiciones de complejidad, es un sistema complejo. Durante los últimos treinta años ha venido tomando cuerpo una ciencia de la «complejidad», foco de atracción para científicos brillantes de todo el mundo. En general, esta visión del mundo es no reduccionista y ofrece muchas posibilidades nuevas para ayudarnos a comprender la vida. Aplica un enfoque sistémico al estudio de la naturaleza, es decir, busca leyes, modelos o principios universales que sean válidos para una amplia gama de sistemas, con independencia de sus particularidades. Ludwig von Bertalanffy, considerado el padre de la teoría de sistemas, impulsó programas de investigación de principios aplicables a «sistemas en general».¹³ Esta nueva ciencia contempla las propiedades emergentes e intenta integrar los enfoques reduccionista y holístico en el marco de los sistemas complejos.

El presente libro no es el lugar para integrar todos estos puntos de vista y discutir su relevancia respecto a los sistemas vivos. Basta con decir que muchos de estos programas de investigación encajan confortablemente en nuestro paradigma. Entre los principales nombres que han contribuido al desarrollo de estas ciencias, se encuentran: Bertalanffy y Laszlo (teoría general de sistemas); Allen, O'Neill, Salthe y Pattee (teoría de jerarquías); Wiener y Turing (teoría de computación); Lorenz, Ruelle, Smale y Feigenbaum (dinámica caótica); Poincaré y Abraham (sistemas dinámicos); Prigogine y Nicolis (sistemas disipativos); Thom (teoría de catástrofes); Bak (leyes potenciales y criticalidad autoorganizada); Haken (sinérgica); Rashevsky y Rosen (biología relacional); Katchalsky, Oster y Mikulecky (termodinámica de redes); Brown, West y Enquist (biología alométrica); Kauffman y Wolfram (biología computacional); Mandelbrot (geometría fractal); y Ulanowicz y Barabasi (análisis de redes ecológicas). Muchos de estos sistemas son no lineales, tienen propiedades dinámicas y pueden experimentar bifurcaciones. Estas «ciencias sistémicas» ofrecen nuevos enfoques y están fomentando la búsqueda de principios generales, sobre todo en biología.

El mundo de Wicken: la segunda ley impulsa la vida

La potencia sintética e interdisciplinaria de todas estas contribuciones a la termodinámica de la vida es innegable. La genética no es suficiente,

afirman a coro los autores anteriores. Los organismos actúan como totalidades autorreferenciales mientras buscan y degradan los recursos energéticos del entorno donde crecen, organizándolo, ampliando la frontera de la reducción de entropía y juntando genomas y células para crear nuevas especies y formas de vida.

A este panteón de pensadores debemos sumar ahora a Wicken, quien se atrevió a afirmar que si la vida existe es precisamente por la segunda ley de la termodinámica.¹⁴

Jeffrey Wicken completó algunas de las reflexiones incompletas de Lotka y Schrödinger acerca de la naturaleza termodinámica de la vida. Argumentó persuasivamente que la segunda ley no sólo es compatible con la vida, sino instrumental en su origen y evolución. El Wicken docente era un león enjaulado. Con un parche negro tapándole un ojo (resultado de un accidente de la infancia), se paseaba de un lado a otro por la tarima hasta que, de repente, giraba sobre sus talones y escribía una ecuación que aturdí a su audiencia. Era notable la intensidad de su discurso, que saltaba de la filosofía griega de Zenón y los eleáticos o las deficiencias del paradigma newtoniano a la fuerza del enlace peptídico. Año tras año era elegido como candidato a mejor profesor por los alumnos del Behrend College de Erie, adscrito a la Universidad de Pennsylvania. Formado como bioquímico, Wicken se había pasado a la biología teórica y la termodinámica porque su pequeño colegio universitario no estaba equipado para la investigación en química molecular. De 1978 a 1990 publicó 35 artículos y un libro. Aunque mermado por el alcoholismo en sus últimos años, a nuestro juicio hizo contribuciones capitales a las aplicaciones biológicas de la termodinámica del no equilibrio. Así, desveló las conexiones existentes entre la autocatálisis (redes conectadas que se perpetúan a sí mismas) y la termodinámica, mostrando que estaban tejidas con la misma lana, en un mismo tapiz cuyo bordado incluye el origen de la vida, la reproducción y el mantenimiento de las especies, la emergencia de los ecosistemas y la evolución de la vida. Wicken definía los sistemas vivos como «organizaciones autocatalíticas informadas», y consideraba que estas organizaciones se encuentran en todos los niveles de la vida, desde las secuencias de ARN hasta la energética de los ecosistemas. Las configuraciones cinéticas específicas manifiestan la forma generalizada de la vida: sistemas semiautónomos inextricablemente ligados a flujos de energía locales. «El establecimiento de estas organizaciones autocatalíticas en la biosfera», escribió Wicken, «requería potencial termodinámico y la complejidad molecular para sacarle partido.»¹⁵

La tesis de Wicken es simple: la termodinámica satura la biología a todos los niveles. Su segunda ley, combinada con gradientes impuestos,

proporciona a la vida su rumbo y su razón de ser. Desde el origen de la vida hasta los ecosistemas y la biosfera, con la tecnociencia humana adjunta, la vida es un proceso impulsado por la segunda ley. Conocedor de las sutilezas filosóficas de la teleología y del abandono histórico que ésta ha sufrido tras el advenimiento del método científico moderno, así como de las diferencias matemáticas entre la teoría de la información y las interpretaciones termodinámicas de la entropía, Wicken nos anima a que, desde una perspectiva científica, acabemos con el tabú del porqué de la vida. Y se lamenta de que la termodinámica haya sido considerada como un campo oscuro cuyo empeño en arrojar luz sobre la vida no es más que «otro intento de reducir la vida a la materia y el movimiento». No es así, protesta Wicken:

«La termodinámica es, por encima de todo, la ciencia de los procesos espontáneos, el “ímpetu” de las cosas. El enfoque termodinámico de la evolución nos permite acomodar la “vitalidad” de la vida a la legitimidad de los procesos físicos. [...] La emergencia y la evolución de la vida son fenómenos causalmente conectados con la Segunda Ley; y [...] la termodinámica hace posible comprender la naturaleza orgánica, desde los organismos hasta los ecosistemas, como procesos relacionamente constituidos, ligados por relaciones funcionales entre el todo y las partes».¹⁶

Los sistemas vivos comparten dinámicas de no equilibrio con otros sistemas impulsados por gradientes, islas de complejidad creciente alimentadas no sólo por diferencias químicas, sino también por diferencias de presión y temperatura. Aquello que realmente distingue a la vida es su longevidad. Mantenido genéticamente, la complejidad de la vida continúa desplegándose.

Wicken relaciona la vida y su dirección con el universo en expansión:

«No hay una conexión a priori entre disipación y estructuración. La razón de que ambas tiendan a acoplarse, de que los fenómenos evolutivos en el sentido progresivo sean posibles, es que las fuerzas de la naturaleza son en su mayor parte asociativas. En un universo donde la expansión cósmica mantiene un desequilibrio entre las formas potencial y térmica de la energía, esto significa que juntar entidades menores para formar entidades mayores generará entropía a través de la conversión de energía potencial en calor. De ahí que los pozos de energía potencial hacia los que tienden a fluir los procesos naturales se correlacionen con la construcción de estructura [...]. La disipación

es la fuerza motriz de la tendencia constructiva o integrativa del universo. La disipación entrópica propulsa la estructuración evolutiva; las fuerzas de la naturaleza le dan forma».¹⁷

Muchos han hecho uso de conceptos termodinámicos a la ligera, como esgrimir la tendencia desorganizadora de la segunda ley para afirmar que la vida es el producto de una creación milagrosa, o apelar a esa misma ley para confirmar las predicciones de un desastre económico inminente. En cambio, el meditado pensamiento y discurso de Wicken revela una comprensión concisa del papel de la segunda ley en la vida. Sus ideas extienden la perspectiva darwiniana y sitúan las ciencias de la vida sobre una base científica más amplia. La vida es parte de un fenómeno general de disipación que, más que encontrarse sujeto a la segunda ley, es promovido por ella en sus operaciones esenciales.

Wicken señala que el mismo entramado genético que perpetúa los sistemas metaestables es susceptible de alterarse, mutar y desorganizarse espontáneamente de acuerdo con la segunda ley. Así, mientras que la reproducción contiene una base termodinámica (las células y los seres formados por ellas continúan como vehículos de disipación), los propios vehículos de degradación están expuestos a la avería y el cambio. En consecuencia, tanto la reproducción como la mutación genética (los ingredientes primarios de la selección natural en la formulación actual más aceptada) tienen una conexión termodinámica. Wicken lo da a entender cuando afirma que la segunda ley organiza la vida a todos los niveles. Los potenciales termodinámicos y su disipación requerida impulsan los sistemas complejos. Si se impone un gradiente a un sistema, éste seguirá cualquier vía disponible para degradarlo. El gradiente de radiación impuesto a la Tierra promueve el empleo de energía libre (la captura de fotones) para construir estructuras complejas a través de la autocatálisis. La energía capturada se disipa en procesos ulteriores de reducción de gradientes: reproducción, fisiología y comportamiento. El biólogo y Premio Nobel húngaro Albert von Nagrapolt Szent-Györgyi explica cómo la captación de energía electromagnética por la materia viva

«eleva un electrón de un par electrónico a un nivel superior. Este estado excitado tiene que ser de vida corta, y el electrón vuelve a caer al estado fundamental en 10^{-7} o 10^{-8} segundos, liberando su energía de una manera u otra. La vida ha aprendido a atrapar el electrón en el estado excitado, desacoplarlo de su pareja y hacerlo caer hasta el estado fundamental a través de su maquinaria biológica, utilizando el exceso de energía para los procesos de la vida».¹⁸

Aproximadamente uno de cada quinientos fotones que inciden sobre la Tierra se convierte, a través de las bacterias, las algas y las plantas, en la energía química de la materia orgánica.

Todas las reacciones catalíticas de la vida se aprovechan de la energía producida por electrones excitados que ponen a rodar ciclos autocatalíticos. Si la vida no fuera más que un invento nanotecnológico del tebeo, los ciclos generarían estructura, como hacen las reacciones BZ, pero, con independencia de su atractivo, la estructura no duraría. La materia viva, en cambio, persiste. Reconstruye sus filas de dominós, restituye sus ratoneras. Su obsesión fotoinducida le hace absorber más fotones para excitar más electrones, que sirven para perpetuar, por ejemplo, numerosas bacterias fotosintéticas verdes y purpúreas que se deslizan o nadan hacia la luz. Muchas algas nadan por sí mismas o se valen de animales para desplazarse. Muchos ciliados nadan hacia la luz o la rehúyen; son capaces de orientarse en aguas turbias translúcidas. Toda la vida, no sólo la humana, o bien obtiene energía, o bien muere. La energía almacenada en forma de grasa, almidón o glucógeno libera al organismo de la inmediatez de este imperativo. Estos compuestos y muchas otras formas de almacenamiento permiten a los organismos un mejor control vital. En la fotosíntesis vegetal, los fotones rompen moléculas de agua y liberan su hidrógeno (en forma de electrones). El hidrógeno se combina con dióxido de carbono para producir carbohidratos y otros materiales celulares, y en el proceso se liberan moléculas de oxígeno. Esta serie compleja de reacciones conectadas cesa por la noche, cuando la energía solar deja de estar disponible. En la oscuridad, los carbohidratos sirven como fuente de energía y se degradan en dióxido de carbono y agua, que son liberados en el entorno. Conectadas con otros procesos, estas reacciones fotosintéticas cíclicas sustentan la vida. La energía externa se incorpora y almacena, y se destina a las diversas tareas de la existencia fuera del equilibrio. Los procesos cíclicos almacenan energía, la utilizan y construyen un pasado complejo, a la vez que abren nuevas posibilidades para el futuro.

Segunda parte
Lo complejo

La estructura espaciotemporal de los organismos vivos surge como consecuencia del flujo de energía, y recuerda sobremanera las transiciones de fase que pueden tener lugar en sistemas fisicoquímicos alejados del equilibrio termodinámico. El flujo de energía organiza y estructura el sistema de manera que éste refuerce el propio flujo de energía. Esta estructura espaciotemporal organizada sugiere que tanto las descripciones de cuasiequilibrio como las de no equilibrio son aplicables a los sistemas vivos, dependiendo de los tiempos y volúmenes característicos de los procesos implicados.

Mae-Wan Ho

La fluidez de la individualidad

Estamos separados del mundo, pero inextricablemente conectados a él. ¿Cuál es la naturaleza de esta relación? ¿Cuál es la naturaleza de la individualidad? En esta sección buscaremos las raíces de la complejidad del mundo real, incluyendo los orígenes de la fisiología y de las individualidades a partir de los sistemas no vivos. En algunos fluidos calentados se produce una transición de la transferencia de calor no coherente, molécula a molécula, a la convección coherente. Durante ese proceso entran en concierto más de 10^{22} moléculas. Desde el punto de vista estadístico, esto es ridículamente improbable. Pero la coherencia surge de manera natural cuando se aplica un gradiente de temperatura. La naturaleza crea sistemas, a veces bastante complejos, «para» librarse de los gradientes y exportar caos molecular al medio. Los ciclos materiales energéticamente impulsados, las redes autorreforzantes, dan lugar a estructuras «centrípetas» individualizadas. A pesar de la expresión «genes egoístas», los genes carecen de ego; únicamente las células son auténticas individualidades. Sin proteínas ni redes metabólicas de aminoácidos o de intermediarios recursivos, los genes son impotentes, no más «egoístas» que una tostadora desenchufada. El fisiólogo J. Scott Turner señala que en las cataratas del Niágara, corriente abajo, hay un remolino permanente (o Remolino, con mayúscula, porque tiene nombre propio). Los procesos metaestables subyacen tras las individualidades que equivocadamente tomamos por

objetos. Las individualidades no están aisladas ni cerradas, sino que surgen como sistemas abiertos metaestables en un mar de flujos de energía. Los meteorólogos dan nombres como Gertrude o Bernice a huracanes y tifones. La Gran Mancha Roja de Júpiter también tiene nombre propio. Incluso los sistemas turbulentos enteramente físicos exhiben un asomo de individualidad: la insinuación de una frontera entre el interior y el exterior. Su metaestabilidad turbulenta anticipa nuestras individualidades biológicas y nuestros nombres propios. Con toda la individualidad e independencia que nos atribuimos, nosotros también somos sistemas metaestables con miles de millones de años de historia como estructuras disipativas.

La individualidad termodinámica emana de sistemas disipativos que establecen fronteras. Lejos de aislarse del mundo exterior, sus fronteras les permiten seguir funcionando. En la Tierra, la individualidad biológica depende de una membrana semipermeable, la ubicua membrana celular lipídica, que proporciona una sede, al principio microscópica, para la expansión de los procesos de no equilibrio. Otros sistemas menos complejos, como los remolinos, crecen e incluso parecen reproducirse sin bioquímica, o aun sin química.

Los hexágonos de Bénard

Consideremos las «células» no vivas de Bénard (figura 8.1). En 1897 Henri Bénard, estudiante de la Universidad de París, oyó hablar de unas estructuras convectivas poligonales que surgían en el líquido de revelado que usaban los fotógrafos de la época. Tras investigar la convección, Bénard completó en 1900 su tesis doctoral: «Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquid» (Torbellinos celulares en una película líquida).¹ Éste fue el primer estudio en profundidad de esas formas, a menudo hexagonales. Bénard calentaba el fondo de un recipiente de latón lleno de aceite de esperma de ballena, con vapor a 100 °C. El esperma de ballena, una sustancia cerosa a 20 °C, se convierte en un fluido viscoso a 46 °C. El sistema era abierto, con la superficie del aceite en contacto directo con el aire. Puesto que el aire estaba a temperatura ambiente, unos 20 °C, Bénard había establecido un gradiente térmico de 80 °C a través de una película oleosa de un milímetro de espesor. Se trataba de un gradiente intenso, equivalente a un incremento de 800 °C a lo largo de un centímetro.

Impelidos por el gradiente, surgen hexágonos simétricos del caos líquido. Mientras que la conducción transfiere calor sin ninguna organización detectable de las moléculas del líquido, la convección disipa calor

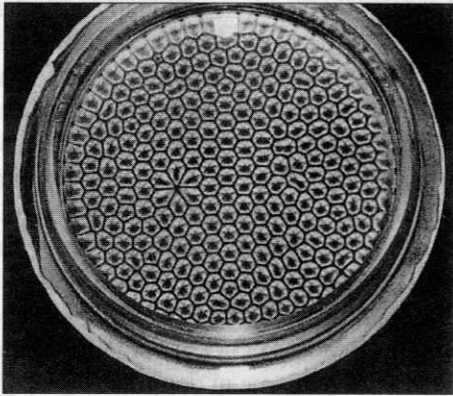
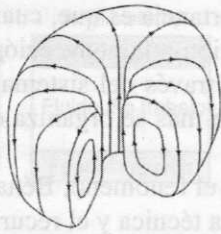


Figura 8.1. Células de Bénard. En este experimento, Koschmieder aplicó una capa de 1,9 mm de grosor de aceite de silicona sobre una placa de 10,5 cm de diámetro.² La silicona se encuentra bajo una capa de aire de 0,4 mm de grosor, que a su vez está bajo una tapa de zafiro uniformemente refrigerada. Las células tienen una anchura media de 0,625 cm, con cientos de millones de moléculas en un proceso altamente organizado que genera estructuras dinámicas macroscópicas. El proceso se inicia a partir de puntos calientes en la superficie del aceite, los cuales dan lugar a efectos de tensión superficial que precipitan la convección. El aceite es calentado desde abajo, asciende por el centro de cada célula, se enfría al llegar a la superficie y vuelve a descender por los márgenes de las células. En estas estructuras estacionarias no hay implicado ningún proceso químico ni biológico. (Fotografía cortesía de L. Koschmieder.)

en ciclos organizados. Los ciclos se mantienen indefinidamente si persiste el gradiente. Representan la capacidad natural, implícita en la naturaleza termodinámica, de resolver de la mejor manera, bajo condiciones físicas o químicas dadas, el problema de reducir un gradiente. La transición de la conducción a la convección muestra que hay más de una manera de conseguir lo mismo. En este caso, a medida que aumenta el gradiente de temperatura, se impone una manera más efectiva de reducirlo (figura 8.2). Es como si la presencia cercana de un gradiente presionara, a veces literalmente, a las partículas que se mueven a su aire para que se agreguen, aunque sea fugazmente, en «individualidades» disipativas. Una

observación de suma importancia es que, cuando estos sistemas se bifurcan y pasan de la conducción a la convección, del desorden a la organización, el flujo de calor a través del sistema —su producción de entropía— aumenta. Así, cuanto más se organiza el sistema, más eficaz es su producción de desechos.

Para hacer más visible el fenómeno, Bénard espolvoreó limaduras de hierro en el aceite. Con esta técnica y el recurso a fotografías de larga exposición, se consiguen visualizaciones llamativas de las células de convección hexagonales.

Bénard investigó los factores responsables de las formas que observaba. Variando el flujo de calor, la temperatura y el espesor de la capa de líquido, encontró que podía controlar el tamaño de las células y su aparición. Aunque su descripción teórica no se produciría hasta sesenta años más tarde, Bénard había determinado la diferencia de temperatura crítica necesaria para la formación de sus hexágonos. Las estructuras cinéticas complejas sólo surgen dentro de gradientes con la intensidad justa: lo bastante intensos, pero no demasiado, además de otras restricciones, como en el cuento de los tres osos, en que Ricitos de Oro se come la sopa que está a la temperatura justa, ni demasiado caliente ni demasiado fría. Una vez que los ciclos se ponen en marcha, pueden crecer si tienen acceso a más materiales del entorno. Además, los sistemas complejos pueden regular los gradientes de los que dependen, reduciéndolos e interrumpiendo sus operaciones cuando el gradiente, como consecuencia de haber sido «devorado» por el sistema complejo, decrece temporalmente. Entonces el gradiente puede recuperarse, y el ciclo vuelve a comenzar. Esto es fisiología incipiente.

Cuando se contemplan las células casi perfectamente hexagonales de Bénard, resulta difícil aceptar la naturaleza casi mágica del proceso. No son el resultado de ninguna reacción química o actividad biológica, sino de un proceso físico simple impulsado por un gradiente de temperatura. Los jesuitas de Early habrían jurado que estaban vivas. La inestabilidad de Bénard es un patrón complejo generado por procesos termodinámicos, no por un programa de ordenador.

Este pequeño experimento tenía grandes implicaciones. Aunque las distancias intermoleculares del aceite de esperma de ballena son del orden de 10^{-8} cm, el líquido adoptaba estructuras organizadas de tamaño macroscópico: un simple gradiente de temperatura hacía que cien trillones de moléculas (10^{20}) marcharan en formación cerrada. Se movían de manera coherente. Esta correlación entre trayectorias y velocidades moleculares es sorprendente, ya que no se espera que aparezca en un sistema aislado. Pero estos procesos no se dan en sistemas aislados. Ocurren dentro de los confines organizadores de un gradiente. De manera natural, los

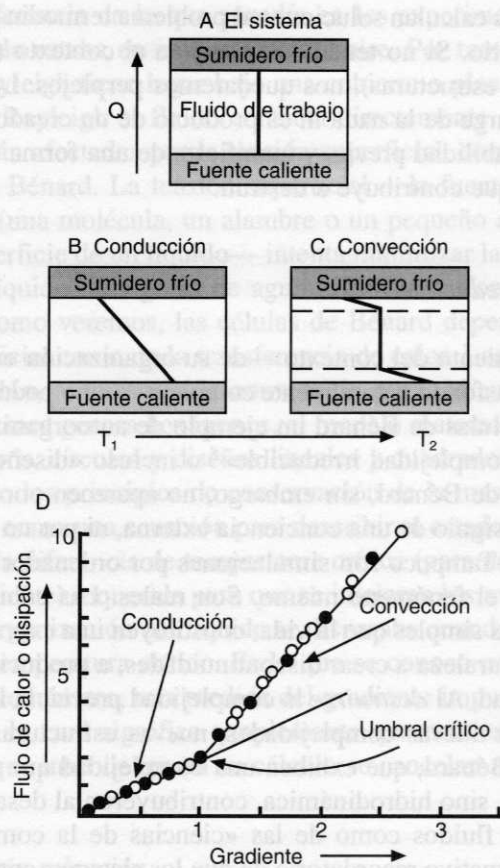


Figura 8.2. Un sistema de Bénard que pasa del régimen lineal al no lineal, de la conducción a la convección. Dentro del recipiente, el fluido se calienta por debajo, y la parte superior del dispositivo experimental actúa como sumidero frío. El perfil de temperatura del dispositivo pasa del correspondiente a un estado de equilibrio isotérmico y caos molecular (A) al de un estado conductivo (B), y luego al de un estado convectivo (C). Cuando se empieza a aplicar calor por la parte inferior del sistema, toda la disipación (en este caso, flujo de calor Q) se verifica por conducción e interacción molécula a molécula. Sin embargo, cuando el gradiente alcanza un valor crítico, se produce una transición de la conducción a la convección. Cuanto más se aparta el sistema del equilibrio, más exergía se consume, más entropía produce el sistema y más trabajo se necesita para mantener el sistema en un estado de no equilibrio. En D se ha representado el flujo de calor Q en función del gradiente impuesto al sistema. Nótese la abrupta transición de la conducción a la convección cuando se sobrepasa el umbral crítico. Una vez que el sistema se «organiza» a través de la convección, la tasa de disipación de calor aumenta.³

«seguramente la organización en células se pospuso todo lo posible. Cualquier interposición de límites espaciales en un sistema homogéneo habría planteado serios problemas a la química prebiótica. Construir fronteras, trasponer cosas a través de ellas y modificarlas cuando convenga son tareas que hoy corren a cargo de los procesos celulares más refinados».¹⁷

Sin embargo, Dyson objeta que, como Eigen, Schrödinger

«omitió un punto esencial [...]. En el libro de Schrödinger encontramos cuatro capítulos que describen con gran lucidez y detalle el fenómeno de la replicación biológica y sólo un capítulo que describe, con menos lucidez, el fenómeno del metabolismo. Schrödinger encuentra en la física una base conceptual tanto para la replicación exacta como para el metabolismo. La replicación se explica por la estabilidad mecanocuántica de las estructuras moleculares, mientras que el metabolismo se explica por la capacidad de la célula viva de extraer entropía negativa de su entorno sin contravenir las leyes de la termodinámica. Delbrück penetró más profundamente que sus contemporáneos en la mecánica de la replicación porque no se dejó distraer por los problemas del metabolismo. Schrödinger veía el mundo biológico a través de los ojos de Delbrück. No es sorprendente, pues, que la idea de Schrödinger de lo que constituye un organismo vivo se parezca más a un bacteriófago que a una bacteria o un ser humano. Su único capítulo dedicado al aspecto metabólico de la vida parece ser un anexo incluido en aras de la completitud, pero que no afecta a la línea argumental principal».¹⁸

Dyson argumenta que ni Schrödinger ni los biólogos que siguieron su directriz parecen haberse preocupado por «el vacío lógico» entre su argumentación principal y su discusión del metabolismo. Sin embargo, volviendo a las conferencias de Dublín de 1943, propone que nos preguntemos por qué Schrödinger no abordó más cuestiones sobre la naturaleza de la vida, tales como: ¿es única o dual?, ¿cuál es la conexión entre metabolismo y replicación?, ¿puede existir vida estrictamente replicativa sin metabolismo, o viceversa? Como señala el propio Dyson, todo el mundo asumió (y en gran medida se continúa asumiendo) que «el aspecto replicativo de la vida es primario, y el metabólico, secundario. A medida que la comprensión de la replicación se hizo más triunfalmente completa, la no comprensión del metabolismo se relegó a la trastienda. En las presentaciones populares de la biología molecular, tal como se enseña ahora a los escolares, vida y replicación se han convertido prácticamente en sinónimos [...]. La visión de Eigen es un caso extremo de esta tendencia».¹⁹ Ei-

gen eligió el ARN porque no estaba interesado en el metabolismo: de hecho, sus teorías del origen de la vida son «teorías sobre el origen de la replicación». Eigen piensa que los genes vinieron primero, después las enzimas y, por último, las células. Pero otros dan primacía a las membranas lipídicas, las envolturas celulares en las que podían tener lugar los procesos termodinámicos secuestrados que habrían conducido a la vida,²⁰ o a metabolismos no celulares que habrían surgido y adquirido complejidad sobre superficies minerales como la arcilla²¹ o el sulfuro de hierro,²² antes de que se añadieran ácidos nucleicos a la mezcla. En resumen, la historia de los enfoques científicos parece habernos hecho poner el carro replicativo delante del caballo metabólico.

Aunque el mundo de ARN ya era más popular que su «alternativa» metabólica, el descubrimiento de Thomas Cech de que el ARN puede catalizarse a sí mismo,²³ lo cual sugiere que podría haber sido más autosuficiente en el pasado, le proporcionó un gran espaldarazo. «Una vez desentrañado el misterio del código genético, era natural pensar en los ácidos nucleicos como estructuras primarias y en las proteínas como estructuras secundarias.»²⁴ Como cuando se nos cae una moneda al suelo y luego divisamos un círculo brillante en la acera, los datos de Cech parecían casi una demostración. Pero la ciencia es traicionera: la «moneda» puede no ser más que un círculo de agua que refleja el alumbrado. Dyson, cuya argumentación se inspira en las ideas del teórico ruso Alexander Oparin acerca de la generación espontánea de la vida en el entorno cósmico, sostiene que los metabolismos proteínicos habrían precedido a los replicadores precisos. Christian de Duve ha criticado los hiperciclos de Eigen porque presuponen la síntesis de proteínas, cuando esto es lo que un modelo del origen de la vida debería explicar.²⁵ De acuerdo con Iris Fry,²⁶ los ribozimas (los segmentos de ARN autocatalítico descubiertos por Cech) invalidarían esta crítica, pero la emergencia de un ARN que funciona como enzima no es nada fácil de explicar. Quizá la crítica más elemental e incisiva sea la apuntada por Jeffrey Wicken, al señalar que en un mundo de ARN no hay razón para que los nucleótidos competidores se autoimpongan la carga de una maquinaria sintetizadora de proteínas.²⁷ Cuando se trata de genes desnudos sometidos a la selección natural, el que gana la carrera es el más rápido. Por cierto, esta lógica se aplica de forma demolidora a la metáfora del gen egoísta popularizada por Richard Dawkins: si primero fueron los genes, que se replicaban frenéticamente en la sopa primordial, entonces la construcción de cuerpos de reproducción lenta para su uso hubiera sido como si un corredor olímpico decidiera competir en una carrera de sacos. El asunto cambia sustancialmente si los genes están siempre interconectados con reductores de gradientes meta-

bólicos, homeostáticos y teleonómicos, tal como los vemos en la naturaleza. Teniendo en cuenta que el ATP, la principal molécula almacenadora de energía en *todas* las formas de vida *conocidas*, es casi idéntica al AMP (un nucleótido del ARN), Dyson sugiere que los ácidos nucleicos podrían haber sido una «enfermedad» originada en alguna «célula primitiva con un exceso de ATP».²⁸ Esta especulación es compatible con la perspectiva general de Wicken, y nuestra, de que la función transformadora de energía de la vida precedió a su procedimiento genético de replicación, si bien ahora están inextricablemente unidos en un formato de gallina-y-huevo.

A la luz de este punto de vista, Dyson propone la tesis (un tanto es-trambótica)²⁹ de que la vida tuvo en realidad dos orígenes, uno primario metabólico y otro secundario nucleotídico, que convergieron en una «simbiosis».* Puesto que lo que conocemos como vida siempre incluye tanto proteínas como genes, y puesto que los virus no suelen considerarse vivos en sí mismos (porque requieren un huésped para replicar sus genes), la nomenclatura de Dyson constituye una exageración. Sin embargo, su argumento (el metabolismo y la replicación son procesos diferentes que precisan de una explicación por separado) es tan crucial que la exageración está justificada. Hay indicios de que ambas perspectivas del origen de la vida, el viejo y resurgido enfoque metabólico y el más de moda enfoque genético, están convergiendo.³⁰

* El informático David Hovel, que estuvo siete años investigando para Microsoft sobre representaciones de la interacción entre personas y ordenadores, señala que la simbiosis, especialmente la transmisión lateral de genes impulsora de la evolución de las especies (Margulis y Sagan, 2002), hace que sea mucho más probable la generación de formas complejas específicas. Esta conclusión «socava casi completamente muchos de los modelos probabilísticos creacionistas y pseudoantropocéntricos sobre los orígenes humanos y de la vida en general. Estos modelos, esgrimidos por grupos diversos, pretenden demostrar que unas probabilidades del orden de $1/(10^{100})^{100}$ excluyen la evolución no dirigida (neodarwiniana) como fuente plausible de la diversidad y prosperidad de la vida en la Tierra. Las probabilidades absurdamente pequeñas que se deducen de estos modelos se basan en aplicaciones simplistas de la regla estándar de encadenamiento de sucesos independientes. No obstante, si las formas de vida pueden intercambiar componentes genómicos funcionales a diversos niveles de asociación y simbiosis, no se requiere ningún fenotipo individual para representar una larga cadena de acumulaciones de rasgos deseables de baja probabilidad mediante mutaciones puntuales. En el gráfico de probabilidad, estas nuevas aproximaciones representan “puentes” a través de las ramas. Como tales, las adaptaciones microbianas útiles pueden tomarse prestadas o explotarse por otros organismos con su propio repertorio de aptitudes ya probadas. Estoy convencido de que esto llevaría las mencionadas probabilidades despreciables al dominio de los valores razonables. Como ocurre con la ecuación empírica de Drake en cosmología, resulta evidente que es muy difícil confeccionar dicho modelo, dadas las limitaciones del registro geológico. Sin embargo, como informático, yo lo compararía a incrementar de uno a un número incontable el número de procesadores dedicados a un único problema» (Hovel, comunicación personal, 2003). (N. de los AA.)

El propio Eigen reconoce la existencia de problemas en su modelo de los hiperciclos. Éste puede ser víctima de una «catástrofe de error». Además, simulaciones por ordenador de Niesert, Harnasch y Bresch muestran que el ARN puede cortocircuitarse y catalizar sólo una parte de las reacciones del hiperciclo, o comportarse de una manera «egoísta» y comenzar a copiarse directamente sin servir de catalizador.³¹ Dyson subraya que los reproductores primigenios requerirían una elevada tolerancia al error; de lo contrario, serían demasiado frágiles, poco robustos y poco variables para que de ellos pudiera derivarse la replicación molecular precisa. La reproducción es imprecisa y termodinámica; la replicación es precisa y molecular. La primera es precipitada por unos medios efectivos de reducción de gradientes en consonancia con la segunda ley; la segunda es el medio a través del cual despegó una versión de dicha reducción de gradientes, la vida. Desde nuestra perspectiva, la replicación nunca ocurre por sí sola (no más que un virus informático fuera de un ordenador). Es un parásito que puede desbocarse y volverse peligroso, o bien transmitir información útil requerida por su huésped. Los huéspedes son los sistemas cíclicos que mantienen sus formas complejas en regiones de flujo de energía. Son homeostáticos. Pueden persistir y propagarse, y en algunos casos pueden producir versiones aproximadas de ellos mismos sin la intervención de los parásitos. No puede decirse lo mismo de los exigentes parásitos replicantes, los cuales, al menos en la naturaleza, siempre precisan del contexto energético químico o (en el caso de la información digital) cultural de sus huéspedes fuera de equilibrio. Como señala Dyson, cinco años después de las conferencias de Schrödinger, la turbia relación de gallina-y-huevo entre replicación y metabolismo fue brillantemente clarificada en términos abstractos por el matemático John von Neumann, cuyos autómatas reproductores estaban separados en *hardware* y *software*.³² Estas ideas, realizadas hasta tal punto por la industria informática que hoy nos resultan familiares, se aplican también a la vida. El hardware de la célula lo constituyen sus proteínas, el fenotipo codificado por su software nucleotídico, que es el genotipo que se replica. Como afirma Dyson, «Von Neumann describió con precisión, en términos abstractos, la conexión lógica entre los componentes [...] ambos [son] esenciales [...]. Sin embargo, hay un sentido importante en el que el hardware precede lógicamente al software».³³ El primero puede existir por sí mismo. El metabolismo puede persistir siempre que haya flujo de energía. Pero el software no puede existir por sí solo; es un virus, un «parásito obligado». Von Neumann distinguió entre el hardware y el software de un ordenador. En la vida, el hardware es el cuerpo y el software son los genes. Las células termodinámicas y los nucleótidos replicantes que hoy encon-

tramos juntos son lógica e históricamente separables. Así como podemos imaginar un ordenador sin software, así también podemos imaginar una vida primigenia sin genes. Primero vino el aparato, funcional y fisiológico, y luego los sistemas operativos, manuales de usuario y códigos para producir máquinas metabólicas mejoradas. Por supuesto, los equivalentes protovivos no reposaban en una estantería, sino que estaban siempre operativos, organizados por el flujo de energía medioambiental. Como veremos, su reciclado constante ofrecía modos de fabricar los genes que tan a menudo son considerados hoy en día como evolutivamente prioritarios.

A pesar de estas críticas, Eigen, con su detallada obra sobre los hiperciclos supuestamente anteriores a la vida, y Dawkins, con sus más populares libros sobre la propagación de los genes y memes tras el origen de la vida, han sido autores fundamentales en las investigaciones sobre la lógica de la replicación.

La vida surgió de las profundidades

En uno de sus libros, *El pulgar del panda* (1992), Stephen Jay Gould cuenta que, seducidos por la belleza de la teoría de la evolución tan convincentemente expuesta por Charles Darwin, T.H. Huxley en Inglaterra y Ernst Haeckel en Alemania se pusieron a buscar los organismos más primitivos que existen. Algunos llegaron a sugerir que el *Urschleim* de Haeckel —que Huxley creyó que realmente había sido descubierto, y lo denominó *Bathybius haeckelii*— podría originarse continuamente, de manera espontánea, del fondo de los océanos. Durante la expedición del *Challenger* (1872-1875), sin embargo, el químico John Buchanan ya había informado de que el presunto organismo primitivo no era más que un precipitado de sulfato cálcico, una capa gelatinosa con gránulos móviles que aparecía en muestras del fondo oceánico preservadas en alcohol, pero no en las muestras mantenidas tal cual en agua de mar.

La generación espontánea de vida en el presente es un suceso sumamente improbable. Como señaló uno de los científicos que primero propuso la idea de un «caldo primordial», Alexander Oparin, aunque pueda parecer «paradójico a primera vista», el origen, la expansión y la evolución de la vida transformaron la superficie planetaria en un medio oxidativo que haría inviable una «evolución prolongada de sustancias orgánicas».³⁴ La razón de que se pensara que para encontrar las formas de vida más primitivas había que sondear las profundidades marinas era bien simple: la geología y la paleontología enseñaban que las formas más primordiales se preservaban por lo general en los estratos inferiores. La

correlación entre profundidad y antigüedad es una poderosa idea que incluso se ha esgrimido como base de la popular idea freudiana de una mente inconsciente y ancestral agazapada bajo el nivel consciente. Las declaraciones de Huxley en el sentido de que la vida seguía originándose en el fondo de los océanos nos parecen hoy prematuras e ingenuas. Pero la relación básica entre profundidad y arcaísmo no sólo continúa vigente, sino que se ha visto reforzada por nuevos descubrimientos. Los primeros proponentes de un origen químico de la vida en la Tierra conjeturaron una atmósfera reductora, o rica en hidrógeno.³⁵ Se pensaba que dicha atmósfera era un resultado natural de la formación del Sol a partir de la nebulosa protosolar, una nube rica en hidrógeno. Este elemento no sólo es el más abundante en el cosmos, sino también el más ligero, y el principal componente de las estrellas, así como su principal combustible en la reacción de fusión nuclear que produce helio y emite radiación. Cuando nuestra estrella, el Sol, entró en ignición, los elementos ligeros fueron expulsados del sistema solar interior. Pero la vida conserva este elemento en sus cuerpos ricos en hidrógeno, que en su mayor parte son agua. Junto a los modelos convencionales del origen de las estrellas, la misma presencia de vida rica en hidrógeno sugiere una atmósfera arcaica reductora, rica en hidrógeno y compuestos orgánicos. Oparin y Haldane sugirieron, cada uno por su cuenta, que el entorno hidrogenado de la Tierra primigenia habría sido el medio del que surgió la vida. Esta fascinante idea continuó siendo ciencia ficción hasta 1953, año en que Stanley Miller, por entonces todavía un estudiante universitario, irradió una atmósfera reductora y obtuvo un alto porcentaje de aminoácidos a partir del oscuro mucílago coagulado en una esfera de vidrio. Al añadir sulfuro de hidrógeno a la mezcla, logró metionina y cisteína, dos aminoácidos que contienen azufre. En las décadas siguientes Miller probó con numerosas variantes,³⁶ y obtuvo aminoácidos a partir de atmósferas de hidrógeno molecular, nitrógeno molecular y monóxido de carbono, pero nunca a partir de atmósferas oxidantes o atmósferas neutras de nitrógeno o dióxido de carbono (el componente principal de las atmósferas de Marte y Venus). Al principio no pudo obtener nucleótidos, pero desde entonces los cinco nucleótidos presentes en el ADN y el ARN se han sintetizado en experimentos de esta clase, que simulan la atmósfera primigenia rica en hidrógeno. La química básica de la vida es la del universo: la adenina, por ejemplo, puede derivarse del cianuro de hidrógeno, una molécula corriente en el espacio. Esto no resulta sorprendente, ya que el cianuro de hidrógeno es un compuesto muy simple (HCN) y la adenina ($H_5C_5N_9$) se obtiene combinando cinco moléculas de cianuro (así como la guanina, la citosina, la timina y el uracilo, los cinco nucleótidos constituyentes de los ácidos nucleicos).³⁷

A pesar de la lógica incuestionable del origen de la vida a partir de un medio ambiente químicamente similar al actual, dos indicios sugieren que el entorno de la Tierra primitiva era menos rico en los compuestos orgánicos hoy presentes en la vida de lo que se pensó inicialmente. El primer indicio es la presencia de una variedad de óxidos de hierro y carbonatos datados en 3800 millones de años. Se dice que estas rocas atestiguan la ausencia de una atmósfera suficientemente reductora para la pervivencia de la vida primigenia o de sus predecesores metabólicos o replicativos. (Sin embargo, como señaló el fallecido experto en biomineralización Heinz Lowenstam, es natural encontrar estratos rocosos indicadores de distintos niveles de oxidación unos al lado de otros, de manera que la presencia de un mineral oxidado no excluye la existencia de ambientes reductores. Tal vez el medio ambiente primigenio fuera más variado de lo que se suele asumir. De hecho, puede que la propia vida primitiva fuera la responsable de la oxidación visible en algunos estratos arcaicos.) El segundo indicio es la escasa presencia de gases nobles en la atmósfera actual. El neón, el séptimo elemento más abundante en el universo, habría estado presente en grandes cantidades en la nebulosa que dio lugar al sistema solar, y de acuerdo con la teoría no se habría visto afectado por la transición a una atmósfera neutra u oxidante. Puesto que este neón primordial no se encuentra en la atmósfera actual, se piensa que la atmósfera reductora pudo haber sido barrida por el viento solar antes de la agregación de la Tierra. Como escribe Dyson, «el experimento de Miller sólo muestra lo que podría haber ocurrido si las circunstancias hubieran sido otras [...]. El nuevo cuadro del origen de la vida lo sitúa en un pequeño agujero caliente y oscuro en la profundidad del océano»,³⁸ donde el medio ambiente submarino era reductor, independientemente de la superficie en contacto con la atmósfera. En este medio ambiente (cálido, húmedo, oscuro y, si pudiéramos oler bajo el agua, con un fétido olor a azufre) se han inspirado «cuatro experimentos en sucesión rápida para hacer plausible el nuevo cuadro [del origen de la vida]». Antes de examinar la nueva evidencia de los orígenes sulfurosos de la vida en entornos organizados por gradientes químicos, echemos un vistazo al cuadro más amplio de los orígenes de la materia que un día cobraría vida.

Supernovas y gradientes estelares: un comienzo violento

A escalas mucho mayores que la humana, la gravedad genera gradientes. Aun antes de que la vida surgiera como un *proceso* de replicación y expansión alimentado por gradientes medioambientales, los gradientes

contribuyeron a generar los *materiales* de que están hechos los seres vivos. Gradientes de temperatura y presión en el interior de estrellas masivas crearon las condiciones para la producción de los elementos (carbono, oxígeno, hierro y otros) que componen nuestros cuerpos. Una estrella de tamaño normal como el Sol es lo bastante masiva para generar las presiones y temperaturas que se requieren para que el hidrógeno se convierta en helio. Cuando explota una supernova veinte veces mayor que nuestro Sol (y se conocen estrellas con masas cien veces mayores que la solar) convierte unos elementos en otros. La transmutación de elementos a través de reacciones nucleares se denomina «nucleosíntesis».³⁹ Los diversos elementos producidos se distribuyen en capas concéntricas, como en una cebolla. Las supernovas del tipo II, masivas y de combustión rápida, surgen junto con otras estrellas en los brazos de las galaxias espirales. En el proceso producen elementos pesados, incluidos los constituyentes de la vida. En estas estrellas el hidrógeno se convierte en helio, como en el Sol. Sin embargo, de la superficie al núcleo estelar, el helio se convierte en carbono, el carbono en oxígeno, el oxígeno y el neón en silicio, y el silicio en hierro. El núcleo de hierro caliente de una supernova de tipo II, aunque a menudo no es mayor que la Tierra, tiene una masa mayor que la del Sol. La estrella arde capa a capa hasta que finalmente el núcleo se colapsa, liberando en una serie de pasos, y en cuestión de segundos, cien veces más energía de la que habrá emitido el Sol en toda su vida. El núcleo colapsado, ahora una estrella de neutrones, vuelve a colapsarse, bombardeando las capas exteriores remanentes con rayos gamma y neutrinos. Los átomos de oxígeno son lanzados al espacio interestelar. Aquí tenemos una fuente distante de muchos de los átomos de oxígeno que estamos inhalando en este momento.

Las supernovas del tipo I, menos energéticas pero más brillantes en el espectro visible, son más aptas para sembrar el espacio de hierro. El carbono y el nitrógeno son expelidos junto con hidrógeno y helio, dando lugar a las nebulosas planetarias, visibles alrededor de estrellas de una a cuatro veces más masivas que el Sol. Estas estrellas se reciclan cuando se forman nuevas estrellas (y planetas). Somos principalmente agua (65 %), que es hidrógeno y oxígeno; el resto de nosotros es sobre todo carbono y nitrógeno.

Después de que la supernova haya distribuido los átomos pesados susceptibles de formar parte de la materia orgánica, los gradientes también organizan la distribución de elementos y compuestos en el sistema solar. La Tierra, junto con el Sol y los demás planetas, se formó a partir de un disco giratorio de hielo, gas y polvo. La nebulosa protosolar que originó el sistema solar no era un amasijo de materia totalmente aleato-

rio, sino que estaba organizado por intensos gradientes de temperatura y presión. Cerca del centro de la nebulosa, las grandes presiones y temperaturas vaporizaban los escombros, enviando los materiales más ligeros lejos de la agregación central. El centro estaba ocupado por materiales más densos, especialmente granos sólidos que se agregaban por influencia de la gravitación. Estos granos, que contienen elementos más pesados, como el hierro, formarían posteriormente los planetas Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, junto con sus satélites. Los materiales más ligeros e hidrogenados (como los hielos de agua, amonio y metano) se congregaron en torno a los masivos gigantes gaseosos Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, y sus satélites. El gradiente de temperatura y presión a través de la nebulosa protosolar condujo a una distribución desigual de los materiales.⁴⁰

Durante este violento periodo inicial del origen de la Tierra, un bombardeo constante de meteoritos aportaba agua y otros materiales, mientras que los impactos mayores elevaban la temperatura oceánica hasta cerca del punto de ebullición. Conocido como eón Hadeano, este periodo de consolidación planetaria duró desde hace 4600 millones de años (que también es la fecha de formación de la Luna, estimada a partir de isótopos radiactivos) hasta hace unos 4000 millones de años. El siguiente de los cuatro eones geológicos, el Arcaico, abarca desde hace 4000 millones de años hasta hace unos 2500 millones de años. En tiempos de Darwin los paleontólogos solían asociar la aparición de la vida con la irrupción de los trilobites y otros organismos con partes duras, que proliferaron y dejaron abundantes fósiles durante el periodo Cámbrico, hace unos 540 millones de años. Hoy se sabe con certeza, sin embargo, que la vida, a nivel celular, tuvo que surgir mucho antes. Las rocas terrestres más antiguas no son mucho más viejas que las trazas de vida más antiguas. Rocas de Groenlandia con inclusiones carbonáceas microscópicas, datadas en 3800 millones de años, han sido analizadas con microsondas que evidencian trazas de carbono radiactivo en proporción consistente con la actividad biológica (los organismos rebajan el C^{13} de manera natural en los procesos de crecimiento).⁴¹

Las dataciones actualizadas de los restos bacterianos más antiguos casi coinciden con la solidificación de la corteza terrestre, lo cual sugiere que las formas de vida primigenias eran sumamente resistentes: «termófilos» resistentes al calor y «extremófilos» que toleraban condiciones extremas. La Tierra ya estaba llena de vida cuando la Luna, que no tenía atmósfera protectora y cuyas rocas se han datado de manera fiable, estaba siendo intensamente acibillada por meteoritos llovidos del espacio. El hecho de que la vida primigenia sobreviviera a este periodo tan violento

muestra que desde el inicio era resistente o que estaba protegida de algún modo, o, más probablemente, ambas cosas.

Para ser unos seres surgidos del polvo espacial, la vida primigenia no lo hizo tan mal. La conversión del polvo de estrellas en compuestos orgánicos (los compuestos hidrocarbonados de cadena larga propios de la vida) comenzó en el espacio. Compuestos orgánicos simples como el cianuro (HCN), el metano (CH₄) y el amoníaco (NH₃) son relativamente comunes en el espacio (en las lunas de Júpiter y Saturno, por ejemplo, hay mares helados de metano y amoníaco). En marzo de 2002, el alemán Uwe Meierhenrich, de la Universidad de Bremen, y Max Bernstein, del Ames Research Center de la NASA, en California, de forma independiente, expusieron compuestos químicos precursores detectados en las nubes interestelares densas a luz ultravioleta en cámaras de vacío con una superficie metálica enfriada hasta cerca del cero absoluto. El equipo de Bernstein encontró tres aminoácidos, y el de Meierhenrich, dieciséis. Estos experimentos sugieren que los sillares de las proteínas pueden formarse en el espacio interestelar, aun en ausencia de agua, y que quizá sean ubicuos. La dihidroxicetona, un azúcar simple, y otras sustancias similares, llamadas azúcares ácidos y azúcares alcohólicos, se aislaron en los meteoritos de Murchison y Murray. También se aisló glicerol, o glicerina, un azúcar alcohólico que es un ingrediente de las paredes celulares. Se han encontrado otros azúcares (fuentes de carbono y energía) en meteoritos y en las nebulosas interestelares. En el eón Hadeano, la Tierra carecía de la atmósfera oxigenada que hoy incinera la mayoría de meteoritos antes de que lleguen al suelo. Si las lluvias de meteoritos primigenias contenían compuestos como los presentes en el meteorito de Murchison, caído en 1969 en Australia, la Tierra joven pudo haber adquirido una auténtica capa de azúcar que habría proporcionado alimento orgánico a células fermentadoras primigenias, capaces de crecer en una atmósfera anóxica. Pero en sí mismas estas golosinas no eran vida.

Burbujas de azufre: un lugar seguro para que la vida comience su andadura

Tanto los defensores de la hipótesis metabólica como los de la hipótesis replicativa del origen de la vida (que, como hemos visto, convergen explícitamente en la hipótesis del origen dual de Dyson) son conscientes del problema central subyacente al origen de la vida: su improbabilidad. El astrónomo Sir Frederick Hoyle y su colega Chandra Wickramasinghe compararon la improbabilidad de que las células «se formaran de golpe»

en la Tierra con el ensamblaje espontáneo de un Boeing 747 a partir de un montón de chatarra y debido al paso de un tornado.⁴² Su solución al problema fue ampliar el escenario de la biogénesis situándolo en el espacio. Como ha escrito el biólogo teórico Stuart Kauffman, «para llegar a funcionar, un metabolismo mínimo debe ser una serie conectada de transformaciones catalizadas que lleven del alimento a los productos necesarios. Inversamente, sin la red conectada para mantener el flujo de energía y productos, ¿cómo podría haber existido una entidad viva que adquiriese por evolución vías metabólicas conectadas?». ⁴³ La respuesta de Kauffman depende de sus cálculos matemáticos, según los cuales es de esperar que, por encima de cierto nivel de interconectividad, los catalizadores químicos que interactúan en un espacio circunscrito constituyan redes autorreplicantes.⁴⁴ Sin embargo, si se asume que las interacciones entre los componentes atómicos o moleculares necesarios para construir una sola célula bacteriana mínima son *aleatorias*, entonces ni siquiera la expansión temporal de los 4600 millones de años de la Tierra a los 15.000 millones de años del universo entero es suficiente.

Como cabría esperar, el misterio de la vida, tal como lo presentan estos cálculos de equilibrio, ha sido esgrimido por el creacionismo científico como evidencia de su naturaleza milagrosa y su origen divino. Antes de que «complejidad» y «autoorganización» se convirtieran en términos de uso común, el Premio Nobel francés Jacques Monod contrastó el azar con la necesidad y escribió sobre la práctica imposibilidad del origen de la vida, que describió como «azar atrapado al vuelo». ⁴⁵ Por improbable que fuera, la vida sólo tenía que surgir una vez. Es más, si no lo hubiera hecho, y no se hubiera desarrollado hasta el punto de hacer que nos maravillamos ante su complejidad, el misterio de unos seres que se maravillan ante el espectáculo de la vida no existiría. Como señala la historiadora y filósofa de la ciencia Iris Fry, la noción de autoorganización ha suavizado algo las dificultades teóricas. La creencia en un origen no sobrenatural de la vida no depende del descubrimiento de una ruta bioquímica concreta que conduzca de la no vida a la vida. Incluso Christian de Duve, otro Premio Nobel, que detesta cualquier vena mística en sus colegas, comete el error de pensar que el descubrimiento de una tal ruta bioquímica sería un golpe mortal para los creacionistas: «Hasta que llegue el día en que los biólogos puedan demostrar un origen de la vida enteramente material, lo divino continuará siendo un oponente». ⁴⁶ No obstante, la creencia en un Dios invisible que controla o inicia los fenómenos, o interfiere en su curso, basada en la fe, se escabulle epistemológicamente y no está obligada a rendirse a la evidencia. Si quisiéramos creer en la intervención divina, podríamos postular que Dios dispuso los componentes prebioló-

gicos de manera que, bajo la influencia del flujo de energía, pudieran tender naturalmente a organizarse en máquinas polipéptido-nucleotídicas recursivas. De hecho, aunque en sus cartas privadas Darwin se entretiene en considerar la posibilidad de una vida surgida de alguna charca cálida, con un surtido completo de sales de amonio y fósforo, en público se muestra más circunspecto, expresándose de forma parecida a como lo haría un creacionista moderno (véase el capítulo 20) en su estimación de que «hay grandeza en esta visión [evolutiva] de la vida, con sus diversos poderes, habiendo sido originalmente insuflada [por el Creador] en unas pocas formas o en una sola».* En el fondo, la creencia en un origen no sobrenatural de la vida también puede ser una fe, pero es una fe estrechamente ligada al empirismo, a una búsqueda de respuestas en un clima de aceptación del error, en suma, al «escepticismo organizado» del método científico.⁴⁷ Ningún hecho o descubrimiento científico puede demostrar la existencia o inexistencia de Dios, y los hechos que rodean el misterio del origen de la vida no son una excepción.

Con todo, debemos recordar que los cálculos habituales de la improbabilidad de que las complejas estructuras autocatalíticas de la vida surjan por puro azar se basan en asunciones de *equilibrio*. La Tierra, sin embargo, una región de energía organizada, no está, ni lo estuvo nunca, en equilibrio. Ciertas configuraciones, composiciones y combinaciones químicas son mucho más probables que otras. El elemento más común en el universo, el hidrógeno, también es el más común en la vida. Esto es una pista. La facilidad de la síntesis de los aminoácidos, los sillares de las proteínas, es otra. En cuanto hay moléculas mayores disponibles, la acción de catalizadores (agentes químicos que aceleran ciertas reacciones, y no otras) también «desaleatoriza» el medio. Y tan pronto como entran en juego la reproducción y la replicación, las tasas de acumulación de factores no aleatorios y combinaciones curiosas se disparan.

Uno de los más profundos pensadores sobre la dificultad filosófica de la autocreación de una red de genes y proteínas mínimamente interconectada es A.G. Cairns-Smith, quien ha comparado el misterio de la primera célula con el descubrimiento de un arco de piedra en medio de un páramo. ¿Podría haber surgido tal cosa de manera espontánea? El problema es que las piedras están colocadas de modo que unas se sustenten sobre las otras, lo cual se asemeja a las intrincadas relaciones de la vida consigo misma, a su interdependencia a nivel químico. Sin embargo, en

* De las seis ediciones que se publicaron en vida del autor (1859, 1860, 1861, 1866, 1869 y 1872), cinco incluyen la segunda edición entre corchetes, si bien las ediciones modernas suelen referir la redacción original de Darwin. (*N. de los AA.*)

lugar de concentrarse en el misterio de la autosustentación de esta estructura autodependiente, Cairns-Smith sugiere que el arco —y, por analogía, la vida— es el remanente de una estructura más grande, la mayor parte de la cual ha desaparecido. Esta idea constituye un cambio de rumbo filosófico radical en la comprensión del origen natural de la complejidad de la vida. En vez de multiplicar el espacio de posibilidades hasta abarcar el universo entero, pero sin dejar de mantener la asunción obsoleta del equilibrio químico, Cairns-Smith nos hace ponderar la existencia de una estructura de no equilibrio más antigua, de la que la vida bacteriana es un resto. Fue esta línea de pensamiento la que le llevó a enunciar su teoría del origen mineral. El mineral específico que Cairns-Smith identificó como «andamiaje» de la complejidad autocatalítica de la que la vida es un resto, el equivalente de un arco de piedra, es la arcilla. En una narración con reminiscencias tanto del relato bíblico de la creación de Adán como de la propia imagen del arco de piedra, sugirió que las superficies arcillosas podrían haber puesto en marcha la química replicativa. Y en cierto momento debió de producirse una «suplantación genética» del andamiaje recursivo primordial. Perdida la primera parte de la historia, que no es otra que la historia de nuestros propios orígenes, nos sentimos aturdidos por la intrincación de nuestras conexiones, que podrían no haber surgido todas de golpe, tal como apunta Cairns-Smith.

Por desgracia para la teoría de Cairns-Smith, que éste articuló con gran extensión, no hay evidencia experimental de ninguna química replicativa o vía protometabólica sobre las superficies arcillosas. No obstante, su teoría parece cada vez más vindicada en términos generales: la vida puede muy bien ser el remanente de sistemas termodinámicos en gran medida desaparecidos. Es más, hay intrigantes evidencias de que aquellos sistemas metabólicos prerreplicativos se originaron cerca de gradientes relacionados con superficies minerales. No obstante, el mineral no era arcilla, sino pirita (sulfuro de hierro, FeS), también conocida como «el oro de los tontos».

En febrero de 1977, el biólogo Jack Corliss, acompañado por dos colegas viajó, a bordo del sumergible *Alvin*, al fondo del océano Pacífico para observar la actividad volcánica submarina. Hasta entonces nadie había visto chimeneas submarinas, grietas en la corteza terrestre por donde sale magma caliente y se filtra agua fría de mar. Tampoco nadie había visto vida en las inmediaciones de estas chimeneas. Pero al cabo de noventa minutos de sondear las profundidades, Corliss y sus colegas dieron con las chimeneas hidrotermales submarinas. Corliss divisó una reverberación en el agua, como los espejismos de una llanura en un caluroso día de verano. Aunque se encontraban a kilómetro y medio de la superficie,

allí donde el agua debería estar a una temperatura cercana a los 0 °C, el brazo mecánico del *Alvin* registraba 44 °C, la temperatura de un baño caliente. La causa de la reverberación era una cortina de agua caliente ascendente. Sobre la dorsal de las Galápagos, la cordillera volcánica submarina situada a trescientos kilómetros al oeste de la costa de Ecuador, Corliss había encontrado un misterioso ecosistema que prosperaba en la oscuridad, y que sustentaba peces ciegos, moluscos, crustáceos de largas patas y bacterias oxidadoras del azufre. Desde entonces se han descrito numerosos ecosistemas parecidos en la vecindad de las chimeneas submarinas. Algunos son tan exuberantes como los jardines de la Atlántida, aunque sin humanos: se trata de auténticos «jardines del pulpo a la sombra» (como decía la canción de The Beatles), repletos de bacterias del hierro y del azufre, y de gusanos tubícolas gigantes con cabezas de un rojo vivo, ondeando como pelos metamorfoseados de la cabeza enterrada de Medusa. Cangrejos blancos y ciegos corretean sobre la lava almohadillada (lava solidificada en forma de almohadillas por el contacto con el agua fría). El ecosistema de Corliss resultó ser ciertamente oscuro: aparte de los detritos llovidos desde la superficie, toda la vida presente se sustentaba en reacciones metabólicas que ocurrían en la oscuridad. Los gases sulfurosos emitidos por las chimeneas, también llamadas «fumarolas negras», «alimentaban» a las bacterias quimiotróficas que se encontraban en la base del ecosistema. Algunos de los organismos presentes, como los cangrejos ciegos, seguramente descendían de formas evolucionadas más cerca de la superficie, pero otros parecían tan adaptados a estos puntos calientes a lo largo de todo el lecho oceánico que era probable que ninguno de sus ancestros hubiera visto alguna vez el Sol. Los pogoñóforos (los gusanos gigantes) eran rojos debido a que su sangre contenía una hemoglobina especial, cuya molécula estaba modificada para captar y neutralizar los venenosos iones sulfurosos. Los organismos que vivían del gradiente sulfuro-oxígeno, en lugar de obtener la energía de la luz o la materia orgánica, la obtenían de un gradiente químico muy antiguo, lo cual inspiró en Corliss la idea de que la vida podría haber comenzado en dicho escenario. La noche después de su inmersión en el *Alvin*, Corliss se retiró a su camarote y comenzó a redactar notas para un artículo sobre el origen de la vida en las chimeneas submarinas (figura 12.2).⁴⁸

Asombrado ante tanta exuberancia en lo que debería haber sido un desierto submarino, Corliss se preguntó si ámbitos similares podrían haber jugado un papel en el origen de la vida. Después de todo, el sulfuro de hidrógeno que vomitaban los volcanes y escapaba por las grietas de la superficie terrestre habría estado más presente en una Tierra joven y todavía caliente, un planeta con una gran actividad tectónica cuya rápida

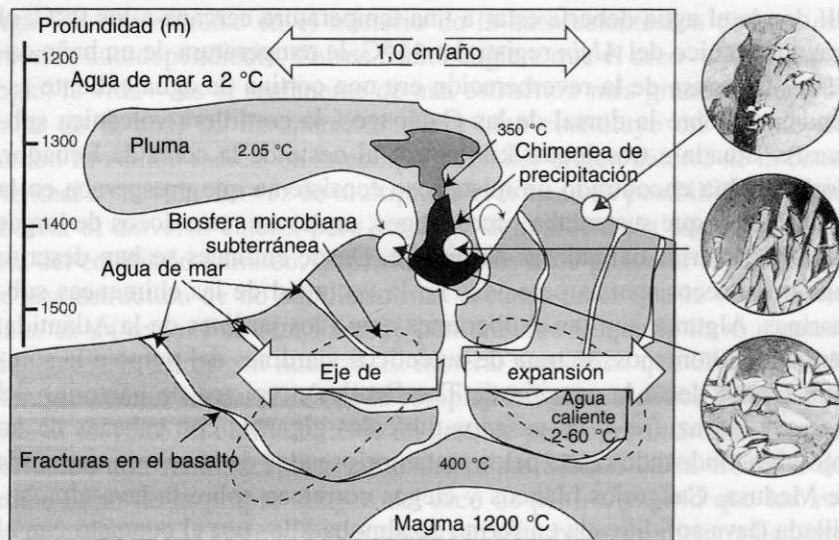


Figura 12.2. Una chimenea submarina y su fauna asociada. Estas chimeneas se localizan a lo largo de dorsales oceánicas en expansión que circundan la Tierra. El agua caliente rica en azufre que emana de estas chimeneas se mezcla con las aguas profundas, oscuras y frías del lecho oceánico. Asociados con estas fuentes termales submarinas hay extensos ecosistemas no sustentados por la energía solar, sino por reacciones quimiosintéticas. Muchos creen que estos sistemas son el crisol de la vida primigenia.

rotación se completaba en sólo diez horas, de manera que los días y las noches duraban sólo cinco horas. Además, el bombardeo meteorítico de Mercurio, Venus y Marte (no hay más que mirar lo acribilladas que están las superficies de la Luna y de Marte) sugiere que la Tierra también fue víctima de la violencia cósmica. Su superficie se habría visto arrasada en el periodo en que supuestamente se originó la vida. Corliss vio claramente que en el fondo del océano podían desarrollarse jardines exuberantes: allí la vida podía eludir la violencia de la superficie y sobrevivir en el equivalente primigenio y no planeado de los refugios antibombas. Así protegidos, tanto del bombardeo meteorítico (a veces equivalente a una guerra nuclear, o incluso peor) como de la oxidación molecular (la cual pudo haber sido lo bastante severa como para que los radicales libres diezmasen los compuestos orgánicos primigenios), los aminoácidos y nucleótidos de la vida habrían podido adquirir complejidad. Como subrayó Oparin, la vida no podría reoriginarse en la atmósfera actual debido a la presencia de oxígeno altamente reactivo y de microbios hambrientos, que la condenarían a una muerte prematura. Aparentemente, con todo, la at-

mósfera primitiva también era demasiado reactiva para que las moléculas orgánicas no se oxidaran prematuramente. Los mismos meteoritos que acribillaron el sistema solar interior durante el violento origen de la Tierra (incluso se ha sugerido que algunos de los impactos vaporizaron los océanos más de una vez) contenían compuestos orgánicos. El análisis del meteorito Murchison, caído en Australia en 1969 —el mismo año en que la humanidad aterrizó sobre la superficie de la Luna—, reveló que contenía aminoácidos, nucleótidos y otros compuestos orgánicos. Algunos meteoritos contienen hasta un 5% de compuestos orgánicos. En 1986, sondas espaciales europeas y soviéticas verificaron que el cometa Halley era aún más rico en compuestos orgánicos naturales, ya que éstos constituían casi un tercio de su masa. No obstante, estas ricas fuentes de material prebiótico se habrían quemado al entrar en la atmósfera terrestre, por lo que no habrían podido dejar cantidades suficientes de compuestos orgánicos para la «sopa primordial» de Oparin. Las partículas de polvo interplanetarias, de menos de diez micras, que entran en la atmósfera flotan durante meses o incluso años antes de posarse. Aviones espía U2 modificados han recogido muestras de esta potencial fuente alternativa de material prebiótico. Pero estas partículas son orgánicas en tan sólo un 10 %, y habrían sido destruidas en los episodios de bombardeo meteorítico, los cuales habrían ocasionado periódicamente la evaporación de la capa superior (decenas de metros) de los océanos.

Las fumarolas negras ofrecían un refugio seguro, suponían un respiro y un alivio; eran un oasis natural a salvo de toda aquella destrucción. Como sugieren los experimentos de Miller, la síntesis de compuestos orgánicos requiere precursores suficientes y una fuente de energía. Un exceso de energía, sin embargo, puede resultar más destructivo que constructivo. El origen de la vida, así como su continuación, precisaban de fuentes estacionarias de flujo de energía. Las chimeneas no sólo ofrecían un refugio apartado de la oxidación y el tumulto de la superficie (donde podían evolucionar los precursores macromoleculares de la vida después del último bombardeo a gran escala), sino también una fuente de energía estacionaria.

Las rocas supercalentadas que crujen en el centro de una chimenea submarina están a 1300 °C, en marcado contraste con los 40 °C del lecho oceánico que las cubre. Una chimenea, desde su base en contacto con la roca fundida hasta su cúspide, puede ser comparada con una enorme cámara de reacción continua. Con su medio kilómetro de altura en algunos casos, está a la vez circunscrita y expuesta a un gradiente de temperatura continuo que provoca reacciones químicas, algunas quizá catalíticas, entre el azufre, el hierro, el carbono, el oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno.

Corliss, suscribiendo una página del libro de Cairns-Smith, apunta que este crisol habría preservado en su parte superior los compuestos sintetizados en su base a mayores temperaturas y presiones. El agua de mar infiltrada en las fracturas de la cámara de reacción natural podría haber preservado algunos compuestos complejos, macromoléculas y polímeros recién formados, enfriándolos y llevándolos junto a superficies arcillosas a las que podrían haberse adherido. Entretanto, la arcilla, como sugiere Cairns-Smith, podría haber constituido algo más que un medio inerte. La arcilla es una sustancia cristalina que, como la escarcha del vidrio de una ventana, se forma de manera natural por la meteorización de la roca. Lo verdaderamente interesante de estas superficies activas es que en ellas podría haberse iniciado un proceso de selección aun antes de la vida. Continuamente energizadas, sólo habrían «sobrevivido» aquellas formaciones orgánicas con más capacidad para mantener su estructuración y adherirse a las paredes de las chimeneas. Por tanto, antes de que la vida surgiera, sus precursores podrían haberse seleccionado por sus propiedades adhesivas, que se tornarían muy útiles cuando la vida se hizo más completamente coloidal, autoadhiriéndose a medida que se independizaba de los entornos sulfurosos de su presunto origen.

Así pues, es posible que ciertos compuestos orgánicos se seleccionaran por sus propiedades de mantenimiento y adherencia a las superficies minerales que constituyeron su entorno original. Este provocativo cuadro sigue siendo altamente especulativo en lo que concierne a los orígenes «sulfurosos» de la vida. Aunque las chimeneas oceánicas por las que fluye agua rica en sulfuros de hidrógeno y metálicos pueden proporcionar un entorno reductor, Miller argumenta que las condiciones que favorecían la síntesis de compuestos orgánicos en estos escenarios también habrían contribuido a fragmentarlos y diluirlos. Sin embargo, es evidente que esto no es cierto, ya que las aguas de dentro de las chimeneas y en torno a ellas son ricas en compuestos orgánicos y vida. Pero hay otras razones para elegir las chimeneas como localización favorita de la emergencia de la vida.

Los jardines de Corliss son sólo el primero de los «cuatro descubrimientos experimentales» mencionados por Dyson que vinieron a presentarnos un nuevo cuadro del origen de la vida.⁴⁹ El segundo es el descubrimiento de bacterias que viven en el frío y oscuro entorno de los poros de cilindros de roca procedentes de las perforaciones más profundas que se han practicado hasta la fecha. El excéntrico astrofísico Thomas Gold, de la Universidad de Cornell, ha extrapolado este descubrimiento para postular una «biosfera profunda caliente», con una biomasa estimada comparable a la de la biosfera superficial con la que estamos familiariza-

dos.⁵⁰ El tercer descubrimiento experimental comprende «fenómenos llamativamente bioafines observados en el laboratorio cuando se vierte agua caliente saturada de sulfuros de hierro solubles en un entorno de agua fría.⁵¹ Los sulfuros precipitan como membranas y forman burbujas gelatinosas. Éstas parecen posibles precursores de las células vivas. Las superficies de las membranas adsorben moléculas orgánicas en solución, y los complejos metal-sulfuro catalizan una variedad de reacciones químicas en las superficies».⁵² Morowitz discrepa de Eigen y aduce que los lípidos, que proporcionan envolturas para el desarrollo de la complejidad, fueron cruciales en el origen de la vida.⁵³ El cuarto descubrimiento que contribuye al nuevo cuadro del origen de la vida el cual nos parece convincente, aunque, por supuesto, no lo consideramos probatorio es que los linajes de bacterias arcaicas son en su mayoría termófilos. Dicho de otro modo, son capaces de crecer y medrar en aguas casi hirvientes.⁵⁴ Estos «extremófilos» han llamado la atención de los medios de comunicación no sólo porque sugieren cuán resistente era la vida primigenia y cuán extendida puede estar la vida actual, sino también porque parece probable que estos recios organismos pudieran sobrevivir en el espacio. Sobre la base de la hipotética secuencia del ARN ribosómico del ancestro común más reciente de las bacterias metanógenas, las termófilas y otras arqueobacterias, el biólogo Carl Woese ha concluido que los extremófilos más primitivos muy probablemente poseían un metabolismo basado en el azufre.⁵⁵

La versión más sofisticada de la hipótesis del azufre (la idea de que la vida evolucionó en el refugio seguro ofrecido por las chimeneas submarinas y los gradientes asociados, tal como teorizó Corliss) ha sido esbozada por el químico orgánico alemán Günter Wächtershäuser. Karl Popper animó a éste, un abogado de patentes, a rechazar «la imaginada necesidad de derivar la biología de la química».⁵⁶ La actitud de Wächtershäuser ante el problema del origen de la vida es similar a la de Morowitz. Ambos equiparan la teoría del origen de la vida a una teoría del desarrollo de vías químicas específicas; ambos buscan rasgos universales de las células actuales para reconstruir vías metabólicas ancestrales compartidas; y, por último, ambos buscan una «tabla bioquímica históricamente ordenada».⁵⁷ La principal diferencia es que Wächtershäuser acepta que la vida podría haber surgido en las grietas y recovecos de las paredes de las chimeneas submarinas, sin necesidad de envoltura celular. Esta propuesta compone un fascinante cuadro de nuestros orígenes, en el que, incluso antes de que los ciclos químicos prebióticos hubieran adquirido una mínima fidelidad replicativa real, ya operaba una suerte de selección natural. Las reacciones químicas que se propagaran y se adhirieran a los conductos del gradiente submarino habrían prosperado. Finalmente, las

propiedades adhesivas de los ciclos dominantes podrían haber favorecido a los glutinosos ancestros coloidales de las células, permitiéndoles adherirse mutuamente y separarse del sustrato mineral.

El uso de iones metálicos por parte de los catalizadores actuales constituye un posible indicio de este origen abisal y sulfuroso de la vida. En el cuadro de Wächtershäuser, los primeros organismos eran quimioautotróficos, por lo que no necesitaban alimento orgánico (como tampoco lo necesitan las bacterias oxidadoras del azufre de los océanos actuales). Puesto que algunos cálculos sugieren que los compuestos orgánicos se descompondrían más deprisa de lo que se formarían, Wächtershäuser, al igual que Cairns-Smith anteriormente, prioriza las superficies minerales. La pirita es un mineral de hierro muy estable presente en las rocas sedimentarias más antiguas. Wächtershäuser constató que «la reacción común en la que se sintetiza pirita a partir de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y una sal de hierro (FeS), ambas sustancias muy difundidas en la Tierra primordial, conduce a la liberación de hidrógeno y energía [...]. El hidrógeno liberado proporciona el poder reductor necesario para la síntesis de moléculas orgánicas, a partir del dióxido de carbono, en la Tierra primordial».⁵⁸ De esta manera, Wächtershäuser resuelve el problema de producir compuestos orgánicos si en el entorno ancestral faltaban los gases ricos en hidrógeno necesarios para la síntesis de compuestos hidrocarbonados. El químico alemán afirma respecto a sus teóricas reacciones químicas conducentes al origen de la vida que son «remolcadas por la pirita», porque dependen del poder reductor liberado durante la síntesis de disulfuro de hierro.⁵⁹ De acuerdo con Wächtershäuser, la superficie de la pirita, con carga eléctrica positiva, ligaría el dióxido de carbono negativamente cargado, y fijaría los productos orgánicos de la reacción entre el hidrógeno y el dióxido de carbono producida durante su formación. La energía y el hidrógeno liberados durante la síntesis de pirita se combinan con la fijación del dióxido de carbono y los compuestos hidrocarbonados a la pirita, formando un «metabolito de superficie» que al principio depende de la síntesis de pirita pero luego se separa del sustrato mineral. Según Wächtershäuser, a diferencia de la vida celular subsiguiente, las moléculas negativamente cargadas se difundían lateralmente, a través de la superficie mineral, hacia cristales de pirita vacantes, a veces separándose de la superficie. De manera provisional, Wächtershäuser sitúa ciclos metabólicos específicos (como el ciclo reductor del citrato, del que se piensa que es el más antiguo ciclo de fijación de carbono autocatalítico) en su escenario, el de un cofre lleno de «oro de los tontos» bajo el mar. Su predicción de que el sulfuro de hierro reaccionaría con sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono para formar metil-tiol, considerado un intermedia-

rio y relacionado con otros compuestos químicos en la fotosíntesis de aminoácidos, ha sido confirmada.⁶⁰ Aunque sus ideas han sido descartadas por algunos⁶¹ y su modelo de la pirita ha sido criticado por asumir cantidades poco realistas de monóxido de carbono y no proporcionar aminoácidos, lo cierto es que se ha conseguido sintetizar aminoácidos en condiciones de alta temperatura análogas a las de las chimeneas submarinas. La teoría de Wächtershäuser ha sido complementada por Michael Russell y sus colegas, de la Universidad de Glasgow, que han propuesto la aparición de «burbujas» constituidas por membranas coloidales de sulfuro de hierro, las cuales podrían haber actuado como protocélulas. De este modo se allanaría el camino desde la química autotrófica del sulfuro de hierro hasta la vida propiamente dicha.⁶²

A pesar de su atractivo, no está claro que la propuesta de Wächtershäuser sea correcta. Aun así, ilustra un punto de gran importancia: ¿por qué es tan complicada la vida? Dyson hace la siguiente reflexión:

«El concepto de homeostasis puede transferirse sin dificultad del contexto molecular a los contextos ecológico, económico y cultural. En cada ámbito tenemos el hecho no explicado de que los mecanismos homeostáticos complicados son más preponderantes y parecen más efectivos que los simples [...]. Esto es espectacularmente cierto en el dominio de la ecología [...], pero se aprecia un fenómeno similar en la economía de mercado y en la sociedad culturalmente abierta, con todos sus fallos y deficiencias [...]. En el principio, digo, estaba la complejidad. Desde el principio, la esencia de la vida fue la homeostasis basada en una complicada red de estructuras moleculares. Por su propia naturaleza, la vida es resistente a la simplificación, ya sea al nivel de las células, de los sistemas ecológicos o de las sociedades humanas. La vida sólo podía tolerar un aparato molecular de replicación precisa incorporándolo a un sistema de traducción que permitiese que la complejidad molecular de la red molecular se expresara en forma de software. Tras la transferencia de la complicación del hardware al software, la vida continuó siendo una complicada red interconectada de la que los replicadores eran sólo un componente. Los replicadores nunca ejercieron tan firmemente el control como imaginó Dawkins [...] (unos replicadores que intentaban imponer sus propósitos egoístas a la red entera y la voz de la homeostasis que tendía a maximizar la diversidad de estructura y la flexibilidad de función)».⁶³

La intrincada interconectividad de la vida, su autorrelación holística, su «nexo causal», como dijo Kant,⁶⁴ es el resultado no de un artista hu-

mano consciente (los artistas humanos podrían copiar la *superficie* de la vida, y los ingenieros podrían copiar *ciertas* funciones mecánicas de los organismos, pero no la totalidad funcional), sino de los sistemas termodinámicos alejados del equilibrio.

Los filósofos jónicos que comenzaron a buscar leyes y regularidades en la naturaleza dieron en el clavo cuando se les ocurrió la idea de los átomos en el vacío. Esta abstracción tan útil hizo algo más que promover la objetividad y la observación a fondo de la naturaleza: introdujo el prejuicio mecanicista (criticado por Aristóteles; véase el capítulo 20) de que las complejidades son el resultado de la suma (pieza a pieza, en términos de la práctica humana) de cosas más simples. Al contemplar una célula de Bénard vemos que no es así. Los procesos complejos —y la vida es uno de ellos— no surgen de la construcción mecánica, sino de la coherencia en el seno de un flujo de energía. La materia describe ciclos, y aparecen formas sin marcadores conscientes en el dominio de influencia de los gradientes. Y este «prejuicio jónico», como podríamos llamarlo, no se aplica únicamente a los procesos complejos, sino también a las cosas. Clifford Matthews defiende desde hace tiempo la impopular idea de que los polímeros primordiales (incluidos los aminoácidos de los experimentos de Miller) derivan de precursores complejos, «ancestros proteínicos» heteropolipeptídicos formados directamente a partir de polímeros de cianuro de hidrógeno y no por polimerización (la fusión de monómeros aminoácidos individuales). Aunque la hipótesis del origen de la vida de Matthews requiere una Tierra reductora, algo que actualmente no está de moda, hay muchos motivos para recomendarla. El cianuro (HCN) reacciona fácilmente consigo mismo para formar poliaminomalonitrilo, un «polímero progenitor» que puede convertirse, con más cianuro y agua, en las cadenas principales y laterales de las proteínas. Los colores pardo, negro, amarillo y naranja creados en los experimentos con cianuro no sólo se asocian a aminoácidos como la alanina y el ácido glutámico, componentes habituales de las proteínas, sino que recuerdan sospechosamente las superficies de Júpiter, Saturno, Titán (la luna gigante de Saturno) y otros cuerpos celestes (que se han vuelto familiares desde las misiones Pioneer y Voyager). Matthews sugiere que «la costra negra que cubre el núcleo del cometa Halley muy probablemente consiste en gran parte en polímeros de cianuro, una conclusión sustentada por la detección en su cola de cianuro de hidrógeno libre, montones de radicales de cianuro y partículas sólidas compuestas sólo de H, C y N». ⁶⁵ Matthews predice que el material cometario traído por la misión Stardust en 2005 confirmará su tesis de que los polímeros de cianuro son ingredientes principales de la superficie del Halley: «La Tierra primitiva muy bien pudo estar cubierta

de polímeros de HCN y otros compuestos aportados por el bombardeo de bólidos y/o reacciones fotoquímicas en la atmósfera. En un medio acuoso y reductor, la vida emergió de este polvo vital, trenzada del aire por la luz». ⁶⁶ Irónicamente, Matthews cree, y estamos de acuerdo con él, que su tesis de las moléculas más complejas en primera instancia es de hecho más simple que sus alternativas. La presencia de minerales oxidados en la Tierra primigenia no significa que no hubiera entornos reductores, como demuestran las emisiones ricas en hidrógeno de las chimeneas submarinas. El cianuro y sus polímeros también pueden encontrarse burbujeando en las chimeneas oceánicas. Como señala Iris Fry, una observadora erudita pero neutral en este debate, las diversas teorías a menudo son más complementarias de lo que reconocen sus partidarios. La construcción de una red causal perfectamente funcional y autosostenible de nucleótidos y proteínas es imposible de imaginar a la manera de la ingeniería típicamente humana, como el montaje pieza a pieza de una construcción de complejidad abrumadora. Parece mucho más natural cuando se contempla como el fruto de un proceso de reducción de gradientes.

Las teorías científicas son producto de la imaginación (imaginación informada). Van más allá de su dominio para predecir la existencia de fenómenos previamente insospechados. Generan hipótesis, conjeturas disciplinadas sobre temas inexplorados cuyos parámetros ayudan a definir. Las mejores teorías generan las hipótesis más fructíferas, que se traducen limpiamente en preguntas que pueden responderse mediante la observación y el experimento. Las teorías y sus hipótesis hijas compiten por los datos disponibles, que son el recurso limitante en la ecología del conocimiento científico. Las supervivientes en este entorno tumultuoso son las vencedoras darwinianas, bienvenidas al canon, que se instalan en nuestras mentes, guiándonos en la exploración ulterior de la realidad física. Más sorpresas. Y sí, más poesía.

E.O. Wilson

Ciencia huérfana

Aunque tener en cuenta los gradientes puede ayudarnos a comprender la distribución de los elementos en el sistema solar, las vicisitudes atmosféricas y los flujos de energía primordiales que promovieron la evolución de las protocélulas, es en el análisis de los ecosistemas donde la teoría de reducción de gradientes demuestra su valor con más claridad. La termodinámica del no equilibrio arroja una luz resplandeciente sobre el funcionamiento de los ecosistemas, así como sobre nuestro cada vez más precario lugar en ellos. Las selvas ecuatoriales no son sólo bellos almacenes de numerosas especies estrechamente interconectadas y sus amenazados genes (algunos de los cuales pueden ser la clave para futuras medicinas). También son los reductores de gradientes más efectivos. Estas comunidades clímax refrigeran el planeta. A diferencia de las ciudades o los desiertos, las selvas generan nubes de lluvia, el equivalente natural de acondicionadores de aire gigantes en el ecuador. Sin estas junglas productoras de nubes, la superficie terrestre sería localmente, y quizá también globalmente, mucho más cálida. Sin selvas, la Tierra podría calentarse tanto que resultaría inhabitable para las personas. Muchos organismos, sin embargo, sí sobrevivirían en un planeta más caliente. Hay microbios que viven en fuentes de aguas sulfurosas hirvientes y crecen en las paredes de los reactores nucleares. Por únicos e inteligentes que seamos, los seres humanos no vamos a destruir la biosfera. A pesar del daño

infligido por nuestra especie, como la extinción de grandes mamíferos y la transformación de bosques y praderas en desiertos termodinámicamente menos eficientes (por ejemplo, el sobreexplotado Sahara), la mayor amenaza de las actividades humanas no se cierne sobre las otras especies. Como ha señalado el activista Wendell Berry, la «crisis medioambiental» no es una crisis del medio ambiente, sino de nosotros mismos.¹ Talar los bosques refrigerantes, lo cual llevamos a cabo bajo nuestra propia responsabilidad,² destruye el medio ambiente primordial, las junglas y sabanas donde se gestaron nuestros ancestros primates.*

Los ecosistemas son procesos disipativos de no equilibrio. La clase de energía requerida por los organismos para mantener sus cuerpos, su metabolismo, está estrictamente limitada. La lista incluye luz (fotoautotrofia), energía química orgánica (heterotrofia) y un número muy limitado de fuentes de energía química inorgánica (la oxidación de sulfuros a azufre o sulfatos, de metano a dióxido de carbono, de amoníaco a compuestos nitrogenados oxidados, de hidrógeno a agua). El calor, un producto de desecho termodinámico más o menos equivalente a la entropía, no está en esa lista. Los organismos también necesitan materiales para construir sus cuerpos. La energía se consume; el nutrimento se transforma en la materia prima del cuerpo. Una de las razones por las que tendemos a confundirnos sobre esto es que el metabolismo animal no distingue entre nutrimento y energía. En los animales, la fuente de energía y de nutrimento es la misma (la materia orgánica). En las plantas, en cambio, las fuentes de energía y nutrimento son diferentes: la luz solar es la fuente de energía, mientras que el dióxido de carbono, convertido químicamente en azúcares y otras sustancias, es la fuente de nutrimento. Finalmente, si la fuente de nutrimento es el dióxido de carbono, hace falta una fuente de electrones (átomos de hidrógeno) para reducir el carbono y convertirlo en material celular.

A la vez que captan energía solar de alta calidad, las plantas reciclan los elementos químicos requeridos por la vida (hidrógeno, carbono, oxígeno, fósforo, nitrógeno, azufre y unos cuantos más), almacenan energía en biomoléculas y sintetizan las estructuras proteínicas de los seres vivos sensitivos. Algunos elementos esenciales para la vida son limitantes y de-

* Las palabras ecosistema y ecología derivan de la raíz griega *oikos*, que significa casa. La ecología, el estudio científico de esta casa, es distinta del ecologismo, el movimiento activista para la preservación o restauración del medio ambiente. Por un lado, muchos ecólogos que han contemplado la desastrosa gestión de los ecosistemas (tala de bosques, pastoreo excesivo, sobrepesca, etcétera) se han dedicado a advertir sobre los efectos de tales actividades, desde un punto de vista científico. Por otro lado, así como ser físico no lo convierte a uno en miembro del movimiento antinuclear, el término ecología, usado con propiedad, está desprovisto de connotaciones políticas. (*N. de los AA.*)

ben traerse desde muy lejos. Los hongos de los bosques, por ejemplo, asimilan el fósforo traído del mar a través de los esqueletos de los salmones que nadan río arriba y son devorados por los osos, cuyas heces son recicladas por hongos, bacterias y plantas. Si los ecosistemas, por definición, reciclan la mayor parte de sus elementos dentro del propio sistema, el alcance del reciclado ecosistémico puede ser muy amplio, y los ecosistemas pueden superponerse. Las redes cíclicas anidadas de la vida van desde el metabolismo celular hasta el superecosistema vivo y en desarrollo que denominamos «biosfera». De cualquier biosfera extraterrestre también cabría esperar que fuera un mundo de no equilibrio que manifestase reciclado y desarrollo, así como la tendencia a un incremento de la biodiversidad y de la eficiencia metabólica. Teóricamente, estos otros mundos en evolución dentro de nuestro universo energético podrían descubrirse mediante la detección de la presencia simultánea de gases reactivos en atmósferas metaestables fuera del equilibrio termodinámico. Ésta es una de las señales a las que atiende la NASA en sus nuevos protocolos astrobiológicos para la búsqueda de otras formas de vida sin un sesgo abiertamente humano. Los telescopios mejorados y la reciente detección de numerosos planetas en otros sistemas solares aumenta las posibilidades de detección termodinámica de vida extraterrestre.³

De la ecología se ha dicho que es una ciencia huérfana. En contraste con la física teórica, las ciencias del espacio y el proyecto genoma humano, la ecología atrae poco dinero. El presupuesto federal de Estados Unidos para la ecología teórica se cuenta en decenas de millones de dólares anuales, mientras que los campos antes citados recaban decenas de miles de millones de dólares. ¿Por qué merece tan poca atención la ecología, la ciencia que se ocupa de la casa donde vivimos? Tal vez porque los ecosistemas no tienen nada de extraordinario. La familiaridad puede generar desdén: los ecosistemas que nos sustentan no son ni imponentemente grandes ni encantadoramente pequeños. No evocan tiempos antiguos ni hacen historia. Se encuentran aquí y ahora, están a nuestra escala, ante nosotros.

Por si fuera poco, la ecología tiene otros problemas añadidos. Enfangada en la política, se asocia con los conservacionistas, los antiglobalizadores, los amantes de la naturaleza y hasta los ecoterroristas. Además, el poder predictivo de la ecología ha sido mínimo. Por ejemplo, nadie sabía qué efecto tendrían los lobos sobre el ecosistema de Yellowstone antes de que fueran liberados. Ninguna teoría ecológica predice con precisión las tasas de recuperación de los ecosistemas costeros tras un vertido de

petróleo. El estado de la ecología predictiva quedó en evidencia recientemente en el Parque Nacional de Yellowstone, una extensión de 4 millones de hectáreas en la región septentrional de las Montañas Rocosas. En 1995 se reintrodujeron lobos en el ecosistema, con poca previsión de la cascada trófica que seguiría. Aunque ha transcurrido poco tiempo desde la reintroducción de estos depredadores, ya se han observado numerosos efectos ecológicos directos e indirectos. Uno de los más sorprendentes ha sido un decrecimiento del 50 % en la población de coyotes. Los lobos eliminan los coyotes, que compiten con ellos por el mismo nicho ecológico. Pueden cavar durante días para acceder a una madriguera de coyotes y matar crías y adultos. Por término medio, los lobos sólo consumen un 50 % de sus presas, dejando el resto a carroñeros como los osos grises, los cuervos y los coyotes. Se sabe que, inesperadamente, los osos grises han dejado de hibernar, porque ahora disponen de alimento en los meses de invierno. Los ecólogos sabían que los lobos tendrían un impacto sobre la población de ciervos, de los que se esperaba que fueran su principal fuente de alimento. Lo que no se esperaba es que los ciervos abandonarían las áreas ribereñas expuestas (como las verdes y frondosas áreas junto a ríos y arroyos) donde casi habían acabado con las arboledas de álamos y chopos. En el Lamar Valley, una floreciente población de álamos y chopos jóvenes proporciona ahora alimento y cobijo a los castores, que durante mucho tiempo habían estado ausentes del río Lamar. Los castores construyen presas, las cuales atraen a ratas almizcladas, nutrias, alces y patos que se aprovechan de las aguas tranquilas. Este incremento local de diversidad es sólo uno de los efectos imprevistos que ocurren en cascada tras la adición de una sola especie a un ecosistema. Un ecosistema simple con sólo veinte especies en interacción genera del orden de $2,4 \times 10^{18}$ conexiones posibles directas e indirectas.

Aun así, la ecología es una ciencia genuina. Se han confeccionado mapas de diversidad global que evidencian depresiones de la diversidad junto con «puntos calientes» de diversidad inusualmente elevada. La ecología de poblaciones estudia las interacciones entre especies, la ecología pesquera trata los bancos de peces y sus entornos, la ecología de hormigas se ocupa de las poblaciones de hormigas, y otras subdisciplinas ecológicas se concentran en especies, ambientes y modos de vida particulares. Podemos encontrar la ecología alpina, la ecología abisal, la ecología evolutiva, la ecología humana, la autoecología (que estudia la respuesta de las poblaciones a variables medioambientales), la ecología de microecosistemas y la ecología microbiana.

Técnicamente, la ecología energética constituye una de estas subdivisiones. Pero es dentro de la «subdivisión» de la ecología energética —la

termodinámica de la vida— donde comenzamos a entender las fuerzas generales que conforman el desarrollo de los ecosistemas. De hecho, la biosfera entera es un ecosistema, lo cual significa que nuestra discusión del modo en que la energía conforma la evolución ya era una discusión sobre el impacto de la termodinámica en la ecología al nivel más global, el planetario.

Alfred Lotka, Eugene Odum, Howard Odum, Ramón Margalef, Jeffrey Wicken, Robert Ulanowicz y James Kay, entre otros, han contribuido a demostrar que el flujo de energía guía el desarrollo ecosistémico, que tras las tendencias evolutivas subyacen los principios de la física. Otros biólogos anteriores ya lo habían vislumbrado: el evolucionista francés Jean-Baptiste-Pierre-Antoine de Monet de Lamarck escribió sobre la «potencia de la vida», y el filósofo inglés Herbert Spencer habló de una «ley universal de la evolución» consistente en un incremento de la complejidad basado en la energía. Estas teorías, sin embargo, eran intuitivas o filosóficas en lugar de empíricas. Entre las grandes ideas que recientemente han conectado la vida con la termodinámica se encuentran: la entropía negativa de Schrödinger; la «ley de máxima producción de entropía» de Rod Swenson,⁴ ex representante de la banda punk Plasmatics, las advertencias alarmistas del economista Nicholas Georgescu-Roegen y el escritor Jeremy Rifkin acerca de una inminente muerte térmica económica (reflejo de la crisis del petróleo de los años setenta);⁵ la idea antientrópica de Frank J. Tipler de que la ingeniería genética y la informática se aliarán con unos recursos energéticos inagotables para crear a Dios en el futuro lejano;⁶ la vinculación de la entropía informacional a la especiación por parte de Daniel Brooks y E.O. Wiley;⁷ la «ley evolutiva universal» de Ilya Prigogine; y la pretensión de Stuart Kauffman de haber descubierto una cuarta ley de la termodinámica.⁸ A partir de la simple observación fundacional de la termodinámica (el calor fluye del cuerpo más caliente al más frío), los pioneros de la disciplina dedujeron el agotamiento inexorable del universo entero. Como reacción ante esta conclusión prematura, los pronosticadores modernos han tendido a enfatizar casi lo contrario, esto es, la capacidad inagotable del universo (a pesar de las grandes distancias interestelares, la expansión del cosmos y la incompletitud de nuestro conocimiento) de albergar vida.⁹ El gran Mark Twain dijo: «Hay algo fascinante en la ciencia. Uno obtiene enormes rendimientos de conjeturas a partir de una inversión factual insignificante».¹⁰

La vida está conectada con la energía, es contingente sobre ella y está organizada por ella. Pero el cómo no siempre ha estado tan claro.

El conocimiento de la profunda relación existente entre la energía y la vida partió de observaciones simples. Tras dos siglos contemplando organismos y paisajes, se habían descubierto numerosas pautas. Uno de los primeros en describirlas fue Henry David Thoreau, en la edición de 1860 de la feria ganadera anual de la Sociedad Agrícola de Middlesex, en Concord, Massachusetts.¹¹ Agudo naturalista, Thoreau refirió cómo los campos abandonados se convertían en herbazales, después en matorrales y, finalmente, en arboledas de pinos y hayas. Los árboles de crecimiento rápido que no toleran la sombra daban paso a árboles longevos de madera dura, bosques de robles, nogales y arces. Al cabo de observaciones repetidas, esta sucesión, que abarca un periodo de más de 150 años, resulta predecible.

Desde entonces se han descubierto muchas variantes sucesionales. Pero todas parten de la colonización de un área por especies de crecimiento rápido, que son seguidas de otras especies. Las recién llegadas necesitan de las pioneras que las han precedido. A medida que se suceden las olas de inmigrantes, la diversidad aumenta de manera predecible. El ecosistema se agranda y la tasa de crecimiento se hace más lenta. Si el ecosistema no fuera más que el resultado estocástico de aglomeraciones heterogéneas de organismos fortuitamente coincidentes en el tiempo y el espacio, no esperaríamos tales actividades concertadas. Por otra parte, es difícil aducir que las regularidades tienen una base genética. Pese a que los ecosistemas varían enormemente en cuanto a su acervo genético, manifiestan la misma tendencia a crecer hasta un límite. Si los contemplamos termodinámicamente, sin embargo, su comportamiento común tiene sentido. El ecosistema maduro representa un sistema que ha explorado todas las rutas disipativas posibles de «dinero fácil» y ahora camina despacio con las cantidades óptimas de energía captadas y degradadas por su sistema.

En 1889, el botánico Henry Chandler Cowles, de la Universidad de Chicago, dio a conocer una variación espacial sobre el tema de la sucesión.¹² Cowles estudió las comunidades vegetales en torno al lago Michigan. En las dunas situadas junto a la orilla del lago, el movimiento constante del viento y el agua impedía que las plantas arraigaran. Más lejos de la orilla, donde había más tranquilidad, crecían plantas suculentas y gramíneas. Cuanto más se alejaba uno de la costa, más arbustos perennes (como el enebro, que florece cada año sin necesidad de germinación) encontraba. Procediendo desde el lago a través de las dunas, toda una sucesión parecía desplegarse horizontalmente en el espacio en vez de en el tiempo.

Más adelante, en 1936, Frederic Clements, un ecólogo vegetal de Nebraska, estudió las comunidades de las tierras bajas en otro tiempo cubiertas por los glaciares. La comunidad clímax consistía en alfombras de musgos acuáticos, praderas y matorrales desérticos:

«La unidad de la vegetación de la formación clímax es una entidad orgánica. Como un organismo, la formación nace, crece, madura y muere [...]. Más aún, cada formación clímax es capaz de reproducirse, repitiendo la fidelidad esencial de las fases de su desarrollo. El ciclo vital de la formación es un proceso complejo y definido, comparable en sus rasgos principales con el ciclo vital de una planta individual [...]. La formación clímax es el organismo adulto, del que todas las etapas iniciales y medias no son sino fases de desarrollo».¹³

Clements fue llamado a capítulo. La «formación» de la que hablaba —el ecosistema— no tenía cerebro, ni extremidades, ni sistema nervioso. El ecosistema no era un organismo.

Henry Allen Gleason criticó los intentos de Clements y de Cowles de comprender la evolución de los ecosistemas hacia estados clímax.¹⁴ ¿Podía realmente esperarse que ecosistemas enteros se desarrollaran y maduraran como si de cuerpos individuales se tratara? Gleason argumentó que cada comunidad vegetal es única. La flora es un reflejo del clima y la geología locales, así como de la vegetación de las épocas previas. Cada ecosistema ha llegado a su estado presente por una vía separada, resultado de sus contingencias propias. Gleason y muchos de sus sucesores negaron la realidad de la sucesión ecológica.

La escuela de Hutchinson y el auge de la ecología energética

Tras la segunda guerra mundial, la sede de la ecología norteamericana se trasladó del Medio Oeste a la Universidad de Yale. Aquí, con la tutela del brillante científico G. Evelyn Hutchinson, floreció toda una nueva rama de la ecología. Hutchinson siempre intentó ampliar los horizontes de sus discípulos y subrayar la estrecha conexión entre ecología y evolución. Sugirió que los principios derivados de la investigación ecológica podían contribuir a resolver algunos de los misterios de la evolución biológica. Sus discípulos y otros científicos atraídos por su programa de investigación concibieron conceptos como «nivel trófico», «nicho ecológico», «biogeografía insular» y, los que más nos importan aquí, «red trófica» y «flujo de energía ecosistémico». La propia obra de Hutchinson

trató principalmente de la ecología de poblaciones, y supuso un avance real en el modelado de ecosistemas simples.¹⁵ Hutchinson apreció que los ciclos energéticos y materiales de la biosfera corrían a cargo de productores (autótrofos), por un lado, y de consumidores (heterótrofos), por otro.

Hutchinson era un imán para el talento, y uno de sus mejores fichajes fue un brillante posdoctorado, Raymond Lindeman. Éste completó un trabajo de campo sobre un ecosistema pantanoso en Minnesota y en 1942 recibió la admiración de la comunidad ecológica por su artículo «El aspecto trófico-dinámico de la ecología», que para algunos representó el advenimiento de una nueva ecología. Hutchinson, su mentor, declaró: «Lindeman cayó en la cuenta [...] de que el método de análisis más provechoso reside en la reducción a términos energéticos de todos los hechos biológicos interrelacionados [...]. Tenemos una presentación de las dinámicas [ecológicas] interrelacionadas que es susceptible de un análisis abstracto productivo. [...] [Lindeman es] una de las mentes más creativas y generosas que se han dedicado a la ciencia ecológica».¹⁶

Lo que Lindeman había hecho era clasificar los organismos por niveles tróficos: autótrofos, hervíboros, carnívoros y demás. Luego apreció que la cantidad de energía que podía subir un peldaño de la escalera trófica era limitada. Dicho de otro modo, no toda la energía de un nivel trófico era convertible en energía del nivel inmediatamente superior de la cadena trófica (un ejemplo biológico de la segunda ley). En cada nivel de interacción (zooplancton que consume fitoplancton, por ejemplo) había una pérdida en forma de calor-entropía. A causa del peaje metabólico y entrópico que deben pagar estos sistemas, vemos pirámides tróficas con grandes reservas de energía en los escalones inferiores y menos en los superiores. Con este marco teórico, Lindeman estuvo en condiciones de comparar distintos modelos de sucesión, incluyendo lagos de baja productividad, estanques eutróficos ricos en nutrientes y marjales transformados en sistemas sucesionales terrestres. Examinó las similitudes entre ecosistemas lacustres y terrestres, y consolidó la idea de que la sucesión era un proceso universal que seguía una trayectoria predecible. Raymond Lindeman murió a los veintisiete años tras una larga enfermedad, cuando su artículo de 1942 aún estaba en prensa. Muchos ecólogos se preguntan cómo sería hoy su disciplina si Lindeman no hubiese fallecido de forma tan prematura. Sus redes tróficas representan gráficamente la circulación de la energía y la materia de unas especies a otras a través del ecosistema. Estos principios fueron popularizados por el libro de Rachel Carson titulado *Primavera silenciosa*, que mostraba cómo el DDT y otros hidrocarburos clorados, así como los pesticidas a base de naftaleno clorado, em-

ponzoñaban toda la biosfera y se acumulaban en la grasa de los peces y en la leche de las vacas y las madres humanas. Todavía hoy, mucho tiempo después de haber sido declarados ilegales, siguen detectándose en el torrente sanguíneo de las personas.

El artículo de Lindeman completó el proyecto de la «historia natural científica» de Charles Elton, considerado el primer ecólogo que identificó las cadenas y redes tróficas (que denominó «ciclos tróficos»).¹⁷ Lindeman distribuyó los organismos en niveles tróficos. Sus términos continúan empleándose. Los *autótrofos* producen su propio sustento a partir de energía solar, agua y dióxido de carbono. Los *quimiótrofos* obtienen su energía de reacciones químicas inorgánicas. Los *heterótrofos* son incapaces de producir materia orgánica a partir de fuentes inorgánicas, por lo que deben obtener alimento y energía utilizable a partir de la materia orgánica de su entorno (azúcares, aminoácidos, grasas). Todos los animales son heterótrofos. Los herbívoros son heterótrofos que se alimentan de autótrofos, mientras que los carnívoros son heterótrofos que se alimentan de otros heterótrofos.

Lindeman mostró que la cantidad de energía obtenida por los organismos que se alimentan de otros organismos es limitada. La energía nunca se convierte al cien por cien. En la mayoría de los casos, la eficiencia de la conversión de alimento en carne es inferior al 10 %. La pérdida es termodinámica. Cuando un ciliado engulle una bacteria, por ejemplo, se pierde calor y entropía. El peaje metabólico impuesto por la segunda ley implica que los escalones inferiores de la pirámide trófica (ocupados por los productores fotosintéticos: cianobacterias, algas y plantas) contienen más energía, mientras que en los escalones superiores (ocupados por los carnívoros) la energía está más concentrada (mayor energía potencial por unidad de biomasa). No hay pirámides tróficas de más de cinco o seis niveles, debido a las ineficiencias en la transferencia de energía (figura 13.1). En su influyente ensayo titulado *Por qué son escasas las fieras* (1978), el biólogo Paul Colinvaux postulaba que la pérdida secuencial de energía a medida que se asciende por los niveles tróficos no sólo limitaba el número de predadores de orden superior, sino que los animales de un nivel sumaban una biomasa diez veces mayor que la del nivel inmediatamente superior.

En lo alto de estas pirámides, los grandes felinos o sus equivalentes carnívoros disfrutaban de los destilados energéticos de la vida a costa de organismos que consumen formas menos concentradas de alimento. Lindeman detalló un desarrollo direccional tanto en los ecosistemas lacustres como en los terrestres, silenciando a los detractores de la sucesión. La sucesión ecológica era universal, y seguía trayectorias predecibles.

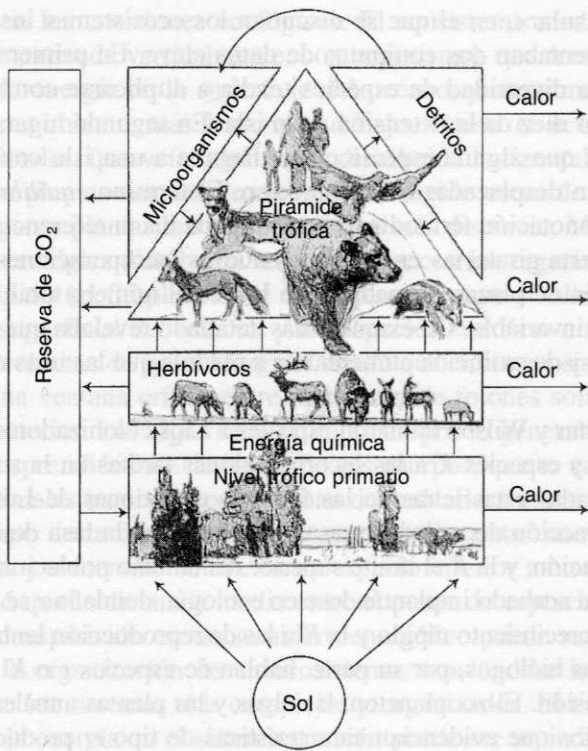


Figura 13.1. Flujo de energía a través de un ecosistema. Los procesos ecológicos son impulsados por el flujo de energía desde la fuente solar hasta los sumideros térmico y químico. Los productores primarios (autótrofos) fijan alrededor del 1 % de la energía que incide sobre ellos. Los herbívoros, de los insectos a los ciervos, consumen autótrofos y son consumidos por carnívoros, que, a su vez, pueden ser consumidos por otros carnívoros. Cada vez que se asciende un nivel trófico, se pierde un 80-90 % de la energía en forma de calor (entropía). Para cuando la energía ha ascendido cuatro o cinco niveles tróficos, queda muy poco de la cantidad inicial. Los ecólogos llaman a esta estructura «pirámide trófica», porque se requieren muchos organismos en la base del sistema para sustentar unos pocos en el ápice. (Adaptado de Morowitz, 1979.)

Robert MacArthur, que se matriculó en un programa de doctorado dirigido por Hutchinson tras obtener un máster en matemáticas, contribuyó a avivar el fuego de la ecología energética. Se estrenó con un estudio de las currucas de la costa de Maine, y encontró que diferencias muy leves entre especies coexistentes estrechamente emparentadas podían determinar cuál ocupaba un nicho y cuál no.¹⁸

En 1963, MacArthur y E.O. Wilson, el conocido entomólogo de Harvard, escribieron un artículo titulado «Una teoría de equilibrio de la zoo-

geografía insular», en el que se discutían los ecosistemas insulares. Los autores presentaban dos conjuntos de datos clave. En primer lugar, indicaban que la diversidad de especies tendía a duplicarse con cada multiplicación por diez de la extensión de la isla. En segundo lugar, mostraban que siempre que alguna especie nueva llegaba a una isla concreta, otras especies eran desplazadas o desaparecían. El término *equilibrio* no tenía aquí una connotación termodinámica, sino que hacía referencia a la situación de «puerta giratoria» en la que las nuevas incorporaciones conducían a la extinción de plazas ocupadas, con lo que el número total de especies se mantenía invariable. Un examen más detallado revelaba que las tasas de inmigración y de extinción aumentaban a medida que las islas estaban más atestadas.

MacArthur y Wilson llamaron especies *r* a los colonizadores tempranos de las islas, y especies *K* a las incorporaciones tardías en la sucesión. Tomaron prestadas estas letras de las famosas ecuaciones de Lotka-Volterra para la interacción depredador-presa. La *r* indicaba la tasa de crecimiento de una población, y la *K* el límite superior del tamaño poblacional. Esta terminología ha acabado implantándose en ecología, donde la *r* se refiere a las especies de crecimiento rápido y la *K* a las de reproducción lenta y ciclo vital largo. Los biólogos, por su parte, hablan de especies *r* o *K* sin referencia a la sucesión. El zooplancton, las algas y las plantas anuales son clases de organismos que evidencian características de tipo *r*: producen un gran número de descendientes, cuya mayoría muere. Los mamíferos, que cuidan de sus crías, se consideran especies *K*, porque se reproducen más lentamente y con una inversión mayor por descendiente. Esta dicotomía simple se difumina, sin embargo, cuando se consideran los seres humanos. Invertimos mucho en nuestros hijos y tendemos a producir sólo uno por parto. Pero somos miles de millones de personas sobre la faz de la Tierra.

Mientras Hutchinson comandaba un activo grupo de investigación en Yale, Ramón Margalef, un catalán solitario, se convirtió en el primer científico que traducía a hipótesis coherentes las aplicaciones ecológicas de la teoría de la información y la termodinámica. Su libro *Perspectivas de la teoría ecológica* (1968) era la edición de una serie de conferencias impartidas en mayo de 1966 en la Universidad de Chicago. El volumen incluía secciones sobre el ecosistema como sistema cibernético, la sucesión ecológica y la evolución en el marco de la organización ecosistémica. En la introducción, Margalef decía que «aun aquí en Chicago [...] mi pensamiento ha estado fuertemente influido por G. Evelyn Hutchinson y varios de sus discípulos, en especial los hermanos Odum».¹⁹

Margalef hizo del azul Mediterráneo su laboratorio ecológico. Fue también un teórico que introdujo la termodinámica y la teoría de la in-

formación en las cuestiones ecológicas. El ecosistema mediterráneo de Margalef se extiende verticalmente, con organismos que transforman rápidamente la energía en la superficie del océano, y otros más establecidos y de crecimiento más lento por debajo. Como el ecólogo Henry Chandler Cowles, que veía la sucesión distribuida horizontalmente en el espacio, con plantas anuales de crecimiento rápido cerca de la costa del lago Michigan y plantas leñosas perennes a más distancia, Margalef veía la sucesión ecológica distribuida verticalmente, con los organismos de crecimiento rápido (el fitoplancton y el zooplancton que se alimenta de él) en la capa superficial del océano, y las especies «tardías» a más profundidad en la columna de agua. Margalef señaló que en los ecosistemas acuáticos hay una ventana crítica entre la captura de fotones solares y su liberación posterior. Las algas se descomponen por lo general en cuestión de horas, desprendiéndose de partes de sus cuerpos, que se convierten en pasto de animales hambrientos y acaban degradándose como material fecal. El tiempo de la descomposición puede variar entre unos minutos y varias horas, y a menudo ocurre en un espacio inferior a un metro. Margalef sugirió que la distancia media entre el punto de captación del fotón y el de su desaparición en un sumidero energético puede tomarse como medida de la organización de un ecosistema, asociándose las distancias mayores con los sistemas más complejos y organizados. El tiempo de residencia de la energía en el sistema también puede ser un indicador de su madurez, correspondiendo típicamente los tiempos de residencia cortos a los ecosistemas jóvenes e inmaduros. Margalef popularizó la idea de las tasas metabólicas como medida de la eficiencia metabólica del sistema. La razón entre la producción primaria y la biomasa de un ecosistema mide cuánta producción primaria se necesita para sustentar una unidad de biomasa, y es un indicador de la eficiencia del sistema. Si no está sometido a «estrés» por causa de, pongamos por caso, el agua caliente de la refrigeración de una central nuclear, un vertido de petróleo o un factor limitante (como un déficit de agua o nutrientes), un ecosistema seguirá su curso natural hacia la madurez. Su crecimiento se retardará, y su eficiencia reductora de gradientes aumentará con el paso del tiempo. Dicho de otro modo, el ecosistema en desarrollo es como un niño y un adolescente; requiere mucho alimento, ya que se encuentra al principio de la vida. Luego deja de crecer y madura en un adulto más organizado y eficiente energéticamente.

Hutchinson y sus seguidores buscaban maneras de entender la vida no sólo como organismos o poblaciones de organismos, sino también como comunidades fluidas que intercambiaban materia y energía y se estructuraban en niveles por encima del orgánico. Como explica Ramón Margalef:

«Consideremos un río en el que se multiplican organismos en suspensión. El agua fluye y se lleva los organismos. Si el flujo fuera perfectamente laminar, todo sería arrastrado por la corriente y el agua quedaría vacía de vida. Pero el flujo es turbulento, y algunos organismos se mueven de hecho en sentido contrario al de la corriente principal, mientras que otros son arrastrados a una velocidad por encima de la media; y, por supuesto, todos se multiplican. El resultado es que, en un punto geográficamente fijo, se mantiene una población en la que el incremento de efectivos por multiplicación compensa las pérdidas por deriva, difusión y hundimiento. La población debe considerarse un proceso más que un estado [...], como una nube que se forma por un extremo y desaparece por el otro, manteniendo entre ambos una forma y cierta apariencia de organización».²⁰

Los cambios de forma de un ecosistema, su cohesión y su apariencia como totalidad, se mantienen mediante elevadas tasas reproductivas en aquellas áreas que parecen más «sólidas». Lo mismo vale para las sociedades humanas. Cualquiera que haya visto documentales como *Koyaanisqatsi*, *Organism* o *Baraca* (que emplean técnicas de aceleración del movimiento para mostrar multitudes, en particular ciudades, que actúan como individuos) apreciará hasta qué punto la escala y la perspectiva pueden cambiar la percepción. En estas películas las ciudades adquieren aspecto de organismos, y los individuos parecen las partículas de un fluido móvil. El despliegue global de municiones, tanques, soldados y aeroplanos en la primera guerra mundial inspiró en Vernadsky la idea de la «noosfera», la extensión tecnológica de la biosfera. Por medio de la humanidad, la vida rehace la superficie terrestre de maneras llamativamente nuevas, adquiriendo atributos de sistema nervioso global —piénsese en Internet— con el potencial de afectar a la totalidad de la vida. Como las bandadas de aves y los enjambres de langostas migratorias, pero con la intervención de la tecnología y el intelecto humanos, montañas de minerales sólidos circulan a escala global. Margalef miraba los flujos energéticos a través de las formas cambiantes y los movimientos frenéticos de los individuos. La vida, «compuesta» de átomos, moléculas, genes, células e individuos, también es un sistema complejo que se organiza en respuesta a un entorno organizado. En cuanto individuos, resulta fácil perder de vista el cuadro general. Somos como agujas de pino en el suelo del bosque intentando ver, más allá de las otras agujas de pino, los árboles de los que caen.

Margalef propuso que el tiempo transcurrido entre la captura de un fotón y su liberación ulterior en un sumidero de energía puede tomarse

como medida del grado de organización de un ecosistema. Asimismo, el tiempo de residencia de la energía en el sistema puede ser un indicador de la madurez ecosistémica. Aunque sus acervos genéticos varían ampliamente, en general los ecosistemas se desarrollan de manera similar. Con Hutchinson, Margalef y otros, la nueva ecología comenzó a contemplar la sucesión como un hecho y como el resultado del flujo de energía.

La ecología como interés nacional

Tras graduarse en la Universidad de Chicago, otro hombre se incorporó al círculo ecológico de Hutchinson en Yale: Eugene Odum. Desde la Universidad de Georgia, en Athens, Odum modernizó la ecología integrando la geología, la química y la economía. Su artículo «La estrategia del desarrollo ecosistémico», publicado en 1969, constituye una de las más importantes síntesis ecológicas y supuso un gran avance del pensamiento ecológico. Puesto que las observaciones de Odum son de gran importancia en nuestro propio paradigma termodinámico, echaremos una mirada al proceso de la sucesión tal como él lo concebía.

El artículo de 1969 contenía el discurso presidencial pronunciado en la reunión anual de la Sociedad Ecológica de América, en la Universidad de Maryland. Eran tiempos de gran desazón política en Estados Unidos, a causa de la guerra de Vietnam y de la reacción contundente de la industria y los sindicatos ante las recientes victorias conservacionistas. Los campus universitarios estaban alborotados por ambos asuntos. Aunque constituye la síntesis más importante de la fenomenología de la sucesión ecológica, más de un tercio del artículo de Odum está dedicado a cuestiones medioambientales. En efecto, el presidente de la Sociedad Ecológica de América habló de aspectos político-medioambientales tremendamente importantes: «La preservación de las áreas naturales no es un lujo periférico para la sociedad, sino una inversión de capital de la que esperamos obtener un interés. Además, muy bien puede ser que las restricciones en el uso de la tierra y el agua sean la única manera de evitar la superpoblación o la explotación excesiva de los recursos, o ambas».²¹ Era un discurso valiente para la época.

El libro de texto clásico de Odum, *Fundamentals of Ecology*, publicado por primera vez en 1971, ligaba decididamente el flujo de energía a la sucesión. Tanto en su artículo de 1969 como en este libro, Odum realizaba diversas observaciones básicas. En lo que respecta a la sucesión ecológica, señalaba tres puntos: 1.º «Es un proceso ordenado de desarrollo de la comunidad que es razonablemente direccional y, por consiguiente,

predecible»; 2.º «Resulta de la modificación del medio físico por la comunidad»; 3.º «Culmina en un ecosistema estabilizado en el que se mantiene un máximo de biomasa (o alto contenido de información) y de función simbiótica entre organismos por unidad de flujo de energía».²²

Al igual que el trabajo de Thoreau de mediados del siglo XIX, la síntesis de Odum era de carácter fenomenológico, fruto de siglos de observaciones. Su base de datos incluía información tanto de sistemas naturales como de ecosistemas de laboratorio. Odum separó las características ecosistémicas según los estadios sucesionales esperados durante el desarrollo de los ecosistemas, y posteriormente los agrupó en categorías relativas a la energética ecosistémica, la estructura comunitaria, el ciclo vital de los organismos, el reciclado de nutrientes, las presiones selectivas y la homeostasis ecosistémica general.

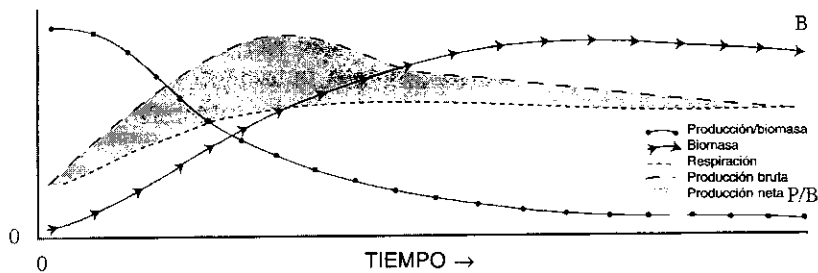
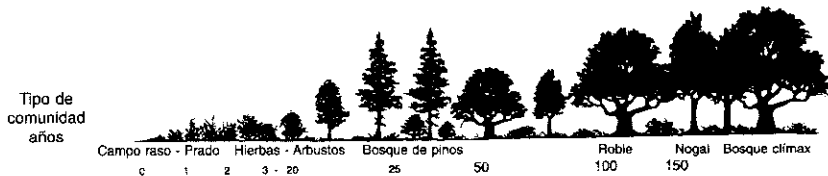
La ecología de Odum encaja perfectamente en nuestro paradigma termodinámico. Hemos intentado sintetizar las ideas fundamentales de Odum en la figura 13.2. Este diagrama representa los cambios en las características ecosistémicas discutidos en este capítulo y el siguiente. Con el propósito de destilar las ideas de Odum, hemos añadido algunos elementos. En la parte superior de la figura se representa la flora asociada a la sucesión arquetípica de Nueva Inglaterra, desde el terreno raso hasta el robledal. En el oeste de Estados Unidos la secuencia sería similar, con artemisas en lugar de zarzamoras y matojos en lugar de hierbas rastreras. Los estadios finales del bosque occidental incluirían abetos, píceas o pinos blancos en lugar de robles. Los mismos procesos sucesionales se observan en las praderas, donde no hay robledales ni abetales. Las praderas experimentan su propia sucesión, en la que las hierbas anuales son reemplazadas por hierbas perennes. El ecosistema «hace lo óptimo» para prosperar bajo ciertas constricciones. Muchas de las estepas y praderas del mundo se encuentran en zonas donde llueve poco; han evolucionado para desarrollar una comunidad estable que degrada la energía entrante de la manera más completa posible.

Una de las regularidades más obvias del cambio ecosistémico a lo largo de la sucesión es el incremento de la biomasa. Ésta suele medirse en gramos de material seco por metro cuadrado. A menudo este peso seco se convierte en unidades de carbono. La biomasa por metro cuadrado de las hierbas pioneras es ínfima en comparación con la de un bosque maduro; mientras que la primera cantidad se mide en gramos, la segunda se mide en toneladas. La biomasa de un ecosistema aumenta y luego se estabiliza. La curva *B* (biomasa) de la figura 13.2 representa el hallazgo y la apertura por parte del ecosistema de nuevas vías para degradar la energía disponible. En el proceso, crece. Cuanta más energía se capta y fluye

a través del sistema, más numerosos serán los procesos de producción de entropía, como la transpiración, la fotosíntesis y las reacciones metabólicas, los cuales degradan la energía entrante. En los ecosistemas, la biomasa, el procesamiento energético total y la producción de entropía aumentan a lo largo de la sucesión.

Una vez que la curva de biomasa se hace horizontal, sobre el crecimiento del sistema se han aplicado ciertas constricciones. Este cese del crecimiento responde a múltiples causas, que van desde los programas genéticos hasta la carencia de luz, agua o nutrientes. Si pensamos en el ecosistema como un sistema termodinámico disipativo, en el clímax el sistema se encuentra en un estado cuasi-estacionario: está organizado para degradar todos los gradientes energéticos disponibles de la manera más completa posible, sea por medios autotróficos o heterotróficos. Un ecosistema es un reductor de gradientes a gran escala. La proliferación de organismos previa al estadio «clímax» crea el sistema maduro, que es más intrincado, complejo y organizado, así como más capaz de reducir gradientes a una escala enorme.

Para trazar los flujos de energía a través de los ecosistemas, los ecólogos han tomado prestado el análisis de entradas y salidas de los economistas. Así como éstos cuadran los flujos económicos de una economía, los ecólogos cuadran las rutas energéticas a través de un ecosistema. En particular, los ecólogos han «birlado» el método de análisis del flujo de dinero a través de los sistemas económicos,²³ que le valió el Premio Nobel al economista de Harvard Wassily Leontief. Dicho análisis no sólo medía las entradas y salidas de bienes, servicios y dinero, sino también el dinero que circulaba cíclicamente *a través* del sistema. A Leontief se lo conoce especialmente por haber calculado el producto nacional bruto (PNB) de un sistema económico y haber propuesto que este flujo de capital es un baremo del tamaño de la economía. La enumeración de los flujos de energía ecosistémicos permite revelar el reparto de la energía en el ecosistema. La energía circulante total es una medida del tamaño de un sistema en términos de flujo de energía, del mismo modo que el PNB es una medida del tamaño de una economía. Empleando el álgebra matricial simple y estimaciones de los flujos energéticos y materiales (cuál devora a cuál, productividad primaria, nutrientes eliminados con las defecaciones, reproducción, número de efectivos de cada especie, etcétera), se pueden calcular flujos de energía detallados en el ecosistema. Mediante esta metodología puede determinarse el procesamiento energético total, los niveles tróficos, la proporción de flujos implicados en el reciclaje, el número y la longitud de los ciclos, y un cúmulo de información adicional primaria y secundaria sobre el estado y los procesos del ecosistema.²⁴



Características orgánicas, ecosistémicas y evolutivas	Estadio	Sucesión temprana Expansivo - no constreñido «Estresado» Juvenil	Sucesión tardía (clímax) Estacionario - Constreñido «No estresado» Adulto	
	Selección	Crecimiento rápido, selección <i>r</i> Crecimiento Alta fecundidad Ciclo vital corto Nicho amplio	Crecimiento lento, selección <i>K</i> Desarrollo Baja fecundidad Ciclo vital largo Nicho estrecho	
	Ciclos	Simple Rápidos Abiertos (ciclos con fugas) Pocos Redes poco articuladas	Complejos Lentos Cerrados (reciclaje) Muchos Redes altamente articuladas	
	Termodinámica y energética	Cerca del equilibrio termodinámico		Lejos del equilibrio termodinámico
		Menos energía libre y exergía Tiempo de residencia de la energía corto La producción de entropía total aumenta durante la maduración, el crecimiento y la complejización. La producción de entropía específica (producción de entropía por unidad de flujo, biomasa o información) decrece con el desarrollo.		Más energía libre y exergía Tiempo de residencia de la energía largo
	Tamaño pequeño Distribución de tamaños negativamente sesgada Estructuras simples con pocos niveles jerárquicos Menos complejidad, diversidad baja Información mutua media baja Eficiencia baja	Tamaño grande Distribución de tamaños unimodal Estructuras complejas con muchos niveles jerárquicos Más complejidad, diversidad alta Información mutua media alta Eficiencia alta		
	TIEMPO →			

Si bien un ordenador puede realizar estos cálculos en cuestión de minutos, la recolección y enumeración de datos lleva años de trabajo minucioso. Los ecólogos de campo, además de obtener datos de estándares como la producción primaria y la respiración, deben examinar los contenidos estomacales o las heces de cada organismo para hacerse una idea de su dieta. Si el organismo de interés es un oso gris, puede haber comido hormigas, piñones, truchas, polillas, carcasas de ciervo, al menos diez especies de bayas y hasta un filtro de aceite de automóvil.*

El hermano de Eugene Odum, Howard, conocido por sus alumnos y amigos como H.T., también era ecólogo. H.T. Odum comenzó donde Lindeman lo había dejado: midió y calculó el flujo de energía a través de los ecosistemas. Máquinas, economías, ciudades y naciones figurarían en sus análisis energéticos posteriores.²⁵ También ideó símbolos para explicar sus principios. En su ecolenguaje, un depósito de agua indica almacenamiento, el símbolo eléctrico de toma de tierra representa el calor y la disipación, y una combinación de hexágonos, flechas y balas representa las relaciones energéticas entre las plantas verdes. El hermano menos reservado de Eugene tampoco se arrugaba ante los grandes problemas. En su libro *Ambiente, energía y sociedad* (1971), discute temas como «El sistema del mundo» y «Potencia en los sistemas ecológicos», así como las bases energéticas para la humanidad, la economía, la política y la religión. En un programa de campo de lo más sofisticado para los años sesenta, H.T. estudió la energética de una selva puertorriqueña mediante elevadas torres de observación provistas de registradores, y calculó las reservas de agua y nutrientes. Llenaba seminarios de estudiantes universitarios de primer ciclo, que escuchaban atentamente cada una de sus palabras. Aleccionó a estudiantes y líderes soviéticos de la vieja escuela sobre el flujo de energía y los mercados abiertos en los procesos de política libre. Los hermanos Odum insistieron en la impor-

Figura 13.2. Cambios en las características ecosistémicas a lo largo de la sucesión. La sucesión desde el prado hasta el bosque clímax es típica de los bosques orientales de Estados Unidos. En todos los ecosistemas terrestres y acuáticos ocurren sucesiones similares, con diferentes especies interpretando papeles distintos en el proceso. La biomasa del ecosistema y la energía total procesada aumentan durante la sucesión, mientras que las razones producción-biomasa (P/B) disminuyen, lo cual implica que los estadios sucesionales tardíos requieren menos alimento o energía para mantener una unidad de biomasa. Estos ecosistemas maduros son más eficientes que sus predecesores. (Adaptado de Odum, 1969, y Schneider, 1988.)

* Harold Picton, Universidad de Montana, comunicación personal, junio de 1993. (N. de los AA.)

tancia capital del flujo de energía para la comprensión unificada de la vida sobre la Tierra.

Durante dos años, Mark Homer, Mike Kemp y Hugh McKellar trabajaron para Howard Odum en las marismas de Florida, donde recogieron datos del flujo de carbono y energía a través de dos sistemas costeros.²⁶ Su misión era comparar el flujo de energía ecosistémico de dos ensenadas intermareales similares, una «estresada» a causa del calor producido por una central eléctrica y la otra no. Realizaron estudios estacionales de productividad primaria, midieron la importación y exportación de materiales y diseccionaron miles de peces para determinar sus fuentes de alimento. Midieron el flujo de carbono a través de diecisiete componentes bióticos, desde las algas y el zooplancton hasta peces como la aguja y la pastinaca. Volveremos sobre estos datos en un capítulo posterior, pues se encuentran entre los mejores jamás recopilados, lo cual permite comparaciones con ecosistemas similares. No obstante, aunque los datos aportados por estos estudios de campo se sitúan entre los más valiosos de la ecología actual, su obtención requiere un trabajo de campo intensivo, difícil y sumamente costoso.

Una curva especialmente importante en la figura 13.2 es la del cociente producción/biomasa a lo largo del tiempo. La razón P/B representa la producción primaria (P) de un sistema dividido por su biomasa (B), por unidad de superficie. La razón P/B es una importante medida de la salud ecosistémica y el progreso sucesional. Los investigadores Ramón Margalef y Eugene Odum han subrayado que proporciona una suerte de «temperatura» metabólica del ecosistema. La razón P/B indica cuánta producción primaria se requiere para sustentar una unidad de biomasa, correlacionándose con la eficiencia del sistema. En 1978 Matsuno mostró que la razón P/B equivale a una medida de la entropía específica del ecosistema.²⁷

La razón P/B y la entropía específica decrecen a lo largo de la sucesión ecológica. Aunque los ecosistemas en desarrollo tienden a disminuir la producción de entropía específica, no son sistemas de Onsager cercanos al equilibrio. Los sistemas vivos no satisfacen las condiciones y restricciones requeridas para que se cumpla la ley de mínima producción de entropía. Los datos de organismos y ecosistemas muestran que, a medida que estos biosistemas maduran, su tasa metabólica desciende, al igual que la producción de entropía específica. El descenso de la tasa metabólica va acompañado de una desaceleración del crecimiento, que culmina en una eficiencia incrementada en la madurez. La biomasa mantenida por unidad de flujo energético aumenta durante la sucesión. El sistema se estabiliza. Como los organismos adultos, el ecosistema maduro puede mantenerse con la misma importación de energía y/o materia, o menos.

Odum describió las cadenas tróficas de los estadios tempranos de la sucesión como simples y lineales. Las cadenas tróficas maduras, por el contrario, eran más complejas, con más ciclos, incluyendo el reciclado de los nutrientes contenidos en los detritos producidos por el ecosistema. Lindeman halló que la eficiencia de la transferencia de energía en los eslabones inferiores de la cadena trófica no sobrepasa el 1-2 %. En cambio, en los eslabones superiores de la cadena esta transferencia (de conejos a zorros, por ejemplo) es más eficiente, alcanzando hasta un 25 %. Odum mostró que es difícil mantener una pirámide trófica con más de cinco o seis niveles, debido a la ineficiencia de la transferencia de energía de un nivel a otro. La segunda ley impone su impuesto de entropía a cada una de estas transferencias, lo que se traduce en un número de niveles tróficos reducido. Sin embargo, la materia puede circular muchas veces en el ciclo heterotrófico de los detritos. Los estadios tardíos de la sucesión contienen redes tróficas mucho más complejas y muchas más vías para el reciclado de los materiales.²⁸

La energía solar incidente se degrada a través de un nexo de nodos de intercambio de gases y consumidores en un ecosistema reciclante. A pesar de que el ecosistema no posee una envoltura diferenciada como las pieles o cortezas de los organismos, no deja de ser un sistema integrado. Y come. Sólo alrededor del 1 % de la energía que incide sobre una planta se convierte en materia viva. El otro 99 % o bien se refleja de vuelta al espacio, o bien se emite en forma de calor de baja calidad. Pero ese escaso 1 % demuestra lo que vale. Los megaherbívoros, como las vacas, comen hierba, y las bacterias descomponen sus heces hasta que el gradiente solar queda reducido al máximo posible. Primero la degradación autotrófica (plantas verdes, algas y bacterias fotosintéticas) y después los procesos heterotróficos (animales y descomponedores) exprimen hasta la última gota los productos de baja entropía derivados de la radiación solar incidente. La energía solar se degrada en muchos sitios dentro del ecosistema.

Ecosistemas con fugas

Los ecosistemas jóvenes, con mayoría de especies *r*, tienden a dejar escapar nutrientes, mientras que los ecosistemas maduros retienen buena parte de sus recursos dentro del sistema. Los ecólogos llaman «exógeno» al material venido de fuera del sistema, mientras que el material reciclado se denomina «endógeno». Una selva ecuatorial recicla la mayor parte de sus materiales y proporciona una fuente endógena de agua y nutrientes para el sistema. Las hojas ricas en celulosa son atacadas por los herbívo-

ros, y cuando la cadena heterotrófica acaba con lo que queda de ellas, muchos de los gradientes (en forma de enlaces químicos) han sido exprimidos al máximo, dejando materias primas simplificadas disponibles para su reciclado. Estos procesos requieren sistemas de raíces y entornos orgánicos heterotróficos bien desarrollados donde estas transiciones puedan completarse. En las selvas incluso se recicla la humedad. Los cielos claros de la mañana y las temperaturas altas del mediodía dan paso a charrones vespertinos, un sistema cíclico de respuesta rápida. Por el contrario, los ecosistemas jóvenes no disponen de los sistemas radicales, la biomasa foliar y la materia orgánica que posibilitan este reciclado. Un atributo clave de un ecosistema maduro es que, en lugar de dejar escapar buena parte de sus nutrientes y su agua, los recicla dentro del sistema.

Los ciclos son un fenómeno ecosistémico ubicuo. La circulación de la materia y la energía dentro del ecosistema cambia a lo largo de la sucesión. Al principio los ciclos son cortos, abiertos y rápidos. En los ecosistemas maduros ocurre todo lo contrario: los ciclos son largos, complejos y cerrados. Ya hemos indicado que los ecosistemas más eficientes, con bajas razones P/B , presentan los mayores tiempos de residencia de la energía y las mayores tasas de reciclado de materiales dentro del sistema. Un análisis dimensional simple de la razón P/B demuestra que es la inversa del tiempo de residencia, $1/T$, o la duración del ciclo de la materia en el sistema. Las especies r pioneras tienen ciclos vitales cortos. Por ejemplo, en un ciclo bacteriano el nitrógeno tiene un tiempo de residencia de apenas unas horas, mientras que en un bosque maduro su tiempo de residencia se mide en siglos. En estos ecosistemas maduros no sólo hay más ciclos, sino también más materiales circulando por dichos ciclos.

A medida que avanza la sucesión, los nichos se estrechan. Hemos empleado la palabra «nicho» varias veces en este libro, y ya es tiempo de discutir este concepto un poco más. Originalmente, *nicho* aludía a un hueco practicado en un muro, donde podía colocarse una lámpara o una estatua. Los primeros ecólogos ingleses comenzaron a emplear la palabra con el significado de «lugar que ocupa una especie dada en una comunidad», esto es, su hábitat, sus competidores y su alimento. Un nicho amplio hace referencia a una amplia gama de entornos en los que pueden vivir los organismos de una especie; es típico de los ecosistemas jóvenes. Los nichos se estrechan cuando la competencia demanda que los organismos adquieran rasgos especializados para sobrevivir en un mundo más complejo. El resultado es una especialización creciente, y a veces los nichos se solapan. El cangrejo ermitaño, por ejemplo, emplea una concha de caracol para protegerse, de manera que su nicho ecológico se ha vuelto dependiente del hardware biológico de una concha dejada atrás por otro organismo.

Uno de los conceptos ecológicos peor entendidos es el de «comunidad clímax». Parte del problema se relaciona con sus introductores, Clements y Cowles, quienes contemplaban la comunidad clímax como el estado estable final de un proceso. Este malentendido quizás haya sido perpetuado por las curvas de Odum del incremento de la biomasa a lo largo de la sucesión, hasta un nivel asintótico al final de la página. En la figura 13.2 hemos cometido este mismo error, pero ahora lo subsanaremos. En realidad, el ecosistema clímax está en constante cambio. Aunque los ecosistemas maduros poseen procesos homeostáticos estabilizadores más eficientes que los inmaduros, algunos subsistemas pueden volverse muy frágiles. Ulanowicz señala que, por encima de cierto punto, un incremento de la interconectividad incrementa la fragilidad del sistema.²⁹ Un sistema interconectado al 100 % es tan frágil como un sistema con una única conexión. La conectividad óptima se situaría en torno al 50 %. Kauffman demostró que una interconectividad por encima del 50 % hace que el sistema coagule en grumos interconectados que actúan como un único nodo.³⁰ Cuando estos coágulos aumentan de tamaño, pierden su diversidad y la estabilidad asociada a ella.

La ecología podría aprender algunas lecciones del debate sobre el comercio y la banca global. Actualmente los mercados monetarios están totalmente interconectados y funcionan las veinticuatro horas del día. Un tropiezo de la bolsa japonesa puede causar un cataclismo en las bolsas europeas y norteamericanas. Esta interconectividad del comercio mundial resulta preocupante. La interconectividad ecológica es el equivalente biológico de poner todos los huevos en una misma cesta (cuya eventual caída tendrá consecuencias desastrosas). Por eso Gandhi, deseoso de independizarse del comercio textil inglés, argumentó hace cincuenta años que usar la rueca era una necesidad económica.

En los ecosistemas muy maduros, los árboles grandes son vulnerables a los vendavales, mientras que los bosques densos son vulnerables al fuego y las plagas. Las áreas forestales con una gran biomasa acumulada en el suelo tienen muchos números para ser pasto de los incendios. Tras cada uno de estos procesos destructivos, una parte del bosque maduro debe volver a comenzar la sucesión desde cero (figura 13.3). En la mayoría de las ocasiones, estas catástrofes no destruyen un área inmensa de una sola vez. Los famosos incendios de 1988 en el Parque Nacional de Yellowstone, que se propagaban a saltos, arrasaron una tercera parte de las 880.000 hectáreas del parque. Quince años después, la vegetación se está regenerando según la sucesión prevista. Los científicos han apreciado

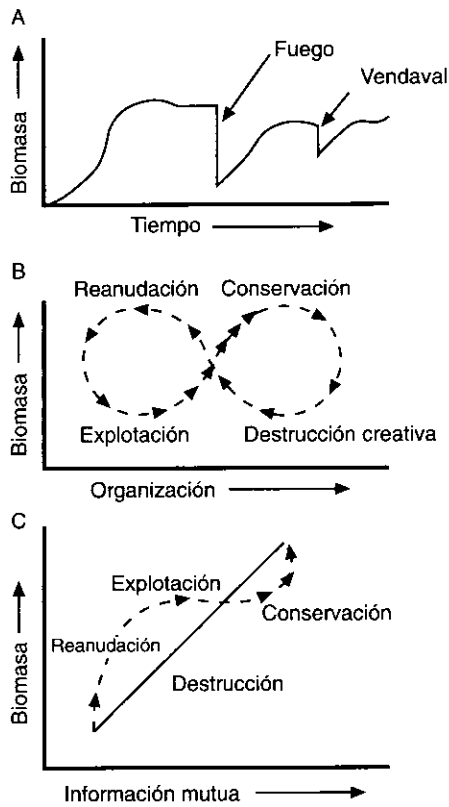


Figura 13.3. Tres perspectivas de la sucesión. La comunidad clímax no es un sistema en estado estacionario. *A.* Cambios de la biomasa en función del tiempo. La biomasa aumenta durante la sucesión, pero el fuego, los vendavales y las plagas pueden destruir parcelas enteras, y el proceso sucesional comienza de nuevo. *B.* La naturaleza siempre cambiante de los procesos ecosistémicos. Este diagrama representa la biomasa en función de lo que Crawford Holling denomina «organización».³¹ La figura en forma de ocho evidencia la naturaleza cíclica de la sucesión. La fase de «explotación» representa el estadio *r* joven de la sucesión y la explotación de los nutrientes por especies de crecimiento rápido. La fase de «conservación» corresponde al estadio *K* maduro, con predominio de especies de crecimiento lento. Por «destrucción creativa», Holling entiende el colapso catastrófico del sistema (esto es, incendios y plagas). La «reanudación» es la estabilización del agua, los nutrientes químicos y el suelo, lo cual proporciona el fundamento para la fase de explotación. *C.* Robert Ulanowicz adopta la terminología de Holling, pero representa gráficamente la biomasa en función de la «información mutua», que es una medida de la interconectividad de los flujos energéticos dentro del ecosistema.³² La mínima interconexión corresponde a la fase de «reanudación», y la máxima a la fase de «conservación». La caída abrupta de la biomasa y la interconectividad se representa llamativamente como la fase de «destrucción».

cambios paralelos en la comunidad de ramoneadores heterótrofos, principalmente alces y ciervos. La causa de tales cambios es que los arbustos y plantones ofrecen a estas especies un hábitat mejor que los altos abetos y los pinos viejos.

Una comunidad clímax debería ser entendida como un mosaico de diferentes estadios de la sucesión ecológica. Cada vez que ocurre un revés de primera magnitud, como un incendio forestal de grandes proporciones, la estructura y los procesos ecológicos vuelven al principio, como un jugador enviado al punto de salida en el juego del Monopoly. La penalización no consiste en quedar eliminado, sino en poner el contador a cero y volver a empezar. El resultado es que, si consultásemos las curvas de biomasa y procesamiento total a lo largo de un tiempo dilatado, veríamos una pauta en diente de sierra, con una acumulación de biomasa a través del crecimiento termodinámico, seguida de la destrucción de ese material y otro lento ascenso hacia el clímax de la madurez (figura 13.3A). Los ecosistemas maduran, pero, debido a la parcelación de las perturbaciones, no envejecen ni mueren. Por eso no pueden considerarse organismos (ningún organismo recicla toda su materia), si bien, como los organismos, son sistemas termodinámicos complejos. Los ecosistemas representan patrones biológicamente estables que abarcan numerosas escalas de una jerarquía espaciotemporal. Las comunidades clímax son vulnerables al cambio rápido. Los sistemas se encuentran con frecuencia en un punto inestable, como es el caso de la biomasa de hojarasca y madera en un bosque seco. Una mínima perturbación, como una chispa causada por el roce de una herradura con una piedra, durante un paseo a caballo, puede poner a cero el reloj sucesional. La dinámica no lineal y los eventos catastróficos son comunes en todos estos sistemas biológicos.

En la vida no hay nada por lo que debamos temer.
Sólo debemos comprender.

Marie Curie

Retrasando el reloj ecosistémico

Los ecosistemas sometidos a tensión experimentan una regresión. El ecólogo marino Kenneth Sherman y sus colaboradores catalogaron las especies de ecosistemas sometidos a la presión de la pesca comercial.¹ La extracción de peces de gran tamaño y con una vida larga, asociados a la comunidad clímax, se traducía en una superpoblación de anguilas de arena, que tienen un escaso valor comercial. Los investigadores asociaron la proliferación de estos peces más pequeños y de reproducción más rápida con la merma de especies sobreexplotadas como el arenque y la caballa. He aquí un ejemplo de sucesión empujada hacia atrás. Los grandes bancos de arenques y caballas tipifican el ecosistema marino clímax por el que suspiran los pescadores. La extracción de estos peces retornaba el ecosistema a fases sucesionales anteriores, caracterizadas por una mayor representación de especies de ciclo vital más corto. Esta reversión ecosistémica parece ser universal. Recortar el suministro de energía o alterar la integridad interconectada del ecosistema menoscaba su capacidad degradativa, forzándolo a volver a fases inmaduras que ya había superado. En las personas, la regresión psicológica también es propiciada por la falta de energía o el estrés. Cuando la energía disponible para el desarrollo de sistemas complejos se recorta, estos sistemas revierten a un nivel funcional más primario.

La tala de los bosques de roble y abeto es el equivalente terrestre de la esquilmación de los bancos de peces. Puesto que los ecosistemas son redes anidadas, las tensiones casi nunca los matan, sino que los devuelven a un estadio de complejidad anterior en el que predominan las especies *r* colonizadoras. La reversión ecosistémica es similar a la que se da en sistemas no vivos como los vórtices de Taylor, cuyos pares de remolinos giratorios disminuyen cuando decrece el gradiente de presión. Tanto

en los sistemas vivos como en los no vivos, la reversión a modos anteriores es inducida por una reducción del flujo de energía. La tensión provoca que el sistema reductor de gradientes revierta a modos anteriores que funcionan con menos energía.

A nivel planetario, los seres humanos parecen una especie pionera. En unas pocas generaciones nos hemos multiplicado de manera explosiva. Este crecimiento rápido recuerda la fase de alta producción de entropía de un ecosistema joven. Pero si realmente somos la especie *r* de un nuevo ecosistema global, no sabemos qué tipo de ecosistema es, puesto que nunca antes ha existido nada parecido sobre la Tierra. Convertirnos en administradores del planeta es una noble vocación. Sin embargo, cuanto más rápidamente prolifera una especie, mayor es la probabilidad de que virus, bacterias, hongos y otros animales la amenacen como si de un succulento gradiente por devorar se tratase. Esto modera el crecimiento sesgado de una parte del sistema a expensas del resto. Parece que un ecosistema global en su clímax debería conllevar una mayor diversidad de especies y una mayor eficiencia general de las que vemos hoy, así como una población humana más reducida.

Existen varias medidas de la eficiencia ecosistémica. Una de ellas es la producción requerida para mantener una unidad de biomasa, de la que ya hemos hablado. Los ecosistemas maduros y los organismos adultos presentan una menor producción de entropía por unidad de masa, aunque procesen más energía (y produzcan más entropía en total). Alcanzan tamaños máximos. Los niños tienen temperaturas basales más altas que los adultos, en correspondencia con sus tasas de crecimiento mayores, pero con el tiempo se vuelven adultos y entonces requieren menos calorías por unidad de masa. En cuanto dejan de crecer, canalizan la energía en operaciones de mantenimiento, y hacen un uso más eficiente de ella.

La tensión, sin embargo, puede tener como consecuencia que un organismo o ecosistema revierta a modos anteriores, menos eficientes, de gestionar el flujo de energía. Los grandes árboles de los bosques maduros son vulnerables a los vendavales y las plagas. Asimismo, los bosques maduros de las zonas templadas acumulan biomasa seca en el suelo, que arde en cuanto cae un rayo o una cerilla. No obstante, los bosques maduros quemados renacen de sus cenizas, regenerándose a partir de semillas y brotes, y recomenzando el proceso de la sucesión. Los incendios no lo queman todo.

Incluso después de los calamitosos vertidos de petróleo del *Amoco Cadiz* frente a la costa francesa y del *Exxon Valdez* frente a la costa de

Alaska, los ecosistemas marinos de estas áreas han revivido. El petróleo forma una superficie digerible por comunidades bacterianas. Posteriormente llegan el plancton y otros organismos para revitalizar el ecosistema. Sin embargo, si las tensiones se mantienen sin tregua, los ecosistemas pueden sufrir drásticos declives en su capacidad de degradar los gradientes disponibles.

La curva de recuperación de la biomasa en ecosistemas severamente estresados muestra una pauta en diente de sierra (figura 13.3A, en el capítulo anterior). El crecimiento se reanuda a rachas y describe un lento ascenso hacia la madurez. La capacidad de regeneración de las comunidades clímax les confiere robustez. Aun así, son vulnerables; esta fragilidad quizá sea atribuible al alto nivel de sus interconexiones.

El metabolismo está ligado a la «salud» ecosistémica. Los organismos adultos se comportan en muchos aspectos como los ecosistemas. Ambos maximizan su capacidad de utilización de la energía y sufren declives en su capacidad de integrar nuevos materiales. Las reacciones metabólicas liberan calor y desechos materiales. Una corta carrera subiendo unas escaleras eleva nuestra tasa metabólica y nuestra temperatura corporal. También induce la fermentación, una vía metabólica más primitiva y menos eficiente, que reemplaza la respiración en nuestras células musculares y conduce a la acumulación de ácido láctico, al no completarse la combustión del azúcar en dióxido de carbono y agua. Una aceleración metabólica ligada a una subida de la temperatura acompaña a muchas enfermedades; de ahí que la toma de la temperatura del paciente sea lo primero que hacen médicos, padres y enfermeras en situaciones de urgencia. Tal vez no sean conscientes de ello, pero están evaluando la condición termodinámica del paciente. Buscan si se ha producido un incremento temporal considerable de la tasa metabólica o, lo que es lo mismo, la producción de entropía. Si es así, se concluye correctamente que el paciente está enfermo. En el organismo o ecosistema enfermo, la reducción de gradientes puede acelerarse temporalmente, pero esta aceleración no es sostenible, porque es un reflejo de la incapacidad de mantener los modos superiores y más duraderos de reducción de gradientes alcanzados por el organismo adulto sano o el ecosistema maduro.

La temperatura corporal de los mamíferos no es constante. Cambia con la hora del día, el estado de la digestión y el ciclo de sueño-vigilia. Aunque no está en equilibrio, la fisiología mamífera tiene muchos aspectos «estacionarios», especialmente cuando el animal no se encuentra en una fase de crecimiento rápido. La variabilidad del metabolismo re-

fleja la suplementación natural de los modos metabólicos primarios con otros más eficientes desde el punto de vista energético.

Se producen cambios metabólicos en respuesta a temperaturas extremas. Alexander Zotin, investigador del Instituto de Biología del Desarrollo de la Academia de Ciencias de la antigua Unión Soviética, midió el consumo de oxígeno en huevos de carpa.² Entre los 14 °C y los 20 °C, el consumo de oxígeno era mínimo. Cuando la temperatura bajaba de 8 °C o subía a más de 28 °C, el consumo de oxígeno se doblaba (figura 14.1). El consumo de oxígeno refleja la actividad metabólica y la producción de entropía: Zotin concluyó que las temperaturas extremas obligaban a los huevos en desarrollo a forzar su motor metabólico. Otras tensiones suscitan respuestas parecidas: los organismos acuáticos y terrestres expuestos a tóxicos manifiestan una aceleración metabólica, un aumento de la temperatura corporal y una producción de entropía temporalmente incrementada. La producción de entropía específica tiende a un mínimo estacionario, aunque puede operar dentro de cierto rango dinámico. En su zona confortable, alrededor de los 16 °C para los huevos de carpa, la actividad metabólica es lenta. Cuando se tensa por enfriamiento o calentamiento, el sistema se comporta de manera más inmadura, como formas de crecimiento más rápido, revirtiendo a tasas metabólicas más elevadas.

La relación entre temperatura y tasa metabólica describe una curva parabólica. El cambio de temperatura induce una respuesta dinámica. Cuando la tensión cesa, el metabolismo vuelve a su tasa mínima y presumiblemente óptima. Los organismos que operan en su zona de confort no maximizan tanto la producción de entropía y calor como la capacidad de continuar haciéndolo; la biología camina sobre una delgada línea entre la reducción de gradientes y la supervivencia. Por otro lado, sin energía no hay vida como tal. No va a ninguna parte, ni hace nada. Puede permanecer en estado de latencia, esperando en forma de semillas, esporas, quistes o cápsulas. Pero lo que reconocemos como vida, desde fuera como biólogos o desde dentro como personas, depende de la transformación de energía. Ésta es la razón por la que el cese de la actividad cardíaca o cerebral se relaciona con las definiciones legales de muerte. Por otro lado, la reducción máxima de gradientes asociada a un exceso de comida o de ejercicio, o a un crecimiento demasiado rápido de la población, puede comprometer fatalmente los sistemas reductores de gradientes de la vida. Ni quemarse ni apagarse: éste es el mandato que debe obedecer la vida, una clase de fuego genético.

Los organismos sanos manifiestan una suerte de sabiduría natural. Conservan sus recursos para preservar a largo plazo la capacidad reduc-

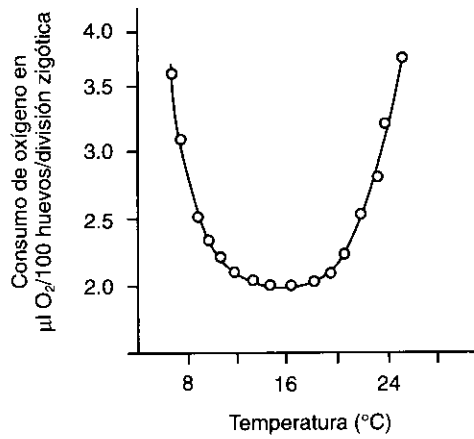


Figura 14.1. Consumo de oxígeno de 100 huevos de carpa durante una división zigótica a diferentes temperaturas. El consumo de oxígeno se mide en microlitros de oxígeno consumidos durante una división zigótica. Esta medida es una buena estimación de la actividad metabólica y la producción de entropía. Dentro de un rango de temperaturas de 15 °C a 20 °C, el consumo de oxígeno y, por ende, la tasa metabólica basal se minimizan. Cuando la temperatura está por encima o por debajo de estos límites, los huevos están estresados, y tanto la tasa metabólica específica como la disipación aumentan. Los ecosistemas se comportan de manera parecida: sometidos a tensión, revierten a niveles más altos de disipación específica. (Adaptado de Zotin, 1972.)

tora de gradientes de la que dependen. Se instalan en un estado estacionario, y canalizan la energía disponible hacia el mantenimiento de la vida.

Kimberly Hammond y Jared Diamond examinaron las tasas metabólicas máximas en roedores, aves, marsupiales y personas.³ En condiciones de estrés (por ejercicio intenso, lactancia para alimentar una camada anormalmente numerosa o exposición a temperaturas inferiores a 10 °C), la actividad metabólica aumentaba; en algunos casos llegaba a multiplicarse por siete respecto a la actividad propia del estado de reposo. (El metabolismo de los ciclistas participantes en el Tour de Francia aumenta 4,3 veces por encima de la tasa metabólica basal.)

El trabajo de Hammond y Diamond confirma el de Zotin. El estrés eleva la producción de entropía y disminuye la eficiencia. Cuando el estrés remite, sin embargo, el sistema vuelve a la normalidad metabólica. El rango metabólico evidencia la naturaleza dinámica de la producción de entropía en organismos sensibles a las fluctuaciones de su entorno. La elasticidad metabólica permite a los organismos ajustar su consumo de energía para sobrevivir a los tiempos difíciles.

Bombardeo radiactivo

Durante diez años, George Woodwell y sus colegas del Laboratorio Nacional de Brookhaven bombardearon un bosque maduro de robles y pinos con altas dosis de radiación gamma.⁴ El grupo de Woodwell midió y fotografió los efectos del bombardeo radiactivo, y concluyó que «la radiación destruye en primer lugar los pinos y luego los otros árboles, dejando sólo retoños, arbustos y sotobosque. Una exposición más prolongada mata los arbustos y, por último, los juncos, gramíneas y plantas herbáceas del sotobosque».⁵

Así pues, tenemos aquí la sucesión ecológica de Thoreau y Odum viajando hacia atrás en el tiempo. Mientras que la sucesión tiende a maximizar la captación y la degradación de exergía, la radiación puede invertir el proceso. En este caso, el bosque irradiado revirtió a una fase temprana de su desarrollo como ecosistema, hasta quedar finalmente dominado por especies *r* de crecimiento rápido y líquenes muy resistentes.

Vertidos de petróleo

Con una beca de la Agencia de Protección Medioambiental estadounidense de más de un millón de dólares anuales durante cinco años, un consorcio de universidades analizó intensivamente los efectos del petróleo y sus derivados en los ecosistemas marinos. Los ecólogos marinos del proyecto, entre los mejores del mundo, siguieron los destinos de diversos isótopos radiactivos marcadores a través de ecosistemas perturbados por el petróleo. Un equipo de expertos en plancton observó los microbios de superficie (algas y zooplancton) y las larvas animales; otro equipo rastreó los sistemas bentónicos del fondo marino. Los estudios se realizaron a lo largo de la costa de Narragansett Bay, en el Laboratorio de Investigación del Ecosistema Marino de la Universidad de Rhode Island. El equipamiento consistía en catorce tanques de fibra de vidrio, cuya capacidad era de 13.000 litros cada uno, con agua de la bahía y una comunidad bentónica de 30 cm de grosor y 2,5 metros cuadrados de superficie. Las muestras bentónicas se recogieron de una pieza y se depositaron cuidadosamente en el fondo de los voluminosos tanques. Bombas hidráulicas especiales transportaron algas marinas flotantes (fitoplancton), larvas zooplanctónicas y peces de la bahía hasta el mesocosmos de los tanques sin dañar su delicada estructura. También se incluyeron especies de la superficie bentónica. El agua de los tanques se bombeaba continuamente para ajustar su tasa de renovación a la de la bahía. Este bombeo continuado resem-

braba los tanques de nuevos organismos. En el mesocosmos de los tanques estaba representado el 90 % de las especies de Narragansett Bay.⁶

Estos grandes acuarios de plástico, ahora empleados también en lagos, son los ciclotrones de la ecología moderna. Lo bastante amplios para mantener la estructura y función del ecosistema natural, son también lo bastante abarcables para permitir a los ecólogos manipular los efectos de cambios medibles.

Tras poblar los tanques con organismos sanos, se dejaron pasar cien días para que el conjunto se estabilizara. Durante ese tiempo el fitoplankton produjo casi todo el alimento disponible, que fue consumido y almacenado por los organismos bentónicos: anfípodos, gusanos, moluscos y microorganismos, los cuales representaban la mayor parte de la biomasa del ecosistema. Tras el periodo inicial de estabilización, la razón P/B en el tanque se aproximaba a uno, esto es, casi toda la producción se convertía en biomasa. El sistema convertía el carbono fijado por fotosíntesis en biomasa con una gran eficiencia, y la producción de entropía específica era muy baja.

Posteriormente, el mesocosmos se contaminó con gasóleo a una concentración de 190 partes por mil millones durante 160 días. Esta cantidad de aceite carburante es poco tóxica para la mayoría de organismos marinos, pero plantea problemas potencialmente fatales si la exposición es crónica. Al cabo de cien días de exposición, la razón P/B había ascendido a 230, lo cual implicaba que la producción de nueva materia orgánica excedía con mucho lo que se almacenaba como biomasa. El mesocosmos perdía peso; de hecho, parecía anoréxico.

Aun después de suspenderse la exposición al gasóleo, la razón P/B continuó aumentando hasta 250, una tasa metabólica muy ineficiente. Aunque se registraron muchos otros cambios, la caída de la eficiencia y el aumento de la razón P/B y la producción de entropía específica fueron drásticos. Luego ocurrió algo extraño. Al cumplirse ochenta días desde la suspensión de la exposición al petróleo, de manera casi increíble, la razón P/B del ecosistema había vuelto a sus valores bajos originales. En términos termodinámicos, el mesocosmos había vuelto a su equilibrio dinámico estacionario previo a la situación de estrés. Al principio, de modo muy parecido a lo que pasa con un animal enfermo, el metabolismo se aceleró (como evidenciaba el incremento de la razón P/B y de la producción de entropía específica). Una vez aliviado del estrés, el ecosistema retornó a su estado dinámico pero estable de disipación mínima por unidad de peso. Se había librado de su «fiebre». De nuevo tenemos un sistema termodinámico vivo, en este caso un ecosistema, que se comporta como un animal recuperándose de una enfermedad.

Todos los organismos individuales se encuentran constreñidos por estructuras de construcción propia. Un árbol está cubierto por una corteza; un mamífero, por una piel peluda; y las bacterias gram-negativas, por paredes celulares. Los ecosistemas también tienen fronteras. Un ecosistema maduro deja escapar muy pocos nutrientes y agua.

En el bosque experimental de Hubbard Brook, en New Hampshire, se comenzó en 1965 un experimento para estimar cómo mantienen sus materiales los ecosistemas estresados. Este experimento continúa desarrollándose en la actualidad. Un equipo dirigido por Gene Likens y F. Herbert Bormann, de la Universidad de Yale, estudió enclaves mantenidos por el servicio forestal estadounidense. El programa de investigación que Likens ha llevado a cabo durante toda su carrera científica se centra en la biogeoquímica de los ecosistemas forestales. Sus estudios a largo plazo en el bosque experimental de Hubbard Brook, del que fue cofundador con Bormann, han arrojado luz sobre conexiones críticas entre la función ecosistémica y el uso de la tierra. En el invierno de 1965, se fumigó una cuenca de Hubbard Brook con herbicidas tras haber talado los árboles del lugar. Al cabo de varios años, los investigadores registraron el flujo de agua y nutrientes a través de la cuenca de drenaje, y compararon estos datos con los de cuencas de drenaje similares, situadas en el bosque circundante, que no habían sido taladas ni fumigadas.⁷

Los resultados fueron espectaculares. La escorrentía —la fuga de agua— del sistema deforestado aumentó un 39 % el primer año y un 28 % el segundo año. Revertido, a causa de los pesticidas, a una fase sucesional muy temprana, la integridad del ecosistema declinó drásticamente. Ahora dejaba escapar su recurso más valioso, el agua. Otros materiales valiosos, como el fosfato y el nitrato, también se perdían a una tasa mucho mayor que en las cuencas no degradadas. La pérdida de nitrato se multiplicó por más de cuarenta, lo cual implicaba que en el área tratada con herbicidas había mucho menos nitrógeno disponible para la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos.

Dos años después, el nitrato escapaba a una tasa 56 veces mayor que la de los ecosistemas no perturbados. Mientras que el ecosistema maduro retenía y reciclaba los nutrientes y el agua, el ecosistema degradado estaba perdiendo sus reservas. Las compuertas se habían abierto, y las tasas de pérdida de nutrientes se dispararon: 417 % para el Ca^{++} (calcio), 408 % para el Mg^{++} (magnesio), 1554 % para el K^+ (potasio) y 177 % para el Na^+ (sodio). El pH del agua corriente de la cuenca también bajó (se

hizo más ácido). Además, el agua se calentó, por la ausencia de árboles que dieran sombra, y se enturbió, debido a los sedimentos que arrastraba corriente abajo.

El ecosistema «estresado» perdía nutrientes, agua y sedimentos. Las cuencas más maduras, en cambio, reciclaban estos materiales. El reciclaje aumentado de la materia y la energía es el sello distintivo de los sistemas disipativos maduros.

Los pesticidas, la radiación y el petróleo perturban el funcionamiento de los ecosistemas. Los sistemas sometidos a tales ataques están disminuidos. No captan tanta energía como los ecosistemas sanos ni construyen sus intrincadas estructuras. Tienen cortado el camino hacia la madurez. Tras la tala repetida de los bosques de abetos del oeste de Estados Unidos, éstos han sido reemplazados por bosques de pinos. A diferencia de los de Hubbard Brook, estos drásticos cambios en ecosistemas gigantes no afectan sólo a áreas experimentales restringidas.

Fuga nuclear: historia de dos marismas

En los años setenta, tres discípulos de Howard Odum estudiaron dos marismas adyacentes en la costa sur de Florida.⁸ Junto a una de ellas se había instalado una central nuclear de 2400 megavatios, mientras que la otra se mantenía en su condición natural. La energía de la central era generada por turbinas que se alimentaban del gradiente de temperatura existente entre el agua calentada por las reacciones nucleares y el agua fría de la costa. La central nuclear de Crystal River elevó la temperatura de la ensenada adyacente en 6 °C. Este incremento de la temperatura del agua causó «estrés» en la marisma. Aunque la central era nuclear, el estrés se debía al calor, no a la contaminación radiactiva. Y lo que perturbaba el sistema no era propiamente la temperatura, sino el desplazamiento respecto de las condiciones ambientales de confort del ecosistema.

Mark Homer, Mike Kemp y Henry McKellar analizaron quién se comía a quién en las marismas, y cuánto y cuándo comían. Midieron la energía captada por las algas y plantas verdes, y registraron la transformación energética en compuestos orgánicos cuando los productores eran devorados por consumidores, en su mayoría pastinacas y mújoles. La tabla 14.1 resume la comparación entre el ecosistema estresado y el de control. Como puede apreciarse, el ecosistema estresado mantenía un 34,7 % me-

TABLA 14.1. Ecosistemas estresado y no estresado en Crystal River Creek, Florida

	<i>Control</i>	<i>Estresado</i>	<i>% Cambio</i>
Biomasa ^a	1.157.136	755.213	-34,7
Procesamiento total ^b	22.768	18.005	-20,7
Producción	3292	2575	-22,8
Nº de ciclos tróficos	142	69	-51,4
Nº de conexiones tróficas	49	36	-26,5

^aDatos en miligramos por metro cuadrado y día.

^bDatos en gramos por día.

nos de biomasa. Una vez más, el ecosistema había «enfermado» y había «perdido peso». Igualmente, la circulación energética total había caído casi un 21%. Esta disminución representa una pérdida de la reducción general de gradientes. El ecosistema estresado había regresado a un estado inmaduro, menos funcional.

Aún peor, la compleja red trófica quedó seriamente comprometida: el número de ciclos se redujo a la mitad, con lo que el ecosistema estresado perdió buena parte de su capacidad de reciclaje. El agua caliente de la central nuclear mermó drásticamente la capacidad del sistema para retener el material que había incorporado. Dejaba escapar nutrientes y energía por todas partes. A partir de este ejemplo y los anteriores, podemos ver claramente que el estrés empuja los ecosistemas a estadios de desarrollo inmaduros. Su funcionamiento se simplifica y su diversidad se reduce. Es como si encogieran.

La ecología es una ciencia rica en datos. Cada año se invierten miles de millones de dólares en recopilar y analizar datos ecológicos y medioambientales. Por desgracia, muchas de estas colecciones de datos son incompletas y raramente sintéticas. A menudo se toman datos por alguna razón particular, sin un diseño experimental que permita responder a cuestiones de más envergadura. En este capítulo hemos destacado unos cuantos conjuntos de datos excelentes, fruto de experimentos bien pensados y análisis sofisticados, los cuales nos proporcionan algunos de los hilos comunes que confeccionan el tejido de la ecología. Los conjuntos de datos antes detallados evidencian que los ecosistemas inmaduros y «estresados» tienen menos flujo de energía, menos eficiencia, menos ciclos,

menos circulación de materiales, menos interconectividad y más pérdida de nutrientes y agua que los ecosistemas maduros o «naturales». Las sucesiones son procesos energéticos de despliegue que generan estructuras y procesos para capturar los gradientes disponibles y degradar la energía captada, de la manera más eficiente y completa posible.

El hombre occidental que se declara consciente de su unidad con Dios o el universo [...] choca con la concepción religiosa de su sociedad. En la mayoría de culturas asiáticas, sin embargo, a ese hombre se le felicitaría por haber penetrado el auténtico secreto de la vida. Ha llegado, por azar o mediante alguna disciplina como el yoga o la meditación zen, a un estado de conciencia en el que experimenta directa y vívidamente lo que nuestros propios científicos saben que es cierto en teoría. Porque el ecólogo, el biólogo y el físico saben (aunque apenas sienten) que todo organismo constituye una unidad de comportamiento, o proceso, con su entorno. No hay manera de separar lo que hace un organismo dado de lo que hace su entorno, razón por la cual los ecólogos no hablan de organismos en entornos, sino de organismos-entornos [...]. El científico occidental puede percibir racionalmente la idea de organismo-entorno, pero ordinariamente no siente esta realidad. Por condicionamiento cultural y social, ha quedado hipnotizado por experimentarse a sí mismo como un ego, como un centro aislado de conciencia y voluntad dentro de una bolsa de piel, enfrentado a un mundo externo y ajeno. Decimos «vine a este mundo». Pero no hicimos nada de eso. Salimos de él, igual que los frutos de los árboles.

Alan Watts

Pienso que nunca veré
un poema tan precioso como un árbol.

Joyce Kilmer

Una relación antigua

Los primates bípedos conocidos como humanos tenemos una relación antigua, profunda y mutuamente reforzante con los bosques y los árboles. La abundancia de pruebas circunstanciales que proporciona la anatomía comparada equivale a una demostración de que nuestros ancestros, asumiendo que su forma corporal se parecía remotamente a la nuestra, vivieron durante millones de años entre las ramas de los árboles. Quizá sea por eso por lo que a veces damos un respingo al quedarnos dormidos (un antiguo reflejo de supervivencia para unos mamíferos arborícolas en un entorno relativamente a salvo de los predadores, pero en peligro de caer y romperse los huesos). También parecemos preprogramados para apreciar los colores vivos, los sabores dulces y los olores afrutados, que para

los prosimios y simios representaban ricas reservas de fructosa, el azúcar frutal que puede alimentar la percepción y la locomoción primate. Por supuesto, todavía seguimos necesitando la vitamina C presente en los cítricos, y los publicistas se valen de nuestra ancestral querencia por los colores para llamar la atención sobre prendas, caramelos y revistas. Mientras comían sus frutos, nuestros ancestros no sólo estaban aprovechándose de los árboles: al escupir las semillas o depositarlas con sus excrementos en un medio abonado, contribuían a diseminar las especies de las que se alimentaban.

Hoy seguimos rodeándonos de madera, y a menudo vivimos efectivamente en casas arbóreas modificadas, y la vista y el olor de la madera fresca tienen un efecto calmante sobre nosotros. Es más, el papel y sus derivados, desde el papel higiénico hasta los libros, periódicos y revistas, son un elemento capital de la civilización moderna. En algunos lugares, la tasa de deforestación ha alcanzado cotas alarmantes, y el ejemplo de la humanidad, que históricamente ha talado y quemado áreas arboladas para hacer sitio a los cultivos de grano, constituye una inquietante advertencia acerca del peligro que supone el poder tecnológico sin una planificación a largo plazo. Desiertos que mucha gente considera fenómenos naturales inevitables, como los del Sahara y Oriente Medio, han sido exacerbados, si no causados, por la agricultura y el pastoreo excesivos. Como ocurre a menudo con la reducción relativa de gradientes, la tentación del beneficio inmediato hace olvidar la sostenibilidad a largo plazo. A corto plazo, la entidad miope que maximiza su acceso a las reservas de energía prevalece. Pero si volvemos más tarde, no encontraremos al «maximizador». Una vez más, hay una ecuación, un toma y daca, entre la satisfacción o indulgencia a corto plazo y la supervivencia o sabiduría a largo plazo.

Como el proverbial pez que, rodeado de agua cristalina, no ve el entorno que lo sustenta, a mucha gente le resulta tentador ignorar la importancia de los bosques, tanto en el pasado como en el presente y el futuro. Las áreas arboladas (templadas, subtropicales y tropicales) no son interesantes tan sólo por su belleza, su contenido en fármacos aún no descubiertos o la nostalgia intrínseca que les confiere su condición de cuna natural de la humanidad. En efecto, los bosques y los árboles que los forman representan el no va más de la tecnología biosférica relacionada con la reducción de gradientes. Más allá de lo fascinantes que puedan resultar para los botánicos, el papel mutuamente catalítico que interpretan las plantas en los orígenes y evolución de tantas especies animales,¹ así como el papel energético de los árboles y los bosques, han sido poco apreciados.

Aunque una distinción corriente entre plantas y animales es la pretendida inmovilidad de las primeras, esto no responde a la realidad. Tanto

las plantas como los animales están formados por células nucleadas con cromosomas que manifiestan movimiento intracelular. Su descendencia común es sugerida por los ginkgos y los musgos, que producen gametos masculinos nadadores casi indistinguibles de los espermatozoides animales, salvo por la posesión de cabezas con cloroplastos verdes. De hecho, algunos animales han establecido asociaciones secundarias con componentes vegetales: caracoles, bivalvos y gusanos como *Convoluta roscoffensis*, que parecen algas pero pueden escapar de los predadores, dan testimonio de la capacidad de los genes, metabolitos y sustancias nutritivas de fluir entre organismos otrora separados. Algunos organismos unicelulares, como *Euglena*, nadan como las células animales pero fotosintetizan como las plantas. De modo que la división entre animales y plantas no es infranqueable, especialmente porque la condición termodinámica de los organismos los mantiene abiertos a los flujos materiales y de información. Además, las plantas también se mueven en tiempo real (como puede verse fácilmente cuando se proyecta a cámara rápida el crecimiento de brotes, raíces y flores).

Desde el punto de vista de una inteligencia extraterrestre, digamos una estrella de neutrones perceptiva, el crecimiento vegetal podría parecer más fundamental y medido, y menos peligrosamente impulsivo —por no decir menos parasitario—, que la vida animal. Después de todo, las plantas producen su alimento a partir de elementos del aire y el agua bajo la influencia de la luz solar, en lugar de devorar los cuerpos de aquellos que producen el alimento en primera instancia, como hacen los animales. Y su crecimiento más lento, que nosotros, primates bulliciosos, encontramos literalmente equiparable a la discapacidad, puede compararse con los movimientos de los adultos tal como los ven los revoltosos niños, cuyos juegos parecen ser una actividad absolutamente esencial.

Buscando la luz

Examinemos la energética de un árbol aislado o de un geranio en una ventana. ¿Por qué crece el árbol hacia el sol y por qué tiene una forma simétrica? ¿Por qué las hojas del geranio se aprietan contra el vidrio de la ventana? La respuesta obvia es: para captar la energía solar y convertirla en biomasa y semillas, y así asegurar la continuidad de la planta como especie. Las semillas germinan y la planta resultante produce semillas bien adaptadas. En la jerga darwiniana, la adaptación es una medida del éxito reproductivo, que incluye factores como la mortalidad diferencial, la viabilidad, el impulso y éxito reproductivo, y la fecundidad diferencial.²

Resulta evidente que la tendencia a crecer y producir semillas está hondamente arraigada en la genética de las angiospermas, o plantas con flores, y se lleva adelante desde el pasado con todo el brío de un *telos*, o meta. La arquitectura y el color de las hojas, la ramificación, la copa de los árboles: todos estos rasgos comunes de los bosques parecen diseñados para captar toda la luz posible. Salgamos a mirar los árboles de nuestro barrio. Cada especie tiene una forma distintiva (figura 15.1). Cada organismo se adapta a las ligaduras de su entorno local. La mayoría de árboles crece simétricamente, pero el viento y otros accidentes pueden arrancarles ramas y modificar su forma. Aun así, la forma básicamente simétrica de un árbol puede apreciarse a través de sus retorcidas ramas. Casi todos los árboles son simétricos hasta el tronco, pero a menudo dos o más ramales principales se desarrollan como uno solo. Es frecuente ver grupos de árboles de diferentes especies que crecen simétricamente para compartir los recursos solares. La relación entre los árboles y el Sol quizá sea el ejemplo más poderoso, simple y pertinente de nuestro paradigma termodinámico. Los árboles que intentan «alcanzar» el disco solar y capturar y degradar de manera óptima el gradiente entre el Sol y el espacio exterior frígido parecen encarnar gráficamente nuestra visión del aspecto termodinámico del mundo biológico. Salgamos a observar los árboles, y veremos sistemas disipativos vivos que se alzan hacia el cielo para captar la energía solar disponible.

La vida almacena energía solar en moléculas orgánicas. Procesos bioquímicos fijan la energía en los productos fotosintéticos y la celulosa. Posteriormente otros procesos heterotróficos (a cargo, primero, de seres que devoran las hojas y la madera muerta y, después, de otros seres que devoran a aquéllos) devolverán los fotones capturados al entorno en forma de calor no aprovechable. La planta, como una célula de Bénard gigante y químicamente sofisticada, explota un gradiente para adquirir estructura y degradar la energía solar de alta calidad en calor de baja exergía. Este proceso es consecuencia del imperativo termodinámico conducente a la degradación más completa posible de la calidad de la energía solar incidente.

Las plantas quizá sean el más avanzado instrumento evolucionado hasta ahora para degradar la radiación solar incidente. Un corolario de la aversión de la naturaleza hacia los gradientes es que un sistema al que se le imponga un gradiente puede desarrollar procesos y estructuras que retarden la caída inmediata de la materia y la energía hacia el equilibrio, mientras degradan, de la manera más completa posible, el gradiente impuesto. Ya hemos discutido el origen de la vida y la evolución de los organismos quimiotróficos y fototróficos. Las células vivas adquirieron



Figura 15.1. Estos árboles de diversas especies difieren en la estructura de su ramificación y su copa, así como en las distintas estrategias aplicadas para optimizar la captación de energía solar. La forma simétrica de los árboles individuales da fe de esta estrategia solar y es una manifestación de la segunda ley de la termodinámica. La información genética dota a cada especie de una forma básica, pero factores ambientales como el viento, la aglomeración y la altitud alteran su naturaleza original.

conjuntos de reacciones a través de las cuales se separa temporalmente un fotón de alta energía del haz de radiación solar incidente y se emplea dicho fotón para romper moléculas de agua y reducir el dióxido de carbono, con el objetivo de sintetizar carbohidratos. En las reacciones de la fotosíntesis, el dióxido de carbono y el agua, bajo la influencia de la luz, producen carbohidratos y oxígeno gaseoso. La respiración (la oxidación química de los carbohidratos por el oxígeno) invierte el proceso. Las reacciones fotosintéticas de asimilación de dióxido de carbono y producción de oxígeno determinan en gran medida la concentración de estos gases vitales en nuestra atmósfera, además de producir la mayor parte de la biomasa orgánica sobre la Tierra.

La fotosíntesis, un proceso complejo de captación y transformación de energía, se comprende bien. «La conversión de la luz solar en energía

química es conducida por complejos proteínicos membranales con múltiples subunidades: la estructura cristalina del [...] fotosistema [...] contiene 12 subunidades centrales, 4 receptores de luz membranales, 45 hélices transmembranales, 167 clorofilas, 3 complejos Fe-S y 2 filoquinonas.»³ Esta maquinaria química altamente compleja evolucionó inicialmente hace unos dos mil millones de años con la aparición de cianobacterias productoras de oxígeno, lo que condujo por primera vez a la presencia de oxígeno en la atmósfera. Estos procesos tan antiguos han permanecido virtualmente invariables durante mil millones de años, pues las estructuras fotosintéticas de las plantas superiores son básicamente las mismas que las de las cianobacterias.

Contemplemos las plantas como un sustrato susceptible de evolución con procesos que les permiten modificar su capacidad de degradar la radiación incidente. Este sustrato vegetal puede cambiar de orientación, color o procesos fotoquímicos para degradar mejor el gradiente impuesto. Si existen vías cinéticas que puedan degradar dicho gradiente de manera más completa, serán seleccionadas. Por ejemplo, si el calor de una casa dispone de dos rutas simultáneas para alcanzar el equilibrio en relación con el aire invernal exterior, a través de una puerta abierta o a través de una rendija en una ventana, la trayectoria hacia el equilibrio discurrirá principalmente a través de la puerta abierta. El equilibrio toma el camino de mínima resistencia. Si las puertas abiertas y las rendijas fueran rasgos seleccionables, la puerta abierta sería la ruta escogida para la disipación. Ahora aceleremos esta transición hacia el equilibrio abriendo todas las ventanas de la casa. En las plantas, cada nueva hoja es como una ventana abierta, otra vía para la disipación.

La radiación solar es una forma de energía intensa con un amplio espectro de frecuencias, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, la mayoría correspondientes al intervalo visible. En las capas altas de la atmósfera, el flujo de energía es de 0,485 calorías por centímetro cuadrado y por minuto. La superficie terrestre recibe sólo la mitad de esta radiación.⁴ El resto se refleja o es absorbido por las nubes. David Gates, biólogo vegetal conocido por su librito *Energy Exchange in the Biosphere*, realizó medidas precisas de la radiación solar y térmica en la atmósfera y la superficie terrestre. Gates señaló que la energía solar incidente interacciona con las nubes y la atmósfera, de manera que sólo la mitad llega a la superficie. Además, la fracción de la radiación incidente sobre una hoja que se incorpora fotosintéticamente a la biomasa vegetal es sorprendentemente baja. Por ejemplo, en el caso de un roble típico, únicamente alrededor del 1% de la radiación captada se incorpora a la biomasa. Los bosques de robles de entre 20 y 40 años tienen una eficiencia fotosinté-

tica del 1,5 %-1,7 %. La eficiencia fotosintética cae al 0,88 % en los árboles de cien años, y al 0,40 % en los de doscientos años.⁵

Una planta refleja en torno al 15 % de la radiación que incide sobre ella, emite otro 18 % en forma de calor y fija un 1 % en la producción de biomasa. El 66 % restante se invierte en la transpiración y el ascenso del agua de las raíces a las hojas (figura 15.2). En éstas, el agua líquida pasa al estado gaseoso y se difunde en la atmósfera a través de poros microscópicos llamados «estomas», situados en el envés de las hojas. Los estomas controlan el intercambio de gases, en particular vapor de agua y dióxido de carbono, entre la hoja y el aire circundante. Su abertura oscila entre 10 y 80 micras, y su densidad entre 5 y 1000 por milímetro cuadrado de epidermis.⁶

La cantidad de agua que sale por estos diminutos poros es prodigiosa. El máximo volumen de transpiración se da en los cálidos trópicos, con 32×10^{15} litros de vapor de agua anuales. En un estudio que abarcaba más de cincuenta especies de árboles, las tasas de transpiración variaban entre los 10 litros diarios de los robles de la región oriental de Francia y los 1.180 litros diarios medidos en un gran árbol de la selva amazónica.⁷

La mayoría de árboles transpira entre 10 y 200 litros diarios. El proceso de transpiración depende de factores como la radiación solar, la humedad, la accesibilidad del agua subterránea, la temperatura, el viento y los procesos convectivos que se llevan la humedad transpirada por la hoja. La pérdida de agua por las plantas depende principalmente del gradiente de presión de vapor entre el interior de la hoja y el aire exterior.

Cuando el agua accesible en el suelo disminuye, la transpiración también lo hace. Se trata de un fenómeno notable. Cuando el suelo se seca, los árboles rebajan sus tasas de fotosíntesis y transpiración. Así pues, aquí tenemos un sistema biológico que autorregula sus procesos metabólicos para funcionar a un nivel «óptimo», no necesariamente al máximo. Si los árboles trabajaran al máximo de su capacidad transpiratoria, no tardarían en agotar el agua disponible, se marchitarían y morirían. La transpiración intensiva requiere unas 580 calorías por gramo de agua transpirada. Esto quiere decir que, para transpirar 100 litros de agua, un árbol necesita cerca de 60 millones de calorías. Estas 580 calorías no se pierden para siempre. En este caso, el calor latente transpirado queda almacenado en el vapor de agua aportado por los árboles a la atmósfera. Las 580 calorías se liberan más tarde cuando el vapor se condensa y llueve. En las selvas tropicales, el agua se transpira a un ritmo prodigioso, y se recicla en forma de lluvia en cuestión de horas. Aquellos que han vivido en los trópicos conocen los fuertes chaparrones vespertinos tras una mañana de cielo despejado. Este enorme sistema disi-

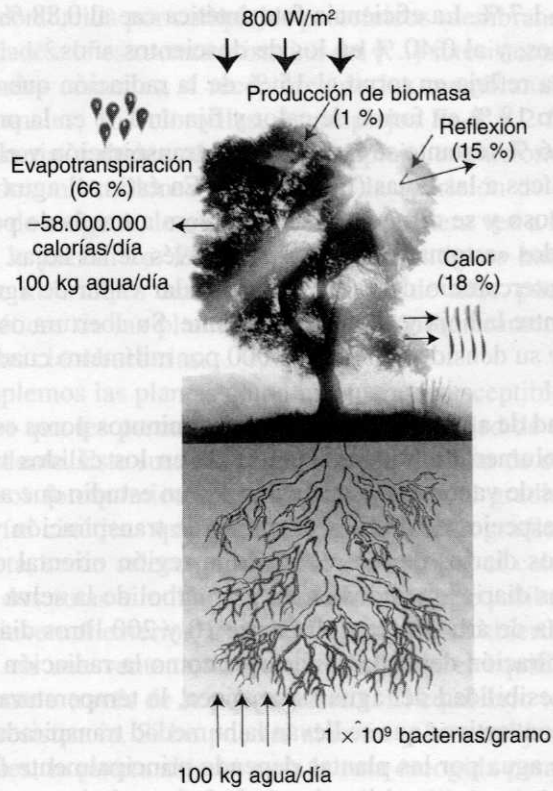


Figura 15.2. Durante las horas de luz, la radiación solar incide sobre la superficie terrestre a una tasa de unos 800 vatios por metro cuadrado. Sólo el 1% de la radiación que incide sobre un árbol se incorpora a la biomasa de la madera y las hojas. El 18% de la energía que incide sobre una planta se emite en forma de calor, mientras que un 15% se refleja. La mayor parte de la energía consumida por la planta, alrededor del 66%, se invierte en la evapotranspiración, la conversión de agua líquida en vapor de agua. Un árbol caducifolio típico de veinte metros de altura transpira 100 litros de agua diarios. Este proceso requiere 58 millones de calorías. Los árboles son sistemas disipativos gigantes que incorporan energía de alta calidad (radiación ultravioleta y visible) y liberan la mayor parte de esa energía en forma de calor latente de baja calidad.

pativo natural, consistente en organismos (en este caso, árboles) y su entorno, está propulsado por el sol.

Podemos imaginar (y no tenemos más remedio que hacerlo, porque este proceso no puede apreciarse a simple vista) que un árbol en medio del campo es una estructura disipativa gigante que capta luz solar de alta exergía y degrada la mayor parte de esa energía en calor transpirado. Es como una fuente gigante que mana agua en forma de calor latente. O como

una vela que quema cera de alta exergía (la llama rompe enlaces químicos de alta exergía) y degrada ese combustible en calor (aunque los comensales no lo noten). Parece ser que un escaso 1% de la energía puesta en juego por la planta va a parar al minúsculo motor fotosintético que controla estos inmensos sistemas disipativos. A pesar de este balance claramente favorable a la disipación sobre el crecimiento, raramente pensaríamos en un roble, con su dura madera, sus hojas y sus bellotas, como una estructura física diseñada para llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis. En realidad, el árbol se comprende mejor como un degradador gigante de energía. Su imponente estructura pasa a un segundo plano si la comparamos con su actividad degradativa de la energía solar.

Los árboles despliegan activamente sus raíces y hojas para absorber el agua y la energía, dos ingredientes necesarios para incrementar la disipación. *Si las condiciones cinéticas o dinámicas lo permiten, son de esperar procesos organizativos.* Cada nueva hoja, cada nueva predisposición fototrófica, es una nueva oportunidad para la degradación de energía. En resumen, el dicho cartesiano «pienso, luego existo» se convierte en «existo porque disipo». La disposición foliar de las plantas individuales es una manifestación del impulso teleomático de capturar y degradar la energía. Aún más asombrosa es la disposición de tallos, ramas y hojas de distintas especies en el interior de un bosque. Parecen haber seguido los dictados de un coreógrafo. El colectivo parece distribuirse en grupos dispuestos para captar la máxima cantidad de energía para todos. En el suelo de los bosques densos, plantas de hojas anchas recogen los últimos restos de la luz solar. Además de un proceso darwiniano, el crecimiento vegetal es un fenómeno termodinámico.

Aquellos que vislumbran un vínculo fundamental entre la flecha termodinámica de la disipación energética y la flecha biológica de la tierra reverdeciente son una pequeña minoría, y se sitúan al margen de la corriente principal de la ciencia biológica contemporánea. Pero si su visión es verdadera, revela esa profunda continuidad entre física y biología, la fuente última de la vida.

Franklin M. Harold

Detección no tan remota

Los ecosistemas manifiestan una dirección: un incremento en la reducción de gradientes con el transcurso del tiempo. Cuanto más madura un ecosistema, más energía solar degrada. No es una teoría, sino un hecho: la riqueza ecológica se correlaciona con la reducción del gradiente de temperatura. Las selvas son más frescas que las sabanas o los desiertos. En contra de las incursiones en la naturaleza de los sistemas complejos que proclaman una semejanza potencial entre modelos simulados por ordenador y patrones de desarrollo naturales, la complejidad viva está directamente relacionada con la degradación energética. Los datos son firmes. La base energética de los sistemas cíclicos complejos no es una mera posibilidad teórica, sino que organiza el mundo real.

Técnicamente, podemos medir la caída de exergía (esto es, la degradación de gradientes) a través de los ecosistemas comparando la energía solar entrante con la temperatura superficial de la energía reemitida por el ecosistema al espacio. «Si ecosistemas dispares reciben la misma cantidad de energía incidente, esperaríamos que el más maduro reemitiese su energía con el nivel más bajo de exergía, esto es, el ecosistema más maduro tendría la temperatura más baja de un cuerpo negro.»¹ Lo que hace un ecosistema en desarrollo es degradar el contenido exergético de la radiación solar incidente y, al mismo tiempo, ir construyendo un ecosistema planetario tal que el gradiente de temperatura entre la Tierra y el espacio exterior (2,7 K) se minime. Éste es el gradiente que nos interesa (figura 12.1, en pág. 211). El ecosistema planetario (la biosfera) extrae exergía de la radiación solar incidente, a la vez que reduce el gradiente entre los sistemas vivos ligados a la Tierra y el espacio exterior a 2,7 K (la temperatura residual del universo). El ecosistema debe ser entendido como una parte activa, con procesos y estructura, que se configura para obtener y degradar tanta exergía como sea posible.

Los fenómenos contemplados en el desarrollo ecosistémico de Eugene Odum y nuestro paradigma termodinámico parecen avenirse. Los datos de los experimentos de Hubbard Brook y Crystal River respaldan firmemente nuestra teoría de que los sistemas sometidos a estrés experimentan un retraso sucesional, una razón P/B con ciclos más cortos y rápidos, una disminución de la eficiencia, una pérdida de nutrientes y una capacidad de degradación limitada. Otro conjunto de experimentos evidencia que los ecosistemas maduros realmente degradan el contenido de exergía de la luz solar de manera más completa que los ecosistemas menos maduros (véase más adelante).

Antes de pasar a otro tipo de cálculo energético relacionado con los ecosistemas, debemos distinguir entre los diversos flujos energéticos considerados por los ecólogos. En los cálculos ecológicos vistos hasta ahora, se tomaban flujos materiales como estimadores de flujos energéticos. La mayoría de estos análisis de «flujos» se basa en adoptar el carbono como moneda. Estos flujos no son imaginarios, porque la moneda del carbono puede convertirse fácilmente en una moneda calórica. A continuación examinaremos otro conjunto de presupuestos energéticos, venidos directamente del Sol, para ver cómo se invierte esta energía en procesos físicos y biológicos a escala global, regional y local.

Varios procesos dependen de cómo se degrada la energía solar directamente en energía de inferior calidad cuando incide sobre la Tierra. Entre las variables que consideraremos se encuentra la *radiación solar incidente neta*, la cual se mide mediante un espectrofotómetro que descompone el espectro energético de la luz incidente para determinar su calidad. Por ejemplo, los fotones de alta frecuencia de la luz ultravioleta tienen mayor contenido en exergía que la radiación infrarroja. Lo que nos interesa saber es cuánta energía solar se refleja hacia el espacio y cuánta se convierte en calor no aprovechable. Este calor es del mismo tipo que el radiado por el asfalto recalentado de una plaza de aparcamiento a pleno sol. Los fotones ultravioleta de alta calidad se convierten en energía de vibración molecular de baja calidad (calor) al incidir sobre una superficie negra. Otra porción de la energía incidente se convierte en calor latente, empleado para transpirar y evaporar agua. Vaporizar agua y transferir calor latente a la atmósfera requiere 580 calorías por gramo de agua evaporada. El calor latente también es energía de baja calidad almacenada en la humedad atmosférica. Las 580 calorías por gramo de agua evaporada se saldan en el presupuesto calórico global cuando el proceso se invierte y se producen precipitaciones de lluvia o nieve. Las tormentas y huracanes obtienen parte de su energía al liberar calor latente con la lluvia.

La reducción de gradientes puede estimarse mediante la medición remota de las temperaturas de diversos ecosistemas a pleno sol en un día despejado. Después pueden compararse los ecosistemas. Aplicando este procedimiento, uno de nosotros, Eric, y James J. Kay, de la Universidad de Waterloo, evidenciaron una reducción de gradientes superior en los ecosistemas más complejos.² Incapaces de degradar tanta energía, los ecosistemas inmaduros, como las praderas, deberían ser más cálidos que los ecosistemas forestales maduros. Los registros por satélite de las temperaturas superficiales confirman esta predicción. El primer conjunto de datos analizado fue la emisión de radiación de onda larga. Los escáneres a bordo de satélites del Servicio Meteorológico estadounidense en órbita polar toman estos datos de manera rutinaria, y el Centro de Análisis del Clima de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica elabora un mapa de temperaturas mensual. Los mapas globales, como el de febrero de 1991 (figura 16.1), se ajustan a la teoría del gradiente. Las selvas son muy frescas y los desiertos muy cálidos: la diferencia de temperatura (el gradiente interplanetario entre el Sol caliente y el espacio frío) es minimizada por los ecosistemas selváticos más complejos y mejor desarrollados.

Había un dato que llamaba la atención. Febrero es el mes más cálido en las selvas del Congo, Indonesia, Java y la cuenca amazónica. Pero en estas áreas se registraban valores de radiación emitida de unos 200 vatios por metro cuadrado (los mismos que se registraban en el norte de Canadá en pleno invierno). Como podía esperarse, los ecosistemas no eran cálidos, sino que, al degradar el gradiente solar, tendían a igualar la diferencia entre el incandescente Sol y el frígido espacio exterior. Disipaban el calor ecuatorial en la inmensidad fría.

A esta clara evidencia de una reducción de gradientes más efectiva en los ecosistemas más complejos puede ponerse una objeción: el espectrómetro en órbita no efectúa su medida sobre el propio ecosistema, sino sobre la primera superficie que encuentra (las selvas suelen estar cubiertas de nubes, mientras que sobre los desiertos apenas hay nubes). De manera que lo que se estaba registrando no era la temperatura «verdadera» del ecosistema, sino la de su cubierta de nubes.

Esta objeción pierde fuerza si se piensa que las nubes forman parte (de manera crucial) del ecosistema de la selva ecuatorial. Las nubes, generadas por la transpiración de los árboles subyacentes, no pueden separarse del ciclo termodinámico. El agua se transpira a través de las miríadas de estomas de las hojas. Las nubes proporcionan lluvia a los árboles, cuya transpiración genera nubes: es un ciclo, y las nubes son una parte integral del sistema. Los ecosistemas se refrigeran exportando al espacio entropía en forma de calor. Esto es lo que vemos cuando nos quitamos

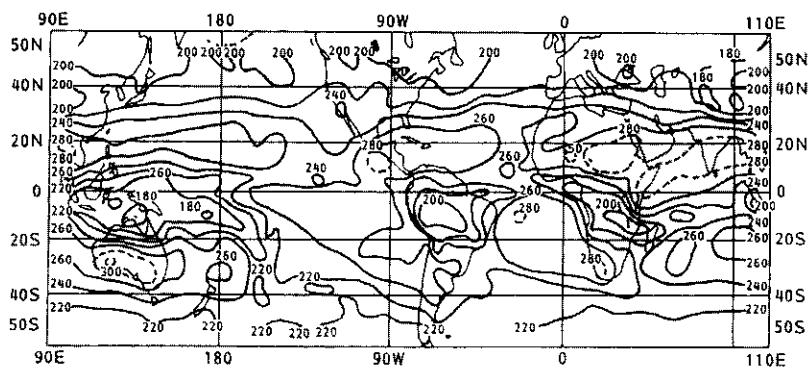


Figura 16.1. Radiación media de onda larga emitida en vatios por metro cuadrado, registrada por satélite para mostrar la reemisión global al espacio. Esta reemisión resulta proporcional a la temperatura de la superficie terrestre. Dejando aparte los océanos y centrándonos en los continentes, resulta evidente que las regiones desérticas son cálidas, mientras que las regiones selváticas (Amazonas, Congo, Indonesia, Nueva Guinea, Borneo y otras) aparecen frescas. Las temperaturas bajas asociadas a las selvas no siempre corresponden a la superficie o la cubierta vegetal, sino a las nubes altas. Las nubes se forman sobre las selvas debido a la transpiración foliar. El bosque y las nubes son un sistema acoplado que refresca la Tierra. Los registros en ausencia de nubes muestran la misma pauta de desiertos cálidos y selvas frescas. (Cortesía del Centro de Análisis del Clima de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.)

las gafas reduccionistas que usamos para ver de cerca y nos ponemos unas gafas termodinámicas para ver el cuadro general de los sistemas abiertos reductores de gradientes. Las selvas degradadas se calientan y sus nubes asociadas desaparecen. En las selvas sanas, se producen cumulonimbos como resultado de la relación entre las plantas y el sol ecuatorial. Compilaciones recientes de medidas de radiación de onda larga en ausencia de nubes evidencian que, aun sin su pantalla nubosa, las temperaturas de las regiones selváticas son más frescas que las de los desiertos (http://www.osdpd.noaa.gov/PSB/EPS/RB/RB_images/gn16_clskey.gif).

Los paleontólogos han insinuado que existe una tendencia a largo plazo de enfriamiento global del clima, como resultado de la fijación del dióxido de carbono atmosférico por parte de las plantas. Cuando los cuerpos de estas plantas quedan enterrados entre estratos sedimentarios (y dan así lugar a fósiles y combustibles fósiles), los niveles atmosféricos de dióxido de carbono (un gas de efecto invernadero) descienden y, como consecuencia, el planeta se enfría. La quema de combustibles fósiles invierte el proceso. Los gases de efecto invernadero son transparentes a la radiación de onda corta, como la luz ultravioleta, pero reflejan la radia-

ción de onda larga y la devuelven a la superficie. La radiación infrarroja así atrapada calienta la biosfera de modo muy parecido a lo que ocurre dentro de las paredes de vidrio de un invernadero. Aparte del efecto invernadero asociado al uso de combustibles fósiles, también hemos de preocuparnos por el deterioro global de los sistemas de transpiración. Puesto que los árboles tienen una intervención directa en la refrigeración de los ecosistemas, talarlos también contribuye a su calentamiento. La deforestación no sólo destruye especies, sino que moviliza el dióxido de carbono secuestrado en los árboles, lo que conduce rápidamente a un incremento de la temperatura media local.

Temperaturas ecosistémicas

El astronauta y científico atmosférico Pierre Sellers y su colega Yale Mintz, de la NASA,³ analizaron la atmósfera y la biosfera como un sistema disipativo conjunto, para lo cual se valieron de una base de datos de temperaturas tomadas por satélite. Sellers y Mintz concibieron un modelo que respaldaba el vínculo entre enfriamiento y salud ecosistémica. El modelo mostraba los caudales energéticos superficiales medios durante cincuenta días de verano. Investigaron cuatro grandes ecosistemas: la cuenca amazónica, con su inmensa selva ecuatorial; las regiones central y oriental de Estados Unidos, con sus ciudades, tierras cultivadas, praderas y bosques; una variedad de paisajes asiáticos que incluía selvas tropicales y tierras cultivadas; y el Sahara. Aplicando su modelo, que incluía procesos físicos y biológicos (en particular, la transferencia de calor de la cubierta vegetal a la atmósfera), calcularon la insolación, el albedo, la absorción neta de radiación de onda corta y la emisión de radiación de onda larga a la atmósfera (véase la tabla 16.1).

Las selvas reducen el gradiente solar a base de convertir agua líquida en vapor. Son un sistema degradativo gigante. En el Sahara, el 41 % de la energía incidente se reemite como radiación de onda larga, mientras que en la cuenca amazónica sólo se reemite el 17 %. En la selva, las hojas captan energía, transpiran y producen estructuras, en vez de reflejar la energía de vuelta al espacio. Como podría esperarse, la cuenca amazónica y el este norteamericano tienen tasas de transpiración elevadas: los ecosistemas forestales de estas regiones degradan el 70 % y el 61 %, respectivamente, de la radiación incidente, mientras que en el Sahara el porcentaje se reduce al 2 %.

La pauta general de estas estimaciones de la radiación regional corrobora nuestra afirmación de que los ecosistemas «clímax», ejemplifica-

TABLA 16.1. Caudal energético de varios grandes ecosistemas (porcentaje)

Región	Radiación de onda		
	<i>larga reemitida</i>	<i>Flujo de calor</i>	<i>Evapotranspiración</i>
Cuenca amazónica	17	15	70
Este de Estados Unidos	18	18	61
Asia	24	26	50
Sahara	41	56	2

Fuente: Sellers y Mintz, 1986.

dos por la selva amazónica, degradan más energía que los ecosistemas intermedios. El desierto representa un estadio sucesional desoladoramente primario. Sin embargo, incluso en un mundo árido como el ecosistema del desierto, la energía solar incidente es degradada lo mejor que se puede.

Las diferencias de temperatura entre el Sol, el espacio y la Tierra son degradadas con distinta eficiencia por los ecosistemas, según su tipo y su grado de madurez.

Volando bajo

Pero ¿qué ocurre con los organismos que se encuentran bajo las nubes? ¿Cómo afectan a la reducción de gradientes? El microclimatólogo Jeffrey Luvall, de la división geológica de la NASA en Huntsville, Alabama, y el ecólogo de campo e ingeniero electrónico H.R. Holbo, de la Universidad de Oregón, se propusieron averiguarlo. Para ello colaboraron en el diseño de un sofisticado termómetro. El dispositivo, llamado TIMS (Thermal Infrared Multispectral Scanner), es un termómetro de cuerpo negro montado en los bajos de un avión. El TIMS, en vuelos por debajo de las nubes, puede tomar temperaturas ecosistémicas sobre terrenos variados. Con métodos especiales de intercalibración, estos investigadores midieron temperaturas superficiales y emisiones de radiación con una precisión de 0,2 °C. Su sistema, que se apoyaba en la navegación por satélite con un margen de error de cinco metros, no podría haberse desarrollado hace veinte años.⁴

Los datos de Luvall y Holbo proporcionan evidencias adicionales de que los sistemas más complejos reducen más eficazmente el gradiente solar. Los investigadores reconocieron diferentes áreas del Bosque Experimental H.J. Andrews, en Oregón.

La tabla 16.2 presenta los datos de uno de los experimentos de Luvall y Holbo. Los resultados se disponen por orden de complejidad ecosistémica, desde una cantera pelada hasta un bosque de 400 años de edad. (Para los interesados en cuestiones técnicas, debajo de la tabla están las ecuaciones empleadas para calcular los valores.) Los datos más importantes son los valores de la razón R_n/K^* en la última fila de la tabla. R_n es la energía degradada en acción molecular a través de la producción de calor latente y calor sensible. K^* es el flujo neto de radiación solar que incide sobre la superficie. R_n/K^* representa el porcentaje de la radiación solar incidente degradado en procesos no radiativos. Se trata de la energía de baja calidad que ya no es convertible en trabajo, dividida por la energía incidente neta. La cantera degradaba tan sólo el 62 % de la energía incidente, principalmente por conversión en calor sensible, mientras que el bosque de 400 años degradaba el 90 %. La temperatura de la cantera y el bosque talado superaba los 50 °C, mientras que la del bosque de 400 años no pasaba de 25 °C. Las temperaturas de la plantación de abeto Douglas y del bosque producto de la sucesión natural, ambos de 25 años de edad, eran más o menos iguales (entre 29 °C y 30 °C). Así pues, el bosque repoblado no era ni mejor ni peor que el natural en cuanto a la degradación de la energía incidente.⁵

Los hallazgos más atractivos de Luvall se obtuvieron a partir de vuelos a baja altura realizados al mediodía y con cielo despejado.⁶ Se pretendía detectar variaciones en la temperatura ecosistémica y comparar las temperaturas registradas sin interferencia de variables como la lluvia, la humedad, el tipo de suelo y el viento, que podrían distorsionar los datos. La figura 16.2 representa un mapa de temperaturas confeccionado a partir de uno de estos vuelos bajos y de corta duración sobre un paisaje variado. El instrumento detectaba diferencias de temperatura a una escala de sólo 25 metros. Los perfiles de temperatura de Luvall confirman que los bosques maduros son mejores degradadores de energía que las carreteras, las áreas taladas y los bosques jóvenes. Si se deja a su aire, la naturaleza desarrolla ecosistemas cada vez más eficientes.

Algunos científicos objetan que las mediciones al vuelo realizadas por Luvall son incompletas, y sugieren que para verificar sus resultados se necesitaría un barrido completo. La auténtica temperatura de la superficie biológica depende de hasta veinte variables. El viento, por ejemplo, refresca las plantas porque se lleva calor latente y sensible generado en la superficie foliar. La humedad del aire, el porcentaje de saturación de agua del suelo, la cubierta foliar y el albedo pueden afectar a la temperatura superficial de las plantas. Futuros estudios de detección remota con una mejor resolución deberían proporcionarnos más detalles. De hecho,

TABLA 16.2. Radiación solar y complejidad ecosistémica
Complejidad creciente →

	Cantera	Plantación			
		Bosque talado	de abeto Douglas	Bosque natural	Bosque de 400 años
K^* (W/m ²) ^a	718	799	854	895	1005
L^* (W/m ²) ^b	273	281	124	124	95
R_n (W/m ²) ^c	445	517	730	771	830
T (°C) ^d	50,7	51,8	29,9	29,4	24,7
R_n/K^* (%) ^e	62	65	85	86	90

Fuente: Luvall y Holbo, 1989.

Notas: R_n es la energía radiante degradada en movimiento molecular.

$$R_n = K^* - L^*$$

donde K^* es el flujo neto de radiación solar (incidente), L^* es el flujo neto de radiación de onda larga (emitida) y R_n es el flujo neto de radiación transformada en calor latente y sensible (en vatios por metro cuadrado), y

$$R_n = H + L_e + G,$$

donde H es el flujo de calor sensible, L_e es el flujo de calor latente y G es el flujo de energía absorbida por el suelo.

Además,

$$L^* = \epsilon[\sigma(T)^4],$$

donde ϵ es la emisividad, σ es la constante de Boltzmann y T es la temperatura superficial.

^aRadiación neta incidente.

^bRadiación neta de onda larga emitida.

^cRadiación neta convertida en energía de baja calidad no radiada. Este componente del caudal energético incluye los flujos de calor sensible y calor latente (evapotranspiración).

^dTemperatura superficial.

^ePorcentaje de la radiación solar incidente neta degradada en procesos no radiactivos.

considerando la correspondencia de la temperatura con la condición ecosistémica, la detección remota puede acabar convirtiéndose en un procedimiento estándar de la ingeniería forestal y la agronomía. Así como a cualquier persona ingresada en urgencias se le toma la temperatura, a los ecosistemas de la Tierra se les tomará la temperatura desde el aire y, quizás, el espacio.

Luvall también ha sobrevolado áreas urbanas. En una ocasión voló por encima de una ciudad para registrar la radiación de parques, zonas de aparcamiento y céspedes. Buena parte de la ciudad reemitía grandes cantidades de calor en forma de radiación infrarroja procedente de los tejados negros y calles asfaltadas.⁷ La energía solar se absorbe y se reemite

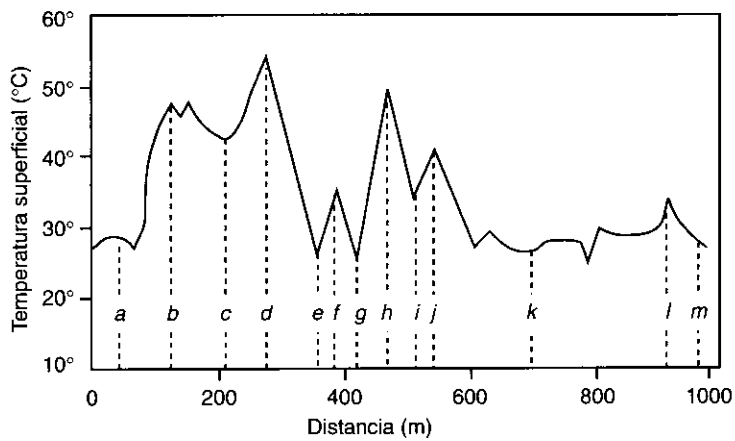


Figura 16.2. Temperaturas superficiales sobre diversos paisajes, medidas a través de un radiómetro aéreo. El transecto abarca sólo mil metros, y la variación de temperatura entre las áreas boscosas y las carreteras es de 30 °C como mucho. El avión voló al mediodía y con cielo despejado. Dada la cortedad del trayecto, muchas de las variables de las que depende la temperatura superficial, como la humedad del suelo y del aire y los vientos, pueden suponerse constantes. Nótese que los intervalos correspondientes a bosques son frescos, mientras que los correspondientes a carreteras y claros con poca o ninguna vegetación son cálidos. Los ecosistemas más desarrollados degradan más radiación solar incidente. *a*, límite del bosque; *b*, carretera estrecha; *c*, claro; *d*, carretera ancha; *e*, costado de un bosquecillo de abeto Douglas; *f*, puente en medio del bosque; *g*, el otro costado del bosquecillo; *h*, carretera ancha; *i*, árboles al lado de la carretera; *j*, llano aclarado; *k*, plantación de abeto Douglas de 15 años; *l*, camino; *m*, bosque viejo de abeto Douglas. (Datos de Luvall y Holbo, 1991.)

en forma de calor, lo cual hace que las superficies de albedo bajo como los suelos asfaltados y los tejados negros estén hasta 10-20 °C más calientes que el aire ambiente. Cualquier techador nos dirá que, si queremos que nuestra casa se mantenga más fresca, debemos pintar el techo de color blanco o plateado para que la mayor parte de la radiación solar incidente se refleje como en un espejo y no se convierta en calor. La NASA ha encargado a Luvall que registre las temperaturas de ciudades como Atlanta. De sus mediciones se deduce que con el solo hecho de pintar de blanco o plateado los tejados, las ciudades ya podrían ahorrarse miles de millones de dólares en aire acondicionado. Mientras tanto, ciudades como Atlanta generan grandes bolsas de calor con temperaturas de más de 3 °C por encima de las del medio rural (figura 16.3). Estas bolsas de calor pueden generar su propio clima, con tormentas localizadas derivadas del aire caliente ascendente.

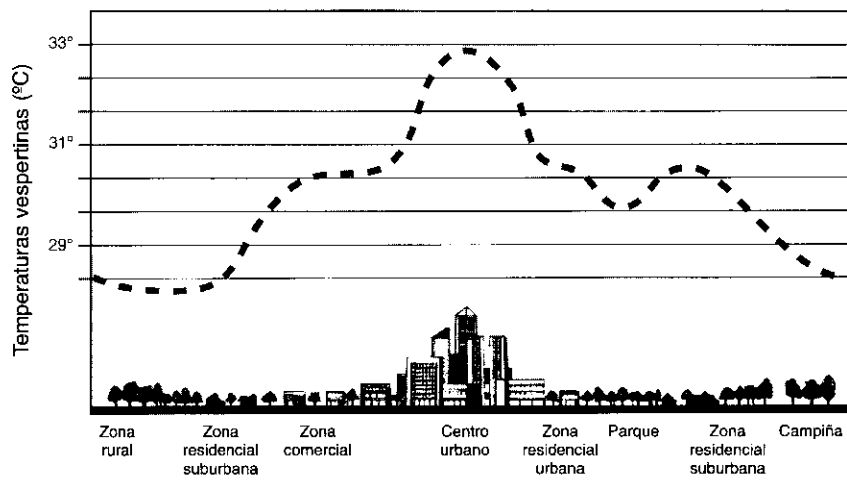


Figura 16.3. Perfil de temperaturas superficiales sobre Atlanta, Georgia. Luvall empleó un aeroplano equipado con un radiómetro de precisión para medir las temperaturas superficiales de la ciudad y sus alrededores. La temperatura sobre la ciudad era 3,3 °C más alta que en el campo circundante. Este calentamiento es el resultado de la emisión de calor por parte de los tejados creosotados y los firmes asfaltados. Incluso los parques pequeños contribuían a refrigerar significativamente los suburbios. El aire caliente sobre Atlanta asciende por convección y genera tormentas locales. (Adaptado de Taha, Akbari y Sailor, 1992.)

La detección remota y los tejados plateados vienen a ser ecología humana aplicada. Las poblaciones humanas se expanden y modifican drásticamente los caudales energéticos planetarios. Lo que es bueno para unas poblaciones humanas en rápido crecimiento no lo es necesariamente para los ecosistemas a mayor escala. Nietzsche dijo que el mundo es bello, pero tiene un chancro llamado hombre. Desde el punto de vista termodinámico, esto es cierto en la medida en que nuestras actividades globales han deteriorado los sistemas vivos de reducción de gradientes más desarrollados. Aparte de ocasionales olas de frío, el clima a largo plazo tiende decididamente a calentarse. El año 2003 es el segundo más cálido registrado hasta la fecha (desde 1880). Los cinco años registrados más cálidos son todos posteriores a 1997, y los diez más cálidos se sitúan entre 1990 y 2003. Este exceso de calor, atribuible a la quema de combustibles fósiles y, quizás, a la deforestación, hace disminuir la transpiración vegetal y, por ende, el calor reflejado por las nubes de vuelta al espacio. Representa un decrecimiento global de la reducción del gradiente solar. La esperanza es que nuestra rápida proliferación, la primera de esta clase en la historia de la Tierra, se estanque a medida que integremos nuestras tec-

nologías en el resto de la biosfera y consigamos amplificar, en lugar de recortar, la capacidad refrigerante de las selvas ecuatoriales y otros sistemas altamente evolucionados.

Las temperaturas superficiales dependen en gran medida de los ecosistemas. Las zonas deforestadas tienen temperaturas superficiales de casi 50 °C, el doble que los bosques madurados durante siglos. A medida que grandes áreas de selva ecuatorial y tropical se talan y queman, podemos esperar una atenuación importante del ciclo del agua, el cual procede a través de los árboles para producir cubiertas nubosas que reflejan la luz y el calor. Cuando esta capacidad refrigerante se vea demasiado disminuida (a consecuencia de la deforestación a escala planetaria, por ejemplo), las temperaturas globales aumentarán. A pesar de encontrarse anclada en la física cuantitativa, la termodinámica es implícitamente una ciencia de totalidades. En vez de confundirnos con una profusión de árboles, nos hace ver el bosque. En este caso, la termodinámica nos hace prestar atención a la refrigeración no en abstracto, sino en un cosmos real marcado por soles calientes y un espacio frío, un cosmos graduado donde la refrigeración terrestre no es absoluta, sino que depende de la producción de entropía (y de calor).

Imaginemos que la deforestación continúa al ritmo actual durante los próximos cien años. Esto ya ha ocurrido con muchos paisajes. Buena parte de las tierras desnudas de España, Italia, Grecia y Turquía, incluso del norte de África, estuvieron en otro tiempo cubiertas de bosques. A medida que se talan los bosques de Siberia, Canadá y las regiones ecuatoriales, el problema del calentamiento global se exagera. Si la Tierra no consigue mantener los procesos disipativos que degradan la energía solar, el mundo cambiará para siempre.

La evolución de las especies es empujada —o succionada— en la dirección tomada por la sucesión, en lo que se ha descrito como madurez creciente [...] la evolución debería conformarse a la misma tendencia manifiesta en la sucesión. La sucesión progresa en todas partes, y la evolución la sigue, encuadrada en el marco sucesional.

Ramón Margalef

El teatro y la obra

La entrada en escena de la evolución proporcionó una nueva vía para la degradación energética. Si no inmortal, esta nueva vía era al menos continua y expansiva, lo que daba a los sistemas complejos de la vida su carácter distintivo. Los organismos primordiales se envenenaban a sí mismos al agotar los gradientes de los que dependían. Ante la merma de sus fuentes de energía y materiales necesarios para el mantenimiento de los sistemas cíclicos, se salvaron a base de generar variantes ligeramente distintas que prosperaban en una variedad de gradientes. La termodinámica es necesaria para comprender la evolución, pero no es suficiente. La distribución planetaria de las especies puede explicarse en parte como un fenómeno termodinámico. La causa aislada más importante de la diversidad de especies es la energía disponible para la evolución. Hay una marcada correlación entre disipación energética, transpiración y diversidad de especies. Las tres variables se maximizan en las selvas ecuatoriales, donde la energía solar es efectivamente transformada en organismos y sus actividades reductoras de gradientes.

El título del libro de G. Evelyn Hutchinson, *El teatro ecológico y el drama evolutivo* (1965), sugiere que la evolución procede en un marco ecosistémico. El énfasis de Hutchinson en la ecología refleja su comprensión de la importancia evolutiva de la energía. De hecho, en ecología y en evolución se han descrito tendencias direccionales similares. Como señala el epígrafe de este capítulo: «La evolución de las especies es empujada —o succionada— en la dirección tomada por la sucesión».¹ Los procesos selectivos que ocurren en los ecosistemas son los mismos que conforman la evolución. La principal diferencia es que en la sucesión ecosistémica cuentan más los factores a corto plazo y un acervo genético fijo, mientras que la evolución es un proceso a largo plazo que opera con un acervo genético variable.

Estas tendencias reflejan la influencia conformadora de la energía en los sistemas complejos, sea en el marco temporal más limitado de los procesos ecológicos o en la vastedad del tiempo evolutivo. Un ecosistema puede necesitar cientos de años para alcanzar su plena madurez, mientras que la evolución biológica comenzó su andadura hace 3500 millones de años. No obstante, en ambos casos vemos cómo una fase inicial de crecimiento rápido da paso a un incremento de los ciclos y la diversidad. La evidencia del aumento de la diversidad a lo largo del tiempo evolutivo está bien asentada, y si convenimos en que la biosfera se ha expandido con el tiempo, está claro que los ciclos también lo han hecho. Puesto que los organismos son sistemas complejos que toman carbono, energía y electrones de su entorno, al que, en contrapartida, vierten materiales degradados y calor a medida que se desarrollan, por fuerza incrementan el reciclado de elementos necesarios para la vida, como el carbono, el nitrógeno y el fósforo. Las islas del Pacífico formadas por el guano rico en fósforo depositado por las aves marinas son un ejemplo emblemático de la obviedad de este incremento de los ciclos materiales coincidente con la evolución de la vida. No hay ningún misterio esencial en la intensificación de estas actividades, como tampoco lo hay en la flecha progresiva de la evolución, de base termodinámica. A medida que los organismos, explotando el gradiente solar, expanden sus actividades a través de la reproducción, que es el renuevo del metabolismo termodinámico, incrementan también la complejidad biológica (aunque exporten caos molecular y calor al entorno más amplio). Al mantenerse en un estado de baja entropía, y crecer, los organismos expanden tanto la complejidad (local) como el desorden (vertiendo calor al espacio). Finalmente, el sistema termodinámico llega al límite de su crecimiento, y la energía antes invertida en la expansión se recalifica internamente, manifestándose como diversidad, diferenciación y reciclaje incrementado.

Los ecosistemas, cuyos ciclos energéticos y materiales aumentan mensurablemente en cantidad y magnitud según avanza la sucesión, también dan fe del incremento del reciclado de base termodinámica. Puede percibirse una tendencia similar en el desarrollo de nuevos mercados económicos. Sugerimos que la similitud de las tendencias no es ninguna coincidencia, sino el resultado del establecimiento de pautas cíclicas de degradación energética. A medida que ecólogos y evolucionistas tomen contacto con la TNE, la detección de gradientes y la medición de los flujos materiales tendrán una posición más central en estas disciplinas. ¿Cuáles son las fuentes de energía y carbono para el sistema termodinámico, sea un ecosistema, una economía o una población en evolución? Estas cuestiones no son abstractas, ni tienen una motivación ideológica, ni son

matemáticamente abstrusas. En microbiología, y en ecología microbiana, quizá debido a que los sistemas examinados ya son químicamente transparentes (científicamente mensurables y cercanos a su entorno), no se ven como intrusiones exóticas impuestas desde fuera por individuos con veleidades interdisciplinarias, que no respetan las fronteras académicas. Planteadas en ciencias donde no suelen ser consideradas, estas cuestiones podrían mostrarse iluminadoras y revelar insospechadas conexiones y explicaciones termodinámicas.

En los capítulos anteriores hemos defendido que los ecosistemas son procesos captadores, degradadores y almacenadores de energía. Durante el desarrollo ecosistémico aumenta la producción de entropía, así como la eficiencia y la magnitud del procesamiento energético, la biomasa total, la diversidad de especies, el reciclado, la homeostasis y el tiempo de residencia de los elementos biológicamente importantes. Estos mismos factores también aumentan a lo largo del tiempo evolutivo, lo que confiere direccionalidad al proceso evolutivo. En un seminario, uno de nosotros, Eric, acababa de convencer a su audiencia de que en el desarrollo de los ecosistemas ocurrían procesos termodinámicos direccionales. Sin embargo, esa misma audiencia se resistió a dar el siguiente paso y ampliar la perspectiva termodinámica a la evolución. Los procesos ecológicos y evolutivos, no obstante, existen a lo largo de un continuo temporal. La ecología abarca procesos que tardan años o siglos en desplegarse. Por supuesto, la evolución trata con marcos temporales bastante más amplios, con procesos que pueden durar entre miles y millones de años. Cuando Eric instó a su audiencia a que trazara con su dedo colectivo la frontera temporal exacta entre los procesos ecológicos y los procesos evolutivos, su argumento fue aceptado.

Sin embargo, entre la sucesión ecológica y la evolución existe una importante diferencia, que puede explicarse recurriendo al popular juego del póquer. En la variante sin robo, el jugador recibe cinco cartas y debe jugar con esas cinco cartas. No puede añadir cartas nuevas a la mano que ha recibido. Esto se parece a la sucesión ecológica: no se añaden nuevas genomas a la mezcla; el desarrollo se completa con los organismos que se tienen a mano. La evolución se parece más al póquer con robo. En esta variante, el jugador puede hacer descartes e intentar mejorar su mano cambiando unas cartas por otras sacadas al azar del mazo. A diferencia de la sucesión ecológica, la evolución puede alterar su composición. Puede generar novedades echando mano del mazo y sacando el equivalente genético de cartas nuevas, genomas nuevos. Pero, como en el póquer, las demás reglas no cambian.

La evolución biológica expande los procesos termodinámicos encontrados en el origen de la vida y en el desarrollo de los ecosistemas, guía-

dos por las propensiones de la segunda ley. La biología no sólo es consistente con la termodinámica, sino que la segunda ley proporciona el «empuje» o «fuerza» causal para la emergencia y desarrollo de numerosos procesos biológicos conectados.

La termodinámica selecciona

En las últimas décadas, sabios como Stephen Jay Gould han insistido en que la evolución es en gran medida aleatoria, ya que a menudo depende de la contingencia y los procesos estocásticos. Sin embargo, la evolución manifiesta algunas tendencias claras. No debería sorprendernos que, si se considera la génesis evolutiva en el marco de la complejidad reductora de gradientes, la evolución no resulte tan aleatoria como se pensaba. La dirección de la evolución es la de las organizaciones que buscan el equilibrio de la termodinámica de sistemas abiertos.

La termodinámica y la evolución se complementan. El neodarwinismo contempla la selección natural como la «fuerza» evolutiva más importante. Aunque las mutaciones son aleatorias, los organismos más aptos para sobrevivir en un entorno dado dejan más descendencia; son seleccionados. Esta selección perpetúa los genes de los organismos más aptos, siendo la *aptitud* (en la jerga evolutiva) una medida matemática de la supervivencia de los organismos y su capacidad para reproducirse con éxito.

Evolución y termodinámica van de la mano. En su excelente libro *Darwinism Evolving* (1994), David Depew y Bruce Weber remontan la dinámica y la termodinámica a los orígenes del pensamiento evolutivo. Depew y Weber han participado en el debate termodinámica-evolución-complejidad durante los últimos treinta años, pero en este libro ejercen de historiadores y filósofos de la ciencia, de modo que intentan precisar la influencia de los paradigmas dinámicos en el pensamiento evolucionista. Señalan que «Darwin estaba fuertemente influenciado por Newton. Darwin contempla la adaptación orgánica y las diferencias entre linajes en términos de un *modelo newtoniano*, un cuadro más o menos abstracto del comportamiento esperado de los sistemas, sean planetarios, económicos o biológicos, en cada caso y a lo largo del tiempo».²

En cierto sentido, toda la biología de poblaciones (el enfoque prevalente de genes-en-poblaciones que combina genética y selección natural) deriva de un modelo termodinámico. Pero, irónicamente, la termodinámica se aplica aquí analógicamente como un modelo útil, y no literalmente como un fenómeno real que informa la organización biológica a todos los niveles.

Los celeberrimos investigadores evolucionistas Ronald Fisher, Sewall Wright y J.B.S. Haldane concibieron modelos estadísticos adaptados de la mecánica estadística de Boltzmann y Maxwell. Contemplaron conjuntos de genes como unidades estadísticas con propiedades casi termodinámicas. Según Fisher:

«Se apreciará que el teorema fundamental demostrado guarda la misma notable semejanza con la segunda ley de la termodinámica. Ambos son propiedades de poblaciones, o agregados, con independencia de la naturaleza de las unidades que las componen; ambos son leyes estadísticas; ambos requieren el incremento constante de una magnitud medible, en un caso la entropía de un sistema físico y en el otro la aptitud de una población biológica».³

Fisher quizá llevara su analogía termodinámica demasiado lejos. Aunque sus modelos genéticos estadísticos se basaban en distribuciones boltzmannianas, no modelaban el propio flujo de energía. La reproducción proporciona medios estables de reducción de gradientes. Pero la variación ligada a la reproducción de los organismos, requerida por la selección natural para producir cambios evolutivos, también es termodinámica. Más aún, desde el punto de vista termodinámico, la variación es inevitable. Wicken escribe lo siguiente: «La segunda ley promueve teleomáticamente errores de replicación que incrementan la aleatoriedad configuracional. Por esta ley, la replicación no puede estar libre de error».⁴ Lo que Wicken dice es que, aunque la reproducción de alta fidelidad basada en el ADN confiere aleatoriedad al mundo exterior a través de la generación de reductores de gradientes eficaces en forma de organismos, el ADN en sí mismo no es inmune a los efectos aleatorizantes de la segunda ley. Durante su replicación se cometen muchos errores. Esta aleatorización energética y material es una consecuencia inevitable de la segunda ley. Las mutaciones tienen múltiples causas, que incluyen la radiación, sustancias químicas y alteraciones estructurales mediadas por enzimas. Las secuencias de ADN y ARN se recombinan con otras secuencias. Los genes saltan de un sitio a otro del genoma, y algunos imponen sus propias secuencias de nucleótidos a otros genes. Este ruido genómico es un asunto complicado, pero la pauta termodinámica preponderante de la aleatorización molecular está en juego en cada paso del proceso neodarwiniano.

El neodarwinismo estándar sugiere que, tan pronto como la vida dispone de un excedente de variantes, la selección elimina los organismos no aptos a base de dientes y garras. Esta concepción ha sido recientemente ampliada por Stephen Jay Gould, para quien la selección natural

al nivel individual y/o genético debe reemplazarse por un «modelo jerárquico» de selección, que actúa de manera simultánea e interconectada al nivel de los genes, los organismos, las especies y los taxones superiores. El punto principal de su argumentación es que la acumulación de variaciones genéticas es demasiado lenta como para poder explicar los cambios súbitos que se observan en el registro fósil, por lo que debe suplementarse con una concepción de la «macroevolución» operativa a niveles por encima del gen, el organismo e, incluso, la especie. Gould contempla una selección ejercida sobre linajes genéticos de especies. Sin embargo, según la perspectiva de Wicken, las verdaderas unidades de selección son las «pautas informadas de flujo termodinámico», de las que organismos, poblaciones y ecosistemas no son más que casos particulares.

«La termodinámica ecosistémica generaliza el significado de la selección en un marco físico. Las unidades de selección más generales en la naturaleza no son los individuos, sino las pautas informadas de flujo termodinámico, de las que organismos, poblaciones y ecosistemas no son más que ejemplificaciones. Algunos patrones de flujo son superiores a otros en cuanto a la movilización de recursos, y son seleccionados sobre esa base.»⁵

Las bacterias simbióticas, las algas coloniales y los plasmodios, los insectos sociales, las ratas topo desnudas y las comunidades lingüísticas humanas son ejemplos evolutivos de sociedades que se seleccionan como unidades. Las «unidades de selección» quedan evolutivamente instituidas cuando lo que antes eran individuos, en realidad sistemas abiertos, se unen bajo el imperativo termodinámico de la segunda ley. Si las presiones selectivas son lo bastante intensas, las sociedades se convierten en organismos por derecho propio. Por ejemplo, esto es lo que presumiblemente ocurrió en la gran transición evolutiva de las colonias de células a los primeros animales.

Una perspectiva de reducción de gradientes nos presenta una concepción diferente de la selección, más ecológica que la selección referida al gen de Gould o los panadaptacionistas (aquellos dados a ver adaptaciones en todas partes y a inventar explicaciones seleccionistas donde no es necesario), que el propio Gould ha criticado con razón. La selección natural, la propensión a mantenerse en la escena evolutiva, se basa en la interconexión de los organismos, las especies y las poblaciones con el ecosistema y el entorno en el que están integrados. Si los sistemas carecen de energía y materia para su mantenimiento, no pueden persistir como individuos. Siempre obligadas a negociar por los flujos, las estructuras de-

gradativas de la vida pueden actuar simultáneamente a distintas escalas. No sólo divergen (en la especiación), sino que se entrelazan, amalgamando flujos y fuerzas con otros sistemas para crear degradadores más poderosos.

Nuestra visión de la selección natural debe mucho a Lotka y Wicken. El primero sostenía que la selección natural obra para incrementar tanto la masa de los sistemas orgánicos como las tasas de circulación de materiales a través de dichos sistemas. La captación, acumulación y degradación de la energía disponible no es como un borracho dando tumbos por la acera. Por el contrario, la selección natural tiende a incrementar el flujo de energía a través del sistema. Los sistemas vivos se esfuerzan (no empleamos este verbo a la ligera) en aprehender, almacenar y degradar gradientes. Tanto en ecología como en evolución se manifiestan diversas tendencias: incremento del número de especies, redes cada vez más complejas, diferenciación creciente, incremento de la integración funcional de los flujos termodinámicos, incremento de la capacidad de los organismos para ajustarse a gradientes menguantes y cambiantes, y capacidad disipativa creciente.

En su libro *La grandeza de la vida* (1997), Stephen Jay Gould argumenta que las bacterias hacen casi todo el trabajo, y que los organismos mayores, desde los narcisos y *Archaeopteryx* hasta las iguanas y las personas, no son tanto ejemplificaciones del progreso evolutivo como ocupantes secuenciales de un edificio que siempre ha estado lleno. En la visión de Gould, la vida se expande para ocupar todos los nichos disponibles, adoptando nuevas formas sin dirección. Como señala el geofisiólogo holandés Peter Westbroek, el argumento de Gould es válido si observamos las especies individuales: comparándolas, encontramos muchos retrocesos y atavismos, largos periodos de estasis (como en el caso de la cacerola de las Molucas, *Limulus*) y cambios súbitos de rumbo que pueden ofrecer (o no) alguna ventaja adaptativa (como en la evolución de los seres humanos y los hipopótamos).⁶ No obstante, si adoptamos una perspectiva «de arriba abajo», las tendencias al incremento de la regulación, la incorporación y el reciclado se tornan obvias.

Los procesos termodinámicos ecosistémicos son el fundamento sobre el que se erige la evolución. Las contingencias estocásticas y dinámicas sacuden constantemente el mundo biológico. Planetoides volantes, incendios forestales o fracturas accidentales de alas son algunas de las contingencias a las que los organismos deben hacer frente. Pero el hecho de que en la naturaleza ocurran eventos aleatorios no evita la direccionalidad

dada por la segunda ley ni su orquestación de los usos sutiles de la energía en sistemas que se vuelven más complejos a lo largo del tiempo evolutivo.

Proliferación de especies

Se estima que existen entre 10 y 15 millones de especies, aunque más del 99 % de todas las que han existido en la historia de la vida se ha extinguido. En el transcurso del tiempo evolutivo se ha registrado un incremento del número de especies vivas, una diversificación cada vez mayor. Interpretamos este incremento *de facto* como la selección de nuevas especies a medida que se abrían nuevas vías para la captación y degradación de energía.

Las tendencias direccionales marcan la evolución, el desarrollo embrionario y la sucesión ecológica. En los comienzos de la vida no había especies. Las especies propiamente dichas no evolucionaron hasta hace mil millones de años, en los ancestros microbianos de plantas, animales y hongos. Estos microbios ancestrales inventaron la mitosis y su derivación, el sexo meiótico (la base de la reproducción sexual, en la que se fundamenta la definición más habitual de especie). Considerando este hecho dual de, por un lado, la ausencia de especies hace 3500 millones de años (la edad de la evidencia geológica de vida celular más antigua) y, por otro, la presencia de al menos 10 millones de especies en la actualidad, un cálculo aritmético simple sugiere que el número de especies sobre la Tierra se ha multiplicado por millones de veces a lo largo del tiempo geológico. Aunque este incremento se ha visto interrumpido más de una vez por extinciones masivas, y aunque el número de especies quizás alcanzara un máximo hace algún tiempo, con un reemplazo continuado de las especies que se iban extinguiendo (en el equivalente global de una comunidad clímax), continúa siendo cierto que ha habido un incremento neto de las especies a lo largo del tiempo (figura 17.1).

Como una nueva hoja en un árbol o un nuevo negocio en la economía global, cada nueva especie representa una nueva vía para la captación, acumulación y degradación de energía. Las nuevas especies encuentran gradientes y hábitats infrautilizados, y se apropian de ellos. A lo largo del tiempo geológico, la marcha continuada hacia una diversidad biológica creciente ha sufrido importantes reveses ocasionales. Aun así, en todas las ocasiones la vida se ha recuperado y ha rellenado el genoma global. Si el pasado es un prólogo, entonces la recuperación de la actual extinción masiva, precipitada por la devastación humana de animales

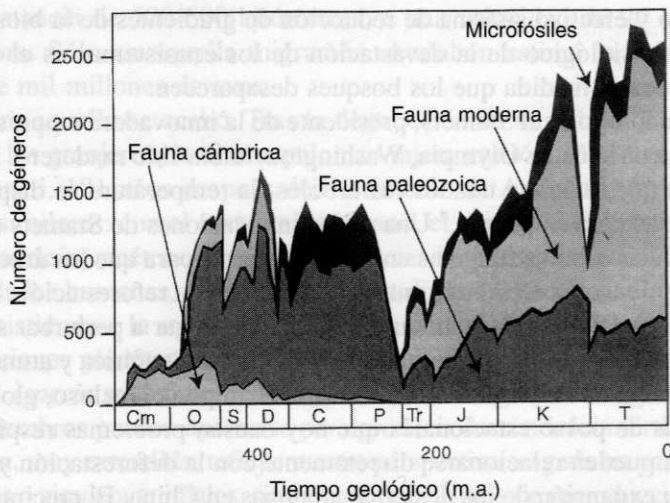


Figura 17.1. Incremento del número de géneros a lo largo del tiempo geológico. Esta gráfica se ha confeccionado a partir de la compilación de John Sepkoski de más de 37.000 géneros de animales marinos fósiles preservados desde el Cámbrico hasta el presente. En el transcurso de este dilatado intervalo temporal fueron surgiendo nuevas vías para degradar los gradientes energéticos disponibles. Este incremento de especies se ha visto interrumpido por declives súbitos de la diversidad en el Pérmico, el Triásico y el límite Cretáceo-Terciario. Tras estas caídas, el número de géneros se recuperó a medida que evolucionaban nuevas especies para ocupar los nichos energéticos vacantes. Estas recuperaciones puntuales de las especies se asemejan al incremento de la diversidad tras una perturbación ecológica y la consiguiente adición de nuevas especies durante la sucesión. *m.a.* = Millones de años atrás. (Datos de Sepkoski, 2002.)

grandes y bosques maduros, también parece probable. Si la humanidad sobrevivirá para contemplarla, no digamos ya para posibilitarla, es una pregunta sin respuesta.

El declive planetario de la diversidad de especies por causas humanas resulta perturbador. Algunos de los animales más imponentes del planeta, como el tigre de Bengala o los gorilas de Uganda, están al borde de la extinción. Es necesario comprender el papel de las selvas húmedas y otros ecosistemas de elevada biodiversidad en la conservación medioambiental. En el presente, el crecimiento continuado de una población humana mundial que tala bosques para obtener madera, construir casas y ganar tierras de pastoreo parece ser la principal causa de la extinción de seres vivos; en el pasado, nuestros antepasados cazaron muchas especies hasta acabar con ellas. Pero no sólo hemos diezariado animales tiernos y emblemáticos. Cada vez que arrasamos un bosque también estamos deteriorando el más

avanzado y efectivo sistema de reducción de gradientes de la biosfera. El resultado fisiológico de la devastación de los ecosistemas es el calentamiento local a medida que los bosques desaparecen.

El micólogo Paul Stamets, presidente de la innovadora empresa Fungi Perfecti, con sede en Olympia, Washington, había sido maderero. Stamets recuerda que, una vez talados los árboles, la temperatura se disparaba y la humedad caía en picado.⁷ Una de las innovaciones de Stamets consiste en introducir esporas fúngicas en las motosierras para que los árboles cortados comiencen a reciclarse antes y acelerar así la reforestación. Sin medidas como ésta, el calentamiento local puede llegar a perturbar sistemas climáticos más extensos, alterando la actividad atmosférica y aumentando la frecuencia de tormentas a una escala más amplia e, incluso, global. Las tormentas de polvo estacionales que hoy causan problemas respiratorios en Corea pueden relacionarse directamente con la deforestación y la consiguiente expansión de los desiertos arenosos en China. El crecimiento de los desiertos afecta también a San Francisco, donde nubes de polvo visibles por satélite viajan miles de kilómetros arrastradas por corrientes atmosféricas y crean bellas puestas de sol.

La desaparición de una especie del ecosistema global tiene graves repercusiones. Se pierde información genética, y los ecosistemas existentes se ven forzados a cambiar. La extinción se hace extensiva a otras especies, incluso algunas cuyos vínculos indirectos con la extinta no son inmediatamente aparentes.

En 1840 había más de cincuenta millones de bisontes en Estados Unidos. La mayoría se concentraba al oeste del Mississippi, pero la población se extendía por el este hasta Indiana. En 1910 sólo quedaban 29, que fueron trasladados al parque nacional de Yellowstone. La población de bisontes de Yellowstone asciende ahora a más de 4000 efectivos, complementados por unos 350.000 que viven en haciendas privadas, reservas indias y ranchos.⁸

El bisonte se ha salvado de la extinción, pero otras especies no han corrido tanta suerte. En el otoño de 1813, John James Audubon contemplaba las entonces abundantes palomas viajeras. De sus bandadas migratorias de otoño dijo que eran tan densas que «el sol se perdía de vista».⁹ Durante una travesía por Kentucky, Audubon contó 160 bandadas de palomas en veintiún minutos. Una bandada estuvo volando sobre su cabeza durante tres días enteros. Mediante un ingenioso método consistente en examinar el alimento —arroz— contenido en el estómago de las aves, calculó que llevaban volando no más de seis horas y que habían cubierto

una distancia de 500-600 kilómetros, a una velocidad de 96 kilómetros por hora. Sólo en aquella migración, Audubon estimó la existencia de más de mil millones de aves.

Pero aquello se acabó. Tras la destrucción de su hábitat y las matanzas de los granjeros, la última paloma viajera murió en 1914 en el zoo de Cincinnati, 101 años después del testimonio de Audubon. Abundan historias similares: con el castaño americano, el loro de Carolina, el dodo de isla Mauricio, etcétera. Cientos de especies han desaparecido debido a las actividades humanas, y otras declinan a diario. A escala geológica, estamos asistiendo a la sexta gran extinción, una pérdida de biodiversidad de dimensiones planetarias.

La *especie* se define habitualmente como un grupo de organismos cuyos miembros pueden aparearse para producir descendencia fértil. Esta definición, muy extendida, refleja nuestra perspectiva sesgada no ya como mamíferos o siquiera animales, sino como organismos de reproducción sexual. (Las bacterias donan de manera rutinaria una parte o la práctica totalidad de sus genes, y no requieren de ningún intercambio genético —es decir, sexo— para reproducirse. Según la definición anterior de especie, todas las bacterias deberían considerarse miembros de una misma especie.) De la dificultad de contabilizar especies da idea la estimación de E.O. Wilson de que una pizca de suelo contiene unos diez mil millones de bacterias. Wilson estima que existen cerca de diez millones de especies, que incluirían hasta un millón de tipos bacterianos. La mayoría de estas especies está por catalogar, y la mayoría de las que lo están corresponde a insectos tropicales.

No hay una única manera de medir la diversidad de especies de un ecosistema. Por ejemplo, se puede contar simplemente cuántas especies diferentes hay. Pero también se puede evaluar la diversidad analizando cómo se distribuyen las especies de una comunidad. Así, una comunidad de diez especies, todas con el mismo tamaño poblacional, tendría una distribución uniforme. Éste no sería el caso de una comunidad de tres especies en que una de ellas representase el 90 % y las otras dos el 4 % y el 6 % de la población total. Sea cual sea la medida, un incremento de la diversidad de especies puede representar la búsqueda ecosistémica de nuevas vías de degradación energética. A medida que el ecosistema incrementa su diversidad, más vías se abren. Esto crea redundancia y hace que el sistema sea menos susceptible de apagarse. Por el contrario, un ecosistema con pocas especies es más vulnerable a contratiempos que pueden comprometer o destruir la capacidad degradativa del sistema entero. En la mayoría de ecosistemas, la diversidad proporciona estabilidad. Una comunidad clímax recicla sus nutrientes para sustentar a todos sus miembros. Cualquier material orgánico caído en el suelo de la selva ama-

zónica se descompone o es devorado y reciclado de inmediato. La comunidad clímax es un sistema de fijadores de energía, fotosintetizadores y consumidores herbívoros y carnívoros. La producción de entropía se asocia tanto a la producción de alimento como a su consumo. La energía se degrada a través de la fotosíntesis y de la transpiración. Siempre que los productores de alimento sigan haciendo bien su trabajo, habrá energía de sobra para seguir adelante.

¿Qué controla la distribución de los 10 millones estimados de especies existentes en la Tierra? ¿Cómo se distribuyen estas especies por la superficie planetaria? En la tabla 17.1 se muestran mediante ejemplos algunas explicaciones hipotéticas acerca de la diversidad de especies. En una revisión exhaustiva de las pautas globales de biodiversidad, Kevin Gaston, de la Universidad de Sheffield, señala que «se ha descubierto que las relaciones entre la riqueza de especies y la energía ambiental se asocian con los gradientes de latitud, altitud y profundidad».¹⁰

Aunque hay muchas teorías que intentan explicar la diversidad de especies a gran escala, los factores fundamentales relacionados con la diversidad son la energía solar disponible, el agua y la estabilidad medioambiental. Necesaria pero no suficiente, la segunda ley interviene en la proliferación de especies.

La observación más obvia sobre la distribución planetaria de las especies es la pobreza de los polos en comparación con el ecuador. El primer análisis cuantitativo que lo confirma parece haber sido el del geólogo Frank Stehli, quien en 1971 estudió la distribución mundial de especies de corales.¹¹ Aunque incompleto, el trabajo de Stehli indicaba que en las latitudes altas había pocas especies, mientras que la diversidad ascendía hacia el ecuador. Además, la distribución de los corales paleozoicos (hace 245-505 millones de años) era diferente de la actual, lo que vendría a confirmar la teoría de la deriva continental. La superficie terrestre se había desplazado.

El gradiente latitudinal de diversidad también respalda la teoría de reducción de gradientes. La energía solar disponible para los organismos no se distribuye de manera equitativa. La redondez de la Tierra y la inclinación de su eje de giro explican esta desigualdad. El resultado es que las temperaturas ecuatoriales siempre son más o menos cálidas, mientras que en los polos la radiación incidente es mucho menos intensa y las temperaturas son mucho más variables. Esta distribución desigual de la radiación solar favorece el desarrollo de sistemas más complejos en el ecuador. Los ecosistemas ecuatoriales reciben más energía. Fundamentalmente, su complejidad y su gran riqueza de especies son consecuencia de este exceso energético. Además, las selvas ecuatoriales son ambientes estables, lo que favorece el aumento de la diversidad.

TABLA 17.1. ¿Cuáles son las causas de la diversidad de especies a gran escala?

<i>Hipótesis</i>	<i>Ejemplos</i>
Energía disponible para la disipación	Hay un gradiente latitudinal planetario de especies, con más diversidad ecológica hacia el ecuador cálido y menos hacia los polos fríos. Las selvas tropicales y los arrecifes de coral tropicales y subtropicales son los ecosistemas más ricos en especies. La diversidad de especies se correlaciona con las tasas de evaporación potenciales y efectivas.
Área geográfica	El número de especies aumenta con la superficie (por ejemplo, las islas grandes contienen más especies que las pequeñas).
Producción primaria	Cuanto mayor es la producción primaria, más energía hay disponible para los eslabones superiores de la cadena alimentaria.
Altitud	La diversidad es inversamente proporcional a la altitud. Las temperaturas más bajas de las zonas elevadas retardan el metabolismo y la productividad.
Heterogeneidad espacial o variedad de hábitat	La diversidad de especies aumenta en la confluencia de ecosistemas y hábitats heterogéneos.
Tiempo transcurrido	La diversidad aumenta a lo largo de la sucesión ecológica y el tiempo geológico.
Estabilidad medioambiental frente a variabilidad	La diversidad es mayor en los ambientes estables que en los variables. El altamente estable fondo marino profundo tiene una elevada diversidad de especies.
Ausencia de competencia	La competencia y la depredación intensas pueden reducir la diversidad de especies (por ejemplo, la humanidad ha cazado mastodontes y otros animales grandes hasta su extinción).
Factores históricos contingentes	Los sucesos impredecibles tales como incendios forestales, glaciaciones, desertización, erupciones volcánicas o impactos de meteoritos (como el que causó la extinción masiva del Cretáceo) reducen la diversidad de especies.
Tamaño y movilidad	El tamaño pequeño permite la subdivisión especializada de los nichos. Los organismos pequeños, menos constreñidos por la gravedad, la carencia de alimento y otros factores, son más diversos. Por ejemplo, hay cientos de miles de especies de escarabajos y sólo unas pocas de grandes monos.
Nuevas especies	Las nuevas especies crean nuevos hábitats. Los protistas causantes de la malaria viven en los mosquitos y en la sangre humana; cada nueva especie proporciona nuevos recursos y nuevos nichos que incrementan la diversidad potencial.

Nota: Reconocemos que estas explicaciones no son mutuamente excluyentes y que esta lista es incompleta.

El ecólogo Jim Brown, de la Universidad de Nuevo México, correlacionó la diversidad de especies con la *energía disponible* (exergía). De acuerdo con Brown, el factor clave para el sostenimiento de la vida «es la disponibilidad de energía utilizable (exergía). La energía utilizable puede definirse como cualquier sustancia esencial que los organismos tienen la potencialidad (dadas sus ligaduras) de extraer de su entorno y emplear para realizar trabajo útil de supervivencia y reproducción». ¹² Cuanta más energía disponible, más progenie puede mantener un hábitat, y mayor es el número de organismos y especies. El número de especies de aves y plantas norteamericanas aumenta con la evapotranspiración, que es la principal actividad de los ecosistemas terrestres. De hecho, a juzgar por el gasto de energía, en las comunidades clímax la transpiración es considerablemente más importante que el crecimiento. Habiendo encontrado una estrecha correlación entre la cantidad de energía degradada y el número de especies, Brown rinde tributo al grupo de Yale y «el énfasis de Hutchinson en el papel fundamental de la energética en la ecología evolutiva y comunitaria. La adquisición y utilización de la energía en concordancia con la segunda ley de la termodinámica sigue siendo el mejor punto de partida para comprender los entresijos de cualquier sistema ecológico». ¹³ Cualquier teoría general de la diversidad biológica, añade Brown, deberá incorporar a fondo la termodinámica.

Un estudio de 1991 a cargo del biólogo canadiense David Currie confirmó los hallazgos de Brown. Currie dividió Norteamérica en 336 cuadrados, cada uno de los cuales contenía árboles, mamíferos, anfibios y reptiles. Para cada cuadrado, Currie examinó 21 variables, que incluían la temperatura, la radiación solar, la altitud, la superficie, la productividad primaria y la evapotranspiración potencial. Fue una tarea agotadora, pero valió la pena. La evapotranspiración potencial (la cantidad de agua que se *evaporaría* si hubiera agua de sobra) aumentaba con el número de especies. En general, las mediciones de la cantidad de energía disponible para los organismos se correlacionan fuertemente con la diversidad de especies. Con su extensa base de datos, Currie pudo comprobar diversas hipótesis sobre la diversidad de especies. Por ejemplo, encontró una correlación negativa entre altitud y diversidad: a mayor altitud, menos especies. El decrecimiento de la diversidad de especies con la altitud es paralelo al decrecimiento de la diversidad con la latitud. Salvo en las regiones donde las altitudes elevadas se correlacionan con una mayor precipitación, esta relación inversa es clara.

E.O. Wilson estudió la correlación entre el tamaño insular y la abundancia de especies de reptiles y anfibios en las Indias Occidentales. Pues-

to que las islas más o menos coincidentes en latitud recibían cantidades similares de radiación incidente, parecía que las variaciones en el número de especies podían atribuirse a la extensión de las islas. La isla más pequeña, Redonda, de menos de tres kilómetros cuadrados, albergaba ocho especies, mientras que Cuba, con 26.000 kilómetros cuadrados, albergaba cien especies de reptiles y anfibios. Islas algo menores, como Jamaica y Montserrat, contenían números de especies similares de estos linajes animales. Ampliando el trabajo de MacArthur y Wilson, y de su maestro Jim Brown, David Wright halló que tanto el área como la energía disponible se correlacionan positivamente con la diversidad de especies,¹⁴ de manera que las teorías de la tabla 17.1 no tienen por qué ser mutuamente excluyentes. No obstante, cuando Currie examinó combinaciones de factores encontró que la combinación del área y la evapotranspiración potencial era un predictor más pobre de la diversidad de especies que la evapotranspiración potencial por sí sola.¹⁵ Las tasas de disipación elevadas se correlacionan extremadamente bien con los números elevados de especies. La exuberancia de unos ecosistemas vivificados por incontables especies no es simplemente una percepción emocional o una abstracción filosófica. Es un producto secundario de su función termodinámica como reductores de gradientes (los más evolucionados del planeta).

Un ecosistema es un sistema complejo que se edifica sobre su pasado. Su historia influye en su futuro. Los glaciares pueden arrastrar la capa superior del suelo mientras se mueven a través de la biosfera. Sucesiones que duran miles de años están todavía en marcha, reconstruyendo el suelo y añadiendo especies tras la retirada de los hielos del último periodo glacial, hace unos 11.000 años. La desertización rebaja claramente la diversidad de especies, y las inundaciones repetidas limitan el desarrollo ecosistémico. Currie efectuó un análisis estadístico para determinar si la historia pasada afectaba la diversidad regional de especies, y no encontró una correlación significativa.¹⁶ Quizás el tamaño de sus cuadrados de muestreo tuviera algo que ver con este resultado. Con cuadrados más pequeños habría apreciado los efectos de los incendios forestales, mientras que con cuadrados más grandes habría encontrado una relación inversa entre glaciares y diversidad de especies. El fuego y el hielo pueden acabar con la vida y poner a cero el reloj de la sucesión. A medida que los ecosistemas se reconstituyen tras estos episodios, recuperan su diversidad y, con ella, sus antiguos niveles de reducción de gradientes.

E.O. Wilson, entre otros, ha sugerido que sólo el 0,1 % de las especies que han existido en los últimos 600 millones de años pervive en la actualidad.¹⁷ Cuando una especie desaparece, su nicho ecológico persiste. Otros organismos residentes pueden amoldarse o evolucionar para ocupar

esa vacante. Los miembros de la nueva especie adoptan las funciones de los que perecieron. Para entrar en la lista de éxitos evolutiva, los supervivientes pueden tocar sus propios instrumentos de percusión, pero deben danzar al ritmo del ecosistema como totalidad funcional. Deben encontrar su nicho. Dicho de otro modo, la contingencia no es absoluta, sino que está influida por la termodinámica.

Howard Saunders, durante su etapa en la Institución Oceanográfica de Woods Hole, estudió el efecto de la variabilidad medioambiental sobre la diversidad de especies.¹⁸ En los estuarios y las plataformas continentales, donde las tormentas, las olas y las corrientes perturban constantemente el entorno, aportando y sustrayendo sedimentos, la diversidad de especies de gusanos y bivalvos es baja. De forma un tanto sorprendente, en ambientes más estables mar adentro hay más especies y una mayor densidad de organismos. De hecho, la mayor diversidad de especies se encuentra en las grandes profundidades marinas, donde la temperatura no fluctúa más de una décima de grado durante décadas, lejos de la luz y la producción fotosintética de alimento. Así pues, nuestra intuición de que la diversidad es mayor cerca de la costa, donde hay luz y abundan los nutrientes, es errónea. Aunque la elevada diversidad de especies en la franja ecuatorial ciertamente depende de la energía total degradada, las selvas húmedas no cambian mucho de un día para otro ni de una estación para otra, por lo que pueden considerarse sistemas estables apenas perturbados. Se parecen a las profundidades oceánicas en que la estabilidad medioambiental permite que las especies se diversifiquen a sus anchas. Si bien la luz no llega a las profundidades oceánicas, una lluvia constante de plancton caído desde la superficie suministra energía potencial más que suficiente a los habitantes del fondo marino.

Aparte de la estabilidad, muchos otros factores afectan a la diversidad. John Tyler Bonner, de la Universidad de Princeton, insistió en que existe una relación entre el tamaño de los organismos y la diversidad a escala regional.¹⁹ Abundan las especies de tamaño reducido, mientras que las grandes, como elefantes, ballenas y calamares gigantes, son relativamente escasas. ¿Por qué? Las razones son varias. La primera tiene que ver con la pirámide trófica: en los primeros escalones de las redes tróficas hay una inmensidad de seres pequeños (bacterias y protistas), mientras que los seres que se alimentan de ellos son necesariamente menos. La alimentación es un proceso entrópico, ineficiente, que deja cada vez menos calorías para las especies que ocupan los escalones más altos de las pirámides tróficas. Pero esto no lo explica todo: también hay muchas más especies de plantas pequeñas que de plantas arbóreas.

Si se observa cuidadosamente, la distribución de animales terrestres revela un agrupamiento, con una diversidad máxima en torno a los 100 gramos y un número de especies decreciente tanto para los tamaños mayores como para los menores. Las relaciones dependientes del tamaño, como la anterior, se denominan «alométricas». Estas relaciones, que parecen actuar como ligaduras, no sólo tienden a seleccionarse de manera natural, sino que son producto de leyes físicas no históricas relativamente simples.

En 1993, los ecólogos James Brown, Pablo Marquet y Mark Taper, de la Universidad de Nuevo México, examinaron la relación entre el tamaño corporal y la energética, y encontraron que los organismos tomaban energía del entorno con unas tasas proporcionales a su masa corporal elevada a la potencia $3/4$, y que los adultos podían destinar energía a la producción de descendencia en función de su masa elevada a $1/4$. Dicho de otro modo, los organismos pequeños tienen más capacidad de convertir recursos en éxito reproductivo, pero están más limitados en su capacidad de adquirir recursos para satisfacer sus necesidades metabólicas. Los animales grandes, en cambio, adquieren más recursos pero producen menos descendencia. Aplicando los criterios anteriores, estos ecólogos predijeron que los mamíferos terrestres deberían tener un tamaño corporal óptimo de 100 gramos, lo que concuerda con los datos de campo.

A lo largo de la última década, se ha producido una avalancha de artículos en que se sugiere que las relaciones alométricas proporcionan una «teoría biológica de todo».²⁰ La escuela de científicos liderada por los biólogos James Brown y Bruce Enquist y el físico Geoffrey West defiende que buena parte de los hechos de la biología puede atribuirse a relaciones alométricas y a las denominadas «leyes de las potencias $3/4$ y $1/4$ ».²¹ Estos científicos señalan que la relación entre metabolismo y masa corporal es de $3/4$ para un rango de masas de más de veinte órdenes de magnitud. «Puede que haya 200 leyes escalantes (en biología) que contienen potencias de un cuarto», dice West.²² Estas leyes, llamadas «fractales» (por su exponente fraccionario), se han aplicado a problemas de densidad de organismos y a problemas generales sobre asignación y uso de recursos por organismos. Brian Enquist y Karl Niklas han descrito relaciones escalantes en ecosistemas dominados por los árboles.²³ Mostraron, por ejemplo, que las distribuciones de tamaños de árboles, del número de especies de árboles y del número de árboles individuales por unidad de superficie se relacionan con la biomasa fuera del suelo elevada a la potencia $3/4$.

«Las extensiones de un marco general y un modelo de simulación alométricos revelan cómo varias propiedades prominentes de los niveles

organísmico, comunitario y ecosistémico derivan de relativamente pocas “reglas” alométricas y biomecánicas. Las ligaduras del transporte de recursos a través de redes vasculares “fractales” dictan, en última instancia, de qué modo los individuos ocupan el espacio, utilizan los recursos y producen y reparten su biomasa. Tales ligaduras se reflejan en relaciones alométricas escalantes, que son evidentes en biología a muchos niveles. Estas “reglas” dictan cómo se reparten la producción metabólica y la biomasa entre las partes corporales en el nivel de la planta individual.»²⁴

Aún no está claro cómo se relacionan estos resultados con nuestro programa termodinámico. Parecen imponer restricciones al reparto del agua y los nutrientes, y muestran relaciones entre factores físicos como el tamaño y procesos biológicos como el metabolismo. ¿Cómo modifican las plantas su naturaleza fractal en situaciones de estrés, cuando su metabolismo puede disminuir un 50 % debido a la carencia de agua? Hemos visto que los organismos sometidos a estrés pueden multiplicar por cuatro o cinco sus tasas metabólicas basales. ¿Cómo acomodan el cambio metabólico organísmico las pautas alométricas fractales? ¿Cómo cambian estas pautas alométricas fractales con el desarrollo de los organismos y la sucesión ecológica? Brown y sus colegas han sintetizado inmensas cantidades de datos que muestran factores de escala coherentes. Será interesante ver cómo se integra este programa de investigación, desarrollado durante una década, en el resto de la biología.

La riqueza de especies también depende del área. La precipitación se correlaciona mejor con la diversidad de especies a escalas espaciales más reducidas, mientras que la cubierta nubosa y el área (medida indirectamente sobre cuadrículas de latitud-longitud) son mejores predictores de la riqueza de especies a escalas mayores. Estudios de las plantas y aves británicas sugieren que la diversidad de especies se correlaciona mejor con distintos factores según la escala de observación. Los estudiosos de la biodiversidad Katherine Willis y Robert J. Whittaker, de la Universidad de Oxford, escriben:

«Mientras las predicciones sobre la pérdida de diversidad global son cada vez más pesimistas, la identificación de los factores que determinan la riqueza de especies se ha convertido en un tema candente. La pauta más conocida de la diversidad de especies es el gradiente de diversidad creciente de los polos al ecuador. Esta pauta es tan general y vale para tantos taxones que sugiere la existencia de una explicación igualmente general. Se ha prestado mucha atención, por lo

tanto, a la búsqueda *del* mecanismo que explica las pautas de la riqueza de especies, con la asunción de que, sea cual sea la escala a la que se mide la relación, puede extrapolarse de manera simple a escalas mayores o menores. Si fuera así, un modelo que explicase las pautas de diversidad locales podría ampliarse para describir variaciones a escala regional o incluso global. Este razonamiento es parecido al que se emplea para explicar el cambio evolutivo, donde variaciones que se manifiestan a intervalos de décadas o siglos pueden extrapolarse a mayor escala para describir las pautas más imponentes del cambio macroevolutivo a lo largo del tiempo geológico. Sin embargo, como han argumentado algunos evolucionistas, los sistemas biológicos y medioambientales son más complejos que eso». ²⁵

Estamos de acuerdo en que los mejores predictores de la riqueza de especies a escalas espaciotemporales menores no necesariamente predicen correctamente la riqueza de especies a escalas más amplias. Encontramos irónico, sin embargo, que los autores quieran mirar más allá de «la pauta mejor conocida en la diversidad de especies [...], el gradiente de valores bajos en los polos a valores altos en el ecuador [...], una pauta [...] tan general a través de tantos taxones» para encontrar una «explicación igualmente general». En algunas ocasiones, la inclinación científica a explicar mediante correlaciones variables e interpretaciones complejas puede llevarse demasiado lejos. Según nuestro parecer, la «explicación igualmente general» que persiguen estos autores es la fuente estacionaria de energía solar que implica mejores oportunidades para los ecosistemas ecuatoriales. Pero Gaston nos recuerda que «todos los involucrados deberán recordar que ningún mecanismo único tiene por qué explicar adecuadamente una pauta dada, que los patrones observados pueden variar con la escala espacial, que los procesos a escala regional influyen en las pautas locales y que ninguna pauta está exenta de variaciones y excepciones». ²⁶

Darwin atribuyó el progreso de la vida a través de la división del trabajo, que los teólogos naturales habían adscrito a armonías de orden superior, a la lucha por el éxito individual. Sin embargo, el incremento del número y la diversidad de organismos deriva más directamente de la disponibilidad de energía. El imperativo termodinámico proporciona a los individuos, en cuanto sistemas abiertos, un incentivo para organizarse en entidades de orden superior, energéticamente más eficientes. En otras palabras, la diversidad, la especialización profesional dentro de una econo-

mía progresiva y la estratificación en general pueden refinarse por selección natural, ejercida no sólo sobre individuos reproductores a varias escalas, sino también sobre comunidades que, como las moléculas de las células de Bénard, se organizan para prestar mejor el servicio exigido por la naturaleza: la reducción efectiva de gradientes. La variación ofrece nuevas posibilidades, y la selección natural las poda para labrar sistemas potentes adaptados a un entorno dado. Con todo, el móvil original (arreglárselas para disipar energía de la manera más eficiente posible y con los materiales disponibles) es el de la segunda ley. Antes de que intervenga la selección natural, la segunda ley «selecciona», de entre las distintas opciones cinéticas, termodinámicas y químicas, aquellos sistemas más capaces de reducir gradientes, dadas ciertas condiciones. Por muy complejo que sea, el desarrollo biosférico debe entenderse en un contexto energético. Como el origen de la vida, la regulación celular y el desarrollo y mantenimiento de organismos y ecosistemas, la segunda ley impulsa la evolución de las especies.

Tras una revisión exhaustiva de las explicaciones propuestas acerca de la riqueza de especies, que incluía 121 referencias, el biólogo australiano K. Rohde señaló que muchas de las hipótesis contienen razonamientos circulares, porque incorporan la asunción de que las especies son más diversas en los trópicos, precisamente aquello que queremos explicar. Estas teorías tautológicas incluyen

«la competencia, el mutualismo, la depredación, la carga de epifitos, las epidemias, la heterogeneidad espacial biótica, la diversidad de huéspedes, el tamaño poblacional, la amplitud de nicho, la tasa de crecimiento demográfico, la inclemencia ambiental y la parcelación a diferentes latitudes. Otras explicaciones no se sustentan en una evidencia suficiente, es decir, no presentan una correlación consistente entre la diversidad de especies y la estabilidad medioambiental, la predecibilidad del entorno, la productividad, la rarefacción abiótica, la heterogeneidad física, el decrecimiento latitudinal en el ángulo del Sol sobre el horizonte, la superficie, la aridez, la estacionalidad, el número de hábitats y los rangos latitudinales. Las hipótesis ecológicas y evolutivas, tal como suelen entenderse, no pueden explicar los gradientes, así como tampoco la dependencia de las reacciones químicas de la temperatura permite predecir la riqueza de especies. Sólo las diferencias en la energía solar se correlacionan consistentemente con los gradientes de diversidad a lo largo de la latitud, la altitud y, quizá, la profundidad».²⁷

Aparte del impulso termodinámico, muchos otros factores, más contingentes, afectan la diversidad de especies a escala local, regional y continental. Algunos, o la mayoría, de estos factores tal vez dependan también del flujo de energía para su propia función. La relación entre termodinámica y diversidad de especies es similar a la existente entre la segunda ley y la química del carbono que posibilita el trabajo de la vida. La mayor diversidad de especies en los trópicos puede atribuirse a la estabilidad medioambiental y al incremento de la energía disponible para los organismos (correlacionada con las temperaturas tropicales más altas), lo cual favorece la interacción, incluyendo la transferencia sexual de genes y las transformaciones simbióticas. El incremento de la energía disponible conduce a una aceleración del tiempo evolutivo efectivo. La segunda ley «empuja» a las comunidades a hacerse más diversas, pero deben darse las condiciones que lo permitan. ¿Cómo se traduce la segunda ley en los detalles de la especiación? ¿Hasta qué punto se correlaciona el aumento de la temperatura con las tasas de mutación, la simbiosis o el acortamiento del tiempo de generación? Rohde menciona la «necesidad urgente» de estudios experimentales sobre los efectos de la temperatura en la velocidad de selección. Sin embargo, la temperatura no es la causa, sino una expresión, un índice, de la energía disponible para la compleja función de la destrucción creativa.

Extinciones en masa y mares serenos

En los últimos 600 millones de años ha habido al menos cinco periodos de extinciones múltiples o en masa. La más famosa es la del límite Cretáceo/Terciario, hace unos sesenta y seis millones de años. Esta divisoria marca el fin de todos los dinosaurios (si bien la mayoría de sus 350 géneros había perecido con anterioridad), así como de una multitud de especies menos conspicuas. La hipótesis más popular acerca de esta extinción masiva es la caída de un gran meteorito en el océano, frente a la península del Yucatán, en México. El gran impacto habría provocado cambios medioambientales drásticos, como inundaciones, incendios, nubes de polvo y vulcanismo, todo lo cual habría reducido sobremanera el número de especies, en parte por el bloqueo de la radiación solar incidente. El registro fósil evidencia un decrecimiento catastrófico de la riqueza de especies. Consideremos los foraminíferos: de las veinticuatro especies de estos organismos del plancton marino que existían en aquel entonces, sólo una superó el límite C/T (y por poco, ya que se trata de una especie rara).

Aunque perecieron los dinosaurios, que dependían de un suministro abundante de alimento, muchas plantas, menos dependientes, sobrevivieron a la gran extinción cretácica. Otros animales más pequeños, con más capacidad para desenvolverse en medio de la oscuridad, el polvo y el humo, o de competir por los restos de los animales más grandes (quizá preservados por el frío subsiguiente), también sobrevivieron. Entre los supervivientes se contaban los ancestros de las aves, los roedores y los primates. Estos animales eran capaces de regular su temperatura corporal. Pese a que requiere un consumo mayor de alimento por unidad de masa corporal, esta facultad, llamada «homeotermia», contribuyó a liberar a los ancestros de aves y mamíferos de la dependencia de la luz y el calor diurnos. No obstante, necesitaban alimento suficiente para mantener su calor interno. Los mamíferos modernos excavan, rastrean, olfatean y se aparean a temperaturas tanto cálidas como frías. El control de la temperatura interna les proporcionó más autonomía y el acceso a nuevos gradientes. Los mamíferos podían bombear más sangre durante más tiempo para alimentar su procesador neural central, el cerebro.

Las causas posibles de las extinciones en masa son varias: impactos de asteroides; episodios de vulcanismo masivo, que provocan calentamiento global y lluvias ácidas por exceso de dióxido de carbono y sulfuro en la atmósfera; cambios climáticos acarreados por los propios organismos; y hasta radiaciones dañinas procedentes de raros encuentros con supernovas, que envían oleadas letales de fotones de alta energía al sistema solar. Se estima que tales explosiones estelares ocurren una vez cada 50 millones de años. La mayor extinción en masa no fue la del Cretácico, sino la del límite Pérmico/Triásico, con una pérdida de más de la mitad de las familias, el 82 % de los géneros y un pasmoso 92 % de las especies.²⁸

Cada extinción en masa despojó a la Tierra de multitud de especies. El tiempo promedio para la restauración del número de especies a las cifras anteriores parece ser de entre 20 y 50 millones de años. La recuperación de cada extinción en masa incluyó la existencia de nuevas especies, que en algunos casos vivían de nuevos gradientes y en nuevos hábitats. Se trata de la misma pauta que observamos en ecosistemas cuya diversidad decae tras una gran perturbación y se recupera a lo largo de la sucesión subsiguiente. Los mismos principios rigen para la evolución biosférica y la sucesión ecosistémica. Tras una perturbación o tensión, el ecosistema se reconstruye a partir de las especies remanentes y su acervo genético. La principal diferencia es que el ecosistema global de la biosfera es más pro-

clive a poner en circulación formas reductoras de gradientes enteramente nuevas. Como en el caso humano, esto es un arma de doble filo. Por ejemplo, estamos destruyendo los ecosistemas forestales, los cuales, como hemos visto, son los reductores de gradientes más expertos de la biosfera. La inteligencia y la tecnología humanas, sin embargo, ofrecen la promesa de expandir la potencia reductora de gradientes de la biosfera al espacio exterior. Retrospectivamente, la situación podría parecerse a la muerte del último dinosaurio, que preparó el planeta para el ascenso de los mamíferos y las aves diseminadoras de semillas, y el auge asociado de los complejos y fascinantes bosques que ahora estamos destruyendo.

Progreso y predicción

En su reciente libro *What Evolution Is* (2001), Ernst Mayr inicia una sección sobre el progreso evolutivo con la frase: «Evolución significa cambio direccional».²⁹ «Es bien legítimo», continúa Mayr, «referirse a la serie de pasos de los procariotas a los eucariotas, los vertebrados, los mamíferos, los primates y el hombre como progresivos. Cada paso de esta progresión fue el resultado de una selección natural exitosa. Los supervivientes de este proceso de selección se han demostrado superiores a los eliminados. El producto final de toda carrera armamentística, como se la llama, exitosa puede considerarse un ejemplo de progreso.»³⁰ Mayr prosigue afirmando que el progreso produce organismos más eficientes y mejorados que los precedentes. La selección natural es la piedra angular del pensamiento darwiniano. Cuando se pone bajo la lupa de la termodinámica y se aplica la óptica de Lotka, Wicken y Ulanowicz, la selección se enmarca en los términos del flujo de energía creciente a través de bucles autocatalíticos energético-materiales. La ventaja selectiva recaerá en aquellos sistemas autocatalíticos que incrementen el flujo de energía a través de sí mismos mejor que sus competidores.

Antes hemos hablado del parentesco entre los procesos evolutivos y el desarrollo ecosistémico. Parafraseando a Margalef, puede decirse que las especies son empujadas —o succionadas— en la dirección tomada por la sucesión. Hemos mostrado que los procesos termodinámicos están detrás del desarrollo de los ecosistemas. Muchos de estos cambios, como el incremento del flujo de energía y de la diversidad de especies, son de naturaleza direccional. La evolución, que depende de los procesos ecosistémicos, sigue una trayectoria direccional similar.

El innovador biólogo ruso Alexander Zotin concibió un ejemplo gráfico de la direccionalidad evolutiva. Zotin registró la tendencia de las es-

pecies constituidas por organismos grandes a incrementar su tasa metabólica respiratoria (consumo de oxígeno) a medida que evolucionaban. Puesto que, obviamente, no podía medir el metabolismo fósil directamente, Zotin se fijaba en la aparición de un grupo de organismos en el registro geológico y luego medía la actividad metabólica de especies vivas similares. El incremento de la actividad metabólica se correlacionaba estrechamente tanto con el incremento de la tasa respiratoria como con el de la producción de entropía específica. A lo largo de los últimos 600 millones de años, las tasas metabólicas de los macroorganismos (no bacterianos) se han multiplicado por cuatro. En las bacterias, las tasas metabólicas de las anaerobias, más primitivas, son más bajas que las de las aerobias, que evolucionaron posteriormente. Zotin recurrió a crustáceos y moluscos para el intervalo Cámbrico-Ordovícico; a anfibios, insectos y reptiles para el intervalo Carbonífero-Devónico, y a roedores, mamíferos, primates y aves para el intervalo posterior al Cretáceo. La curva general es bastante lisa (figura 17.2). Lo que esta relación parece indicar es que, a medida que la evolución progresaba, la vida «inventó» formas novedosas y mejores de degradar la energía. No sólo fue aumentando el número de especies, sino que las supervivientes se hicieron más eficaces en la reducción de gradientes. Por ejemplo, la eficiencia metabólica aumenta llamativamente de los reptiles a los mamíferos, cuya adquisición evolutiva de un diafragma muscular les permitió inhalar más aire oxigenado.

La dirección de los ecosistemas hacia comunidades clímax de crecimiento lento también se observa en el laboratorio. Tras un periodo de colonización rápida de placas de agar, las bacterias desarrollan tipos morfológicos diferentes, comunidades más complejas y de crecimiento más lento. Si se sumerge un centenar de placas de vidrio en agua de mar y luego se llevan al laboratorio, aquellas que hayan sido retiradas antes estarán cubiertas de formas de crecimiento rápido, como bacterias y ciliados, mientras que las placas que hayan sido retiradas más tarde contendrán comunidades microbianas más nutridas y complejas. Al cabo de unas semanas, las colonias incluirán cirrípedos y otros animales pequeños, a medida que el microecosistema despliega su propia versión de la sucesión.

La pauta de división de las primeras células de un huevo animal fecundado se asemeja a las fases iniciales de la sucesión ecológica. Las células de la blástula, la fase embrionaria inicial, se multiplican rápidamente y parecen idénticas. Sin embargo, a medida que el embrión se desarrolla, las células se diferencian y mueren. Los diversos tejidos, órganos y extremidades del animal representan un incremento de diversidad si-

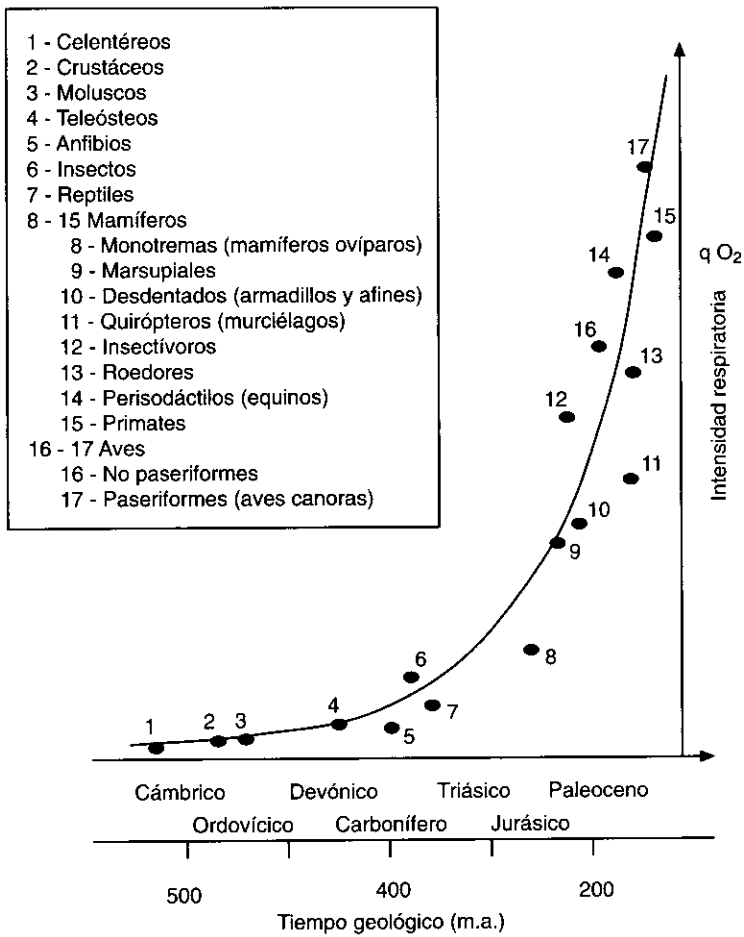


Figura 17.2. La evolución de la intensidad respiratoria de los animales de gran tamaño a lo largo del tiempo geológico. Alexander Zotin ideó el concepto de «intensidad respiratoria independiente del tamaño», qO_2 , o consumo de oxígeno por unidad de masa corporal. Esta variable, el metabolismo normalizado, aumenta con el tiempo evolutivo. No sólo hay cada vez más especies, sino que las supervivientes degradan más intensamente los gradientes disponibles. Un gorrión o un colibrí tienen un metabolismo específico mayor que el de gusanos, moluscos y reptiles. (De Zotin, 1984.)

milar a la biodiversidad creciente a lo largo del desarrollo ecosistémico. Luego, como ocurre con un ecosistema, el crecimiento disminuye, y aparece una forma madura integrada y energéticamente eficiente. Los organismos adultos y los ecosistemas maduros han alcanzado elevados niveles de procesamiento de energía y reducción de gradientes.

¿Podrían ser los animales en cierto modo un legado de antiguos episodios de crecimiento celular y sucesión ecológica? ¿Están «congeladas» en el desarrollo animal antiguas pautas de crecimiento microbiano, de una fase rápida inicial a una trama final eficiente? ¿Equivalen los organismos adultos a comunidades «clímax» móviles?

Nuestra corazonada es que sí. Así como la evolución es en buena medida ecología a lo grande, el organismo parece ser ecología en pequeño. Es evidente que hace falta más investigación en este campo, pero tal vez los organismos individuales puedan contemplarse como versiones espacial y temporalmente condensadas de procesos ecológicos.

Los sistemas que obtienen más energía y la invierten eficientemente en producir descendencia son menos proclives a ser descartados por el proceso selectivo. La selección natural favorece a los sistemas expertos en la gestión de flujos termodinámicos. Los sistemas más efectivos, sean organismos, ecosistemas o biosferas, parecen incrementar su diversidad hasta que alcanzan un valor óptimo local de flujo energético. El principio de captación y degradación puede apreciarse en el incremento de taxones (reinos, órdenes, familias, géneros y especies), que proporciona un vívido testimonio de que la evolución ha inventado vías disipativas cada vez más novedosas y duraderas desde el comienzo de la vida. Puesto que partió de cero, resulta obvio que el número de especies sobre la Tierra ha aumentado a lo largo del tiempo geológico. Insistimos: desde la perspectiva de la biosfera como un sistema complejo único, cada nueva especie representa una nueva bifurcación bioenergética; cada nueva especie es como una nueva hoja en el árbol de la vida, una nueva vía para la captación, acumulación y degradación de energía. En el presente, la humanidad está podando drásticamente el árbol de la vida. Sin embargo, quizá vuelva a crecer como antes, con renovado vigor.

Según la visión canónica de los evolucionistas, la vida puede ser común, pero si se volviera a poner en marcha el proceso desde las condiciones iniciales, podría dar lugar a formas muy diferentes. Mayr subraya la «increíble improbabilidad de la emergencia de la inteligencia genuina», dice que la aparición de células nucleadas a partir de simbioses bacterianas es «un suceso de lo más improbable» y concluye que «nada en biología es menos predecible que el curso futuro de la evolución».³¹ Stephen Jay Gould esgrime el largo tiempo de películas bacterianas anterior a la emergencia de plantas y animales como evidencia del carácter contingente y no dirigido de la evolución.³² El geoquímico David Schwartzman argumenta que se necesitaron más de dos mil millones de años de vida

microbiana para meteorizar las rocas, hasta que los niveles de dióxido de carbono descendieron lo bastante para que el planeta se refrescara y, así, estuviera en condiciones de sustentar formas de vida aeróbicas complejas como las plantas y los animales.³³ ¿Son meramente aleatorios estos acontecimientos? ¿Estaríamos aquí para maravillarnos de su ocurrencia si no hubieran sucedido (el llamado «principio antrópico»)?

El libro *Life's Solution* (2003), del paleobiólogo de Cambridge Simon Conway Morris, se centra en el fenómeno de la convergencia evolutiva. Es como si la evolución encontrara soluciones similares a problemas similares. El ojo evolucionó seis veces por separado; el ojo tipo cámara de un pulpo, un invertebrado, es similar al ojo de los vertebrados. Linajes separados de plantas y animales han convergido hacia soluciones complejas similares desde puntos de partida muy distintos. Si volviera a pasarse la «película» de la evolución, sostiene Morris, es probable que la inteligencia reapareciera. Desde el punto de vista termodinámico, no tenemos motivos para discrepar de Morris. En nuestra visión, las bacterias que nadan hacia un gradiente de alimento muestran una inteligencia incipiente, de base termodinámica, en la conexión entre su sensación de un gradiente y su gasto de energía para acceder a esa fuente de alimento. Para nosotros, esto es una clase de protoplanificación (véase el capítulo 20), la base termodinámica de la inteligencia que tanto se ha desarrollado en el primate humano. Sin embargo, la evolución de seres humanos tal como los conocemos, con sus ordenadores Macintosh, la *Mona Lisa* y la música de Miles Davis, es muy, muy, muy improbable. Morris señala que «la convergencia nos dice dos cosas: que las tendencias evolutivas son reales y que la adaptación no es una pieza ocasional en la máquina orgánica, sino que ocupa un lugar central en la explicación de cómo llegamos aquí».³⁴

La tendencia a la aleatoriedad molecular, como exige la segunda ley, siempre está presente en la naturaleza, pero los sistemas termodinámicos organizados por gradientes, volviéndose cada vez más complejos e inteligentes, generan una aleatoriedad incrementada fuera de sus dominios de crecimiento. Esta tendencia al incremento de la complejidad, el reciclado y la apertura de nuevas vías disipativas comenzó mucho antes de la evolución de los animales. Lejos de ser aburrida, la fase inicial de la vida microbiana contempló la evolución de las principales formas metabólicas, cada una de las cuales representa una nueva vía para la reducción de gradientes. No todos los linajes adquirieron cerebros grandes, pero algunos sí. Hoy los cerebros más grandes pertenecen a los mamíferos: el de los chimpancés y los delfines presenta unos 30.000 millones de neuronas corticales; el de los seres humanos, 50.000 millones; y el de los elefantes, 100.000 millones. Se ha sugerido que esta tendencia no es la evidencia

de una dirección, sino el resultado de la variación de un cerebro originalmente pequeño a medida que, a lo largo del tiempo evolutivo, se generaban nuevos tipos al azar. No obstante, los cerebros mayores se correlacionan con maneras innovadoras de identificar y explotar gradientes, y con los comportamientos complejos necesarios para ello. Los cerebros se suman a las invenciones génicas de los microbios.

Estamos de acuerdo en que, si la evolución comenzara de nuevo, emergerían nuevas formas de inteligencia y metabolismo con variantes desconocidas para nosotros. No se produciría la reevolución de humanoides como los klingon o los vulcanos de la serie *Star Trek*, ni surgirían los alienígenas de grandes ojos tan a menudo imaginados en las historias de abducciones. Éstas son peculiaridades de la imaginación cultural de los seres humanos. Sin embargo, la inteligencia y la tecnología están en consonancia con la tendencia de la segunda ley al incremento de la explotación y reducción de los gradientes disponibles: la inteligencia nos proporciona el conocimiento, y la tecnología el modo de completar la reducción de gradientes.

De hecho, aunque inconscientes, las actividades metabólicas de las bacterias representan tecnologías orgánicas muy antiguas, más variadas y sofisticadas que las nuestras, y que anteceden en mucho a la humanidad. La distribución cósmica de los requerimientos básicos de la vida (agua líquida, fuentes de carbono y nitrógeno, radiación solar), combinada con la inclinación de la naturaleza a inventar medios implícitamente inteligentes de llevar gradientes al equilibrio, a través de la formación de diversas clases de sistemas cíclicos, nos sugiere que la materia viva, cuando quiera y dondequiera que surja, tenderá a superar restricciones, ganando inteligencia de manera inexorable, si bien indetectable, a medida que expande su complejidad y su dominio. Según la termodinámica, es de esperar que la materia viva reduzca gradientes medioambientales en su camino, amplíe el alcance de su reciclado material, invada nuevos territorios e incremente sus capacidades de reunir, recuperar y procesar información. Aunque los detalles de forma y función diferirán, la termodinámica sugiere que cabe esperar que, en general, la materia viva incremente los medios de reducción de gradientes a su disposición. Concluimos que la evolución ciertamente tiene una dirección: la de la expansión de las funciones de los sistemas TNE, mientras éstos siguen la flecha del tiempo hacia un futuro apasionante e incierto.

Cuarta parte
Lo humano

Sólo he tenido una arruga, y estoy sentada sobre ella.

Jeanne Calment

La exuberancia es belleza.

William Blake

Medicina termo-darwiniana

Los principios de la termodinámica no se limitan a las células de Bé-
nard y los ecosistemas. También arrojan luz sobre el funcionamiento del
sistema complejo más familiar de todos: nosotros mismos. En este capí-
tulo mostraremos que tras el envejecimiento subyace la termodinámica, y
que el ejercicio —una forma de flujo de energía— conduce a una vida
más saludable. Como otros sistemas complejos, el ser humano es un pro-
ceso energético; y como tal, es iluminado por nuestra termodinámica de
gradientes.

El catedrático de medicina Walter M. Bortz, de la Universidad de
Stanford, ha corrido más de veinte maratones. Bortz, cuya especialidad
es la gerontología, es un apasionado de las posibles contribuciones de la
termodinámica al futuro de la medicina. El sistema humano es recorrido
por un flujo de energía, como prueban los beneficios del ejercicio para la
salud y la longevidad: «Ninguna dieta ni medicamento es tan importan-
te para la longevidad como el ejercicio. No es que uno sea demasiado
viejo para hacer ejercicio, sino que uno es demasiado viejo por no hacer
ejercicio [...]. La forma física se convierte en una cuestión de supervi-
vencia. No hay ningún medicamento en el mercado ni en perspectiva que
sea tan prometedor para una vitalidad prolongada como el ejercicio fí-
sico», dice Bortz. «¿Por qué retribuir a los accionistas de Merck y John-
son & Johnson cuando sabemos que el ejercicio es mejor e infinitamente
más barato?»¹ Bortz defiende que el ejercicio es el ingrediente más im-
portante de la salud (física y mental) y la longevidad. Ha sido presidente
de la American Geriatrics Society y copresidente del grupo de trabajo so-
bre envejecimiento de la American Medical Association.

Un libro de la serie *Dummies* lleva directamente al gran público su
mensaje de obtención de salud a través del ejercicio basado en la termo-

dinámica y la evolución.² Bortz también conecta con la comunidad científica y médica por medio de artículos del estilo de «Envejecimiento como entropía» y otros, publicados en revistas médicas profesionales.³ La geriatría y la gerontología constituyen un activo campo de investigación, con miles de científicos dedicados a desentrañar por qué y cómo envejecemos y morimos. Leonard Hayflick obtuvo en 1961 un resultado clave en la investigación del envejecimiento, al mostrar que el ADN de los fibroblastos humanos (células que forman el tejido conjuntivo) cultivados en laboratorio sólo puede replicarse un cierto número de veces. Esto establecía un límite superior para la mortalidad del organismo. Hayflick halló que las células humanas tienen una capacidad finita para reproducirse y que, por lo tanto, son mortales. Desde entonces se han venido identificando algunas líneas celulares, como la germinal o cepas cancerosas, que parecen ser inmortales. Más tarde se descubrió que este fenómeno era consecuencia del acortamiento de los telómeros. Éstos son secuencias repetitivas de nucleótidos que se encuentran en los extremos de cada uno de nuestros cromosomas. Los telómeros se acortan en el curso de la división celular normal, lo cual limita la multiplicación de las células. Las enfermedades, las lesiones y el estrés también acortan la longevidad. Aunque hoy por hoy no existe una teoría del envejecimiento que cuente con una aceptación general, Bortz defiende con elocuencia que el envejecimiento metabólico puede retardarse mediante una dosis óptima de ejercicio.

Se ha dicho que uno es tan viejo como se siente. No sólo es cierto que la edad cronológica no necesariamente se corresponde con la edad fisiológica, sino también que hay pruebas fehacientes de que esta última puede retardarse y, quizás, hasta invertirse, lo que permitiría sumar años de vida efectiva. Con la ayuda de su hijo, Bortz recopiló datos sobre consumo máximo de oxígeno (VO_2 max) en carrera por parte de maratonianos, velocistas, remeros y ciclistas, así como de personas que no hacían ejercicio.

Los investigadores médicos consideran que el consumo máximo de oxígeno es una medida excelente de la salud cardiovascular. A partir de los treinta y cinco años, los atletas van perdiendo su capacidad física a razón de un 0,5 % anual,⁴ mientras que las personas sedentarias lo hacen a razón de un 2 % anual. La diferencia puede parecer escasa, pero es acumulativa. El efecto del ejercicio «puede parecer pequeño [...], pero cuando la diferencia del 1,5 % anual se multiplica por décadas, se hace enorme».⁵ Lo que los Bortz quieren decir es que mientras los deportistas envejecen cinco años por década, las personas sedentarias envejecen veinte años en el mismo tiempo. Estos resultados son asombrosos, y sus implicaciones

deberían resultar obvias para una sociedad preocupada por la salud global, que gasta billones de dólares anuales en sanidad. Lo primero que revelan estos datos es que las personas de más de treinta y cinco años medianamente activas envejecen fisiológicamente a razón de un 1% anual. Éste es el envejecimiento normal. Los superatletas pueden rebajar esta tasa a la mitad, mientras que las personas sedentarias envejecen el doble de rápido de lo normal. Al cabo de veinte años, estas personas habrán envejecido fisiológicamente cuarenta años, y los deportistas sólo diez (figura 18.1). Si esto es cierto, se ha descubierto una fuente de la juventud, y su base termodinámica es el flujo de energía. Forzar al cuerpo a emplearse energéticamente a la manera de nuestros ancestros puede prevenir los efectos del envejecimiento. Los sistemas termodinámicos requieren flujos de energía. La inactividad, el desuso del aparato cardiovascular, disminuye la vitalidad. La conexión longevidad-ejercicio parece ser aún más evidente en la gente mayor. Según el investigador Rick Lovett, «con seis meses de entrenamiento invertimos 30 años de envejecimiento».⁶ Lovett añade que nadie es demasiado viejo para beneficiarse del ejercicio, y que cuando la gente abandona la rutina de unos cuantos periodos cortos de ejercicio intenso, sus músculos se atrofian y mueren. El cliché «úsalo o piérdelo» tiene una base bioenergética. Lovett también ofrece datos que sugieren que el ejercicio excesivo puede causar un deterioro permanente: después de dieciséis a dieciocho carreras de ultramaratón (100 kilómetros), la condición física de los corredores decae drásticamente.⁷

Ni quemarse ni apagarse

A pesar de los grandes avances y las promesas de la medicina occidental, como el conocimiento creciente de las bases genéticas de la enfermedad y las posibles terapias génicas, abundan los malentendidos. Aunque intuitivamente puesto de manifiesto en algunos remedios populares, en prácticas indígenas y en la medicina oriental, el vínculo termodinámico entre salud y reducción óptima de gradientes no se ha enunciado explícitamente. La intuición más obvia de este vínculo reside en la constatación general de que los regímenes alimentarios y de ejercicio son importantes para nuestra salud. Cuando el paciente entra en el consultorio, el médico tiene enfrente uno de los sistemas termodinámicos más complejos de este mundo. A diferencia de las máquinas construidas por ingenieros, este cuerpo humano (mucho más que humano cuando se considera su historia metabólica, celular y animal) tiene el legado de un flujo más o menos ininterrumpido durante los últimos 3000 millones de años. La medicina oc-

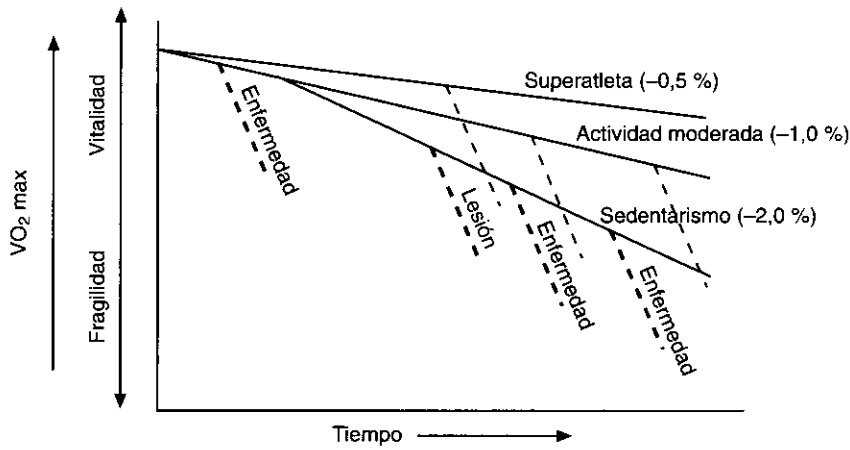


Figura 18.1. La vitalidad y la fragilidad humanas medidas por el consumo máximo de oxígeno ($VO_2 \text{ max}$) en función de la edad. Después de los treinta y cinco años, las personas comienzan a perder capacidad cardiovascular. Esto es envejecimiento normal. Pero la rapidez con que se pierde la salud cardiovascular depende de la cantidad de ejercicio. La gente en buena forma pierde un 0,5 % de capacidad cardiovascular cada año, la que está en una forma aceptable envejece un 1 % al año, y la que no hace ejercicio, un 2% al año. Al cabo de veinte años, los que están en baja forma habrán envejecido metabólicamente unos cuarenta años, mientras que los que están en mejor forma sólo habrán envejecido diez años. Las enfermedades y las lesiones pueden acelerar el proceso de envejecimiento. (Datos de Bortz y Bortz, 1996.)

cidental, a pesar de sus proezas, se ha basado en un modelo incompleto del cuerpo como máquina. Esta diferenciación entre organismos y artefactos humanos resulta crucial.⁸ Los organismos pueden resentirse del exceso de trabajo. Sin embargo, mucho más que la mayoría de máquinas, también se resienten de la falta de trabajo. Nuestro antiguo legado de transformación energética requiere que nos mantengamos activos para estar en forma y para que alcancemos nuestra longevidad máxima. Además, los organismos deben tomar decisiones que las máquinas no afrontan, y que afectan a su futuro. La frase «úsalo o piérdelo» resume tanto la opcionalidad del ejercicio como la importancia de proporcionar a las «máquinas naturales» que llamamos organismos el flujo de energía que precisan y que, como hemos visto, es clave para comprender su función y comportamiento básicos.

Eugene (Gene) Yates, un doctor en medicina y profesor en las escuelas médicas de Stanford y en la Universidad de California en Los Ángeles, ha introducido una perspectiva termodinámica en el asunto del envejecimiento, la senectud y la muerte. Con setenta y cinco años, Yates es un

sabio polifacético que se encuentra igual de cómodo discutiendo sobre fisiología, termodinámica o mecánica cuántica. Es un hombre alto y recio aficionado a la pesca, la caza y las acampadas. Entre los comités de que forma parte, se encuentra una junta de la NASA que analiza las cuestiones fisiológicas que plantearán los viajes a Marte. Lo reseñamos porque fue uno de los primeros en reconocer la importancia que la autoorganización y la termodinámica revisten para la biología. En 1979 Yates organizó un encuentro en Dubrovnik, en la antigua Yugoslavia, que reunió a treinta científicos procedentes de los campos de la biología, la química, la geología, la física, la matemática y la ingeniería del control. Entre los presentes estaban Harold Morowitz, Brian Goodwin, Stephen Jay Gould, Philip Anderson y Ralph Abraham. Se habló de la organización, la emergencia, la información, el individuo, la evolución, la complejidad y la estabilidad, entre otros temas. Fue una conferencia adelantada a su tiempo.⁹

Yates prefiere la palabra *senescencia* para referirse al deterioro asociado con la edad. «Es la senescencia, no el envejecimiento, lo que preludia la muerte por vejez.»¹⁰ Yates cree que *salud* es sinónimo de estabilidad. La mala salud es un signo de inestabilidad, cuya expresión última es el colapso de la dinámica del sistema, que llamamos muerte. Yates contempla la senescencia y la muerte como el resultado de un fallo parcial o total del sistema. El primer caso puede consistir en un desarreglo de procesos como la reparación y protección del ADN o la fidelidad de su replicación, la eliminación de desechos, la protección de los radicales libres o el deterioro del sistema inmunitario, como ocurre en el sida. «La muerte del sistema sobreviene cuando una constelación de partes y procesos interrelacionados experimenta una reducción del rango dinámico, más allá de cierto mínimo crítico [requerido] para la estabilidad en un medio fluctuante.»¹¹ La muerte súbita se deriva de cambios en múltiples ligaduras que acarrearán la pérdida de la estabilidad del sistema.

El ochenta por ciento de la longevidad de las especies se correlaciona con el peso cerebral, el peso corporal, el metabolismo específico y la temperatura corporal. Yates esboza algunas propiedades de la senescencia:¹²

1.^a La mortalidad humana aumenta monotónicamente de los treinta a los noventa años.

2.^a La composición química del cuerpo cambia regularmente con la edad.

3.^a Las funciones fisiológicas y bioquímicas declinan progresivamente (como se aprecia en el descenso del consumo máximo de oxígeno con la edad).

4.^a La capacidad de adaptación a los cambios ambientales se reduce.

5.^a Aumenta la vulnerabilidad a ciertas enfermedades.

6.^a Muchos procesos, como el metabolismo, se retardan.

7.^a Algunos aspectos de la función cerebral pueden fallar, como ocurre en el Alzheimer, mientras que otros, como la madurez y la sabiduría, pueden mejorar con la edad.

Para Yates, la senescencia comienza cuando los procesamientos y transformaciones de energía han copado todos los grados de libertad del sistema, de manera que no quedan vías ni escapes disponibles. Conviene con Bortz en que lo que no se usa se pierde. Sin un flujo de energía adecuado, los sistemas biológicos se atrofian. Yates también aborda un tema que todos los superatletas conocen: lo que se usa *también* se puede perder.¹³ Por encima de las 2000-3000 kilocalorías semanales de ejercicio, el rendimiento anabólico decrece y se imponen el deterioro oxidativo y el desgaste. La figura 18.2 es una representación gráfica de esta idea. La coordenada horizontal corresponde a las diferentes tasas de actividad metabólica (básica, sedentaria, activa y superactiva) y la vertical al procesamiento energético total. Nótese que el flujo de energía aumenta con la actividad. La curva más interesante es la de rendimiento anabólico. Este concepto se refiere a la faceta constructiva del metabolismo, como la producción de tejido muscular. Según la representación de Yates, alcanzaría un punto óptimo hacia las 2500 kilocalorías semanales. Por debajo de esta cantidad de ejercicio estaríamos en el ámbito del «usar o perder», y por encima en la situación hiperactiva del «usar y perder».

Yates compara la curva de rendimiento anabólico con la eficiencia creciente y el par de torsión en un motor de combustión. El incremento de revoluciones por minuto genera más potencia, pero sólo hasta cierto punto. Por encima de ese valor, acelerar las revoluciones del motor no hará más que rebajar la potencia y la eficiencia. Análogamente, el organismo es un sistema biológico cuyo rendimiento óptimo se obtiene no al máximo o al mínimo, sino dentro de un estrecho rango de actividad. Un flujo de energía máximo deteriora y degrada el sistema y favorece la senescencia. El organismo se quema. Por el contrario, un flujo de energía mínimo lleva a la atrofia y el estancamiento. El organismo se apaga.

Bortz y el neurólogo Jeff Victoroff argumentan que la salud física y mental depende de un punto medio, un nivel óptimo energético entre sedentarismo y estrés, entre déficit y exceso de flujo de energía. El ejercicio aeróbico proporciona el flujo de energía necesario para una vida larga, pero el exceso de ejercicio deteriora las células y puede perjudicar nues-

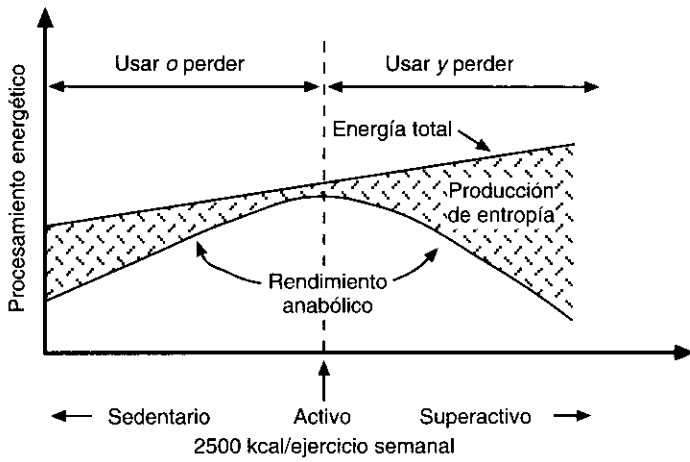


Figura 18.2. La abscisa de esta gráfica es el nivel de actividad: sedentario, activo y muy activo. La ordenada es el procesamiento o consumo energético de los sujetos. Como es de esperar, el procesamiento o consumo energético aumenta con el nivel de actividad. De especial interés es el rendimiento anabólico, o la parte constructiva del metabolismo, que evidencia un nivel óptimo de ejercicio o actividad. Yates estima este nivel óptimo en unas 2500 kilocalorías de ejercicio por semana. Por debajo de esta cantidad de ejercicio el cuerpo pierde capacidad metabólica, y por encima comienza a perderla también debido al desgaste y la caída del rendimiento metabólico. (Adaptado de Yates y Benton, 1995.)

tra salud a largo plazo. Como señala Bortz, el sistema vascular no consiste en tuberías inertes, sino que se remodela constantemente en respuesta a la demanda de riego sanguíneo. Las arterias en desuso se estrechan. Los músculos en desuso se atrofian. Por el contrario, el flujo sanguíneo (que con su suministro de hemoglobina incrementa el gradiente glucosa/oxígeno del que obtienen energía las neuronas) aumenta en virtud de actos voluntarios. El más simple y efectivo de tales actos es el ejercicio. La naturaleza del acoplamiento entre actividad neuronal y flujo sanguíneo es una activa área de investigación en el campo de la imagería cerebral. Aunque las neuronas no consumen energía al enviar impulsos nerviosos, mantienen gradientes de iones a través de la membrana celular. Son estos gradientes los que hacen posible la neurotransmisión. Sin embargo, su mantenimiento depende del riego sanguíneo cerebral (por eso el pensamiento o el estudio intensivos, aun sin movimiento corporal, pueden abrir el apetito).

La decisión consciente de hacer ejercicio es sólo la punta del iceberg o el inicio de una cascada que tiene numerosas consecuencias. Las má-

quinas no toman decisiones de este estilo ni se vigorizan por los flujos puestos en juego a causa de su decisión. La autopsia de Clarence Demar, que corrió la maratón de Boston treinta y dos veces y la ganó en siete ocasiones, reveló que sus arterias estaban enormemente dilatadas. Las arterias se expanden literalmente con el uso. Receptores de flujo en la cara interna de las arterias captan la energía del torrente sanguíneo y ajustan las dimensiones de los vasos a la demanda de sangre. Puesto que unas arterias constreñidas incrementan las posibilidades de sufrir una embolia, ensancharlas a base de ejercicio es un modo útil y natural de prevenir las embolias y la arteriosclerosis. La aspirina, tomada en pequeñas dosis, ayuda a deshacer las plaquetas (fragmentos de células sanguíneas que resañan las hemorragias). Las plaquetas pueden aglomerarse con depósitos de colesterol y taponar una arteria, dejando sin suministro de sangre a las neuronas abastecidas por ella y provocando una embolia. Hoy los médicos reconocen que las embolias vienen precedidas de arteriosclerosis y otros factores de riesgo mucho antes de que se manifiesten.

La serie de factores que desembocan en una embolia se denomina «riesgo cerebrovascular». Las presiones arteriales demasiado bajas, o demasiado altas, también se asocian con las embolias; el torrente circulatorio debe fluir con el caudal justo. El sistema musculoesquelético también es dinámico y se fortalece con el uso, como saben aquellos que trabajan al aire libre. Aunque el cerebro no es un músculo, la investigación neurológica evidencia que también (y especialmente) se desarrolla con el uso. Por ejemplo, los ciegos (cuya audición, en algunos casos, duplica en prestaciones la de los no ciegos) emplean áreas del córtex visual primario, pero no para procesar información visual. Esta reconfiguración cerebral en función de la utilidad sensorial no se limita a los seres humanos: los gatos ciegos, por ejemplo, dedican áreas de su córtex visual a la audición, mientras que los gatos sordos «ven» con su córtex auditivo. Por automática y casi fisiológica que se vuelva con el hábito, esta reorientación de las tendencias genéticas del cerebro puede iniciarse de manera voluntaria. Los cerebros de los violinistas tienen el lóbulo frontal derecho sobredimensionado, en correspondencia con su uso aumentado de los dedos de la mano izquierda. Los efectos del uso que hacemos de nuestro cerebro no son sólo a corto plazo. Varios estudios evidencian que la educación mantiene a raya la enfermedad de Alzheimer. A mayor educación, mayor efecto, aunque aquélla se haya producido hace décadas. Este robustecimiento probablemente se explica por que las rutas termodinámicas, una vez establecidas, se refuerzan por el uso. Pueden ser inicialmente electivas, pero luego continúan fluyendo por sí mismas. El vínculo entre genética y termodinámica viene a ser como el existente entre la infraes-

estructura y el tráfico de una ciudad: los genes construyen las calles, pero la termodinámica determina su uso en tiempo real.

Respaldándose en la termodinámica y en la creciente conciencia de la vanguardia médica acerca de la importancia de nuestra historia evolutiva, Bortz propone que el mejor método general para alargar la vida es el ejercicio. Un ejemplo llamativo es el de un osteópata profesional que interpretó mal la radiografía de una pierna que había estado seis meses escayolada: pensó que pertenecía a un hombre veinte años mayor que su auténtico dueño.¹⁴ Esto es lo que acarrea la falta de uso: el flujo sanguíneo disminuido en la pierna inmóvil simuló los efectos del envejecimiento.

Este ejemplo también acentúa la diferencia entre los organismos desarrollados de manera natural (sistemas abiertos termodinámicamente) y las máquinas construidas por el hombre (su inadecuado modelo médico). Los sistemas naturales son capaces de funcionar elegantemente a temperatura ambiente, a diferencia de las máquinas industriales, que precisan de altas temperaturas y presiones. A temperaturas ordinarias y a la presión atmosférica, las células respiran oxígeno y producen agua como producto de desecho; ni que decir tiene, también pueden crecer y reproducirse. Las máquinas, en cambio, parecen toscas, torpes, ineficientes y usualmente inferiores en la mayoría de estos rasgos principales, si no en todos. Los organismos vivos (al menos en su forma animal) no se guardan en una estantería entre uso y uso. Por el contrario, los materiales del cuerpo no dejan de circular. Esta circulación, relacionada con el ciclo natural de los sistemas complejos formados en la vecindad de los gradientes, es más o menos continuada desde la concepción hasta la muerte. Cuando el flujo de energía es insuficiente, las formas reductoras de gradientes manifiestan signos sistémicos de estrés, desorganización y, en última instancia, pérdida fatal de función. Hay que decir que, por un breve periodo de tiempo durante el sueño, los mamíferos pierden su homeotermia, la capacidad de regular su temperatura. Esta pérdida de termorregulación se ha interpretado como una especie de retorno nocturno a la fisiología de nuestros ancestros reptilianos. Los reptiles, menos eficientes metabólicamente que los mamíferos, evolucionaron antes. Pero el cerebro mamífero (incluido el neocórtex humano, el responsable de nuestras amplias frentes) está evolutivamente erigido sobre una base reptiliana. Los reptiles no sueñan. Puede que los sueños sean un defecto de diseño fisiológico, breves accesos nocturnos de confusión mental que reflejan la interferencia de un cerebro reptiliano todavía parcialmente activo.

El biólogo molecular belga Olivier Toussaint estudia la termodinámica del estrés y el envejecimiento en los sistemas celulares. Aunque apenas ha superado los cuarenta años de edad, ya ha publicado más de setenta y cinco artículos científicos. Como director de un laboratorio de una pequeña universidad jesuita en Namur, cerca de la frontera franco-belga, lidera un equipo de veinte investigadores en proyectos internacionales e intercontinentales. Olivier, físicamente limitado por padecer distrofia muscular, quizá tenga un interés personal en el flujo de energía y sus efectos sobre las células. En cualquier caso, como Stephen Hawking, su espíritu y su intelecto recorren libremente el paisaje físico y científico. Ha viajado a numerosos encuentros internacionales por todo el mundo, y le encanta conducir por las carreteras de vuelta a Bélgica y Montana, en vehículos acondicionados que lo liberan de las restricciones que le impone su enfermedad.

La investigación de Toussaint se ha centrado en los efectos del estrés sobre el envejecimiento celular. En este libro hemos visto los efectos del estrés sobre ecosistemas y organismos. La obra de Toussaint nos da idea de estos procesos al nivel celular. La mayor parte de su trabajo está relacionado con el estrés químico oxidativo en células cultivadas. Dentro de nuestras células se producen normalmente compuestos de oxígeno reactivos, principalmente durante la respiración celular. Las mitocondrias de la célula se valen del oxígeno para respirar y producir la unidad energética fundamental de la vida, el trifosfato de adenosina, o ATP. Esta molécula contiene un enlace químico rico en energía que abastece a numerosos enzimas implicados en el metabolismo celular. Los enzimas son proteínas con actividad catalítica, lo cual significa que aceleran las reacciones químicas requeridas para que el organismo se mantenga vivo. Estos procesos permiten la síntesis de nuestras proteínas musculares y de los lípidos que constituyen las membranas celulares.

Los subsistemas celulares que nos mantienen dependen del metabolismo del oxígeno. Sin embargo, el oxígeno es un gas altamente reactivo (consumido despacio contribuye al crecimiento de los bosques, pero también alimenta los incendios forestales). La dicotomía entre la combustión «buena» y la «mala» (que ya hemos visto en capítulos anteriores) ocupa un lugar central en el proceso de envejecimiento. No sólo maduramos, sino que también envejecemos. Y lo hacemos no sólo porque nos marchitamos, sino porque nos quemamos. Cuando nuestras células funcionan normalmente, existe un gradiente de protones (H^+ , un átomo de hidrógeno positivamente cargado) a través de los orgánulos celulares consumidores

de oxígeno, que mantiene fuera los iones de calcio y de sodio. Pero cuando estos orgánulos, las mitocondrias, no pueden producir ATP, se ven incapaces de mantener el gradiente. Los iones de calcio y sodio entran en la célula, en un proceso fatal llamado «necrosis celular». También puede ocurrir que el oxígeno reaccione en el lugar equivocado de la cadena de transporte de electrones, formándose superóxidos. Estos compuestos pertenecen a un grupo de moléculas oxigenadas llamadas «radicales libres» (átomos o moléculas con electrones desapareados), que reaccionan indebidamente y malogran la función celular.

Buena parte del deterioro celular asociado al envejecimiento parece deberse a los estragos causados en el ADN por el ataque de los radicales libres. Una razón de que los «antioxidantes» —como las vitaminas C y E— sean buenos para nosotros es que reaccionan con los radicales libres y los neutralizan. El ejercicio incrementa la circulación de los poderosos cazadores de radicales libres del cuerpo, enzimas antioxidantes como la glutatión-peroxidasa, la superóxido-dismutasa y la catalasa. Por otra parte, el ácido láctico, que produce una sensación de quemazón en los músculos extenuados, puede constituir en sí mismo un poderoso antioxidante.¹⁵ No obstante, por la misma función y organización cíclica de la célula, la necrosis puede autorreforzarse. Por ejemplo, los niveles de glutatión, antioxidante intracelular, descienden cuando escasea el ATP. Así pues, la falta de ATP reduce la capacidad de la célula para producir más ATP, que ahora necesita más que nunca. La evolución ha dotado a las células de sistemas antioxidantes que destruyen los radicales libres reactivos, reparan el ADN y neutralizan la mayoría de productos finales tóxicos de las reacciones oxidativas, en una guerra aparentemente implacable de especies químicas. Es como la imagen especular de la autocatálisis. En la salud, y en todas partes, la organización cíclica de la reducción de gradientes proporciona la base termodinámica de lo que a veces se conoce como el «principio de san Mateo»: «Al que tiene, se le dará; y al que no tiene aun lo poco que parece tener, se le quitará». En la salud y en la enfermedad, pequeñas cosas como la decisión de hacer ejercicio pueden amplificarse hasta llegar a tener efectos más que significativos en el bienestar y la longevidad de los organismos.

El concepto de estrés organísmico-celular fue introducido antes de la segunda guerra mundial por el médico húngaro Hans Selye.¹⁶ Tras inyectar una variedad de toxinas en ratas, observó hipertrofia de las glándulas suprarrenales y alteraciones regresivas del timo y los nódulos linfáticos. Selye concluyó que tales síntomas representaban una respuesta

inespecífica a los agentes tóxicos en general. Su investigación sugirió que la reacción inicial al estrés es de choque, como el que producen el calor o frío intensos. A esta sacudida inicial le sigue una fase de adaptación y recuperación que puede derivar gradualmente en una resistencia al estrés. Selye contemplaba el estrés biológico como una respuesta inespecífica del cuerpo a cualquier demanda extra.¹⁷

Hoy el concepto de estrés está implantado en la mayoría de campos de la biología, la medicina, la psicología y hasta las ciencias sociales. Como señalan Toussaint y sus colegas: «Los biólogos celulares y moleculares, trabajen con células humanas, animales o vegetales, están de acuerdo en que cualquier factor medioambiental potencialmente desfavorable para un organismo vivo supone una tensión. También se reconoce de manera general que si se exceden los límites de tolerancia y la capacidad adaptativa se fuerza demasiado, el resultado puede ser un daño permanente o incluso la muerte».¹⁸

Un criterio crucial para el desarrollo biológico es la capacidad de las células y organismos de degradar gradientes energéticos. Toussaint cree que la senescencia de los sistemas biológicos comienza cuando esta capacidad degradativa disminuye, lo que en última instancia lleva a la muerte. De hecho, se ha demostrado experimentalmente que la producción de entropía disminuye con la edad de los organismos, órganos, tejidos o células.¹⁹

El estrés leve y continuado resultante de la producción basal de radicales libres no compromete automáticamente el sistema entero. En situaciones de estrés moderado, los métodos de resistencia pueden prevenir el deterioro celular. Siempre que el estrés no implique una acumulación de modificaciones irreversibles, puede considerarse un ensayo positivo para los sistemas de reparación que estimula. La inmunización y el sistema inmunitario son un ejemplo paradigmático de estrés estimulador de un sistema necesario. Si no se reparan, las alteraciones celulares se hacen irreversibles y se acumulan. Cuando el deterioro supera la operatividad de los mecanismos compensatorios, la célula se transforma y se instala en un nuevo estado estacionario, acompañado de degeneración celular y supresión de actividad bioquímica. Esto es senescencia normal.

El estrés crónico o los episodios repetidos de estrés agudo pueden causar elevadas concentraciones de radicales oxidantes, que son producidos por una inflamación derivada, por ejemplo, de la exposición a humos, tóxicos o radiación. Si el daño causado por estos radicales no se repara, quedará menoscabada la síntesis de ATP y descenderá la actividad bioquímica general y la transformación de energía libre. El envenenamiento oxidativo puede inducir el mecanismo de autodestrucción celular llamado «apoptosis».

Toussaint y sus colegas idearon experimentos en los que se sometía a células humanas a estrés subletal con oxidantes o radiación ultravioleta, y encontraron que, al cabo de varios días de exposición a estos factores estresantes, aparecían muchos rasgos de las células senescentes. Estos cambios incluían morfologías seniles, cambios en la expresión génica y supresiones de material genético.²⁰

El grupo de Toussaint ha descrito procesos moleculares que explican la aparición de lo que llaman «senescencia prematura inducida por estrés». Cuando una célula está sometida a estrés, sensores moleculares detectan los daños y ponen en marcha una cascada de mensajes que, en última instancia, informan a nuestros genes. Se ha descubierto que la estabilidad del estado celular se pierde por el establecimiento de nuevos ciclos reguladores, que empujan al sistema celular a asumir un nuevo comportamiento, en este caso el propio de las células seniles.

¿Hay algún modo de retrasar el proceso de envejecimiento? ¿Hay alguna fuente de juventud? El antes mencionado número de Hayflick parece imponer un límite superior a la capacidad replicativa del ADN y a la longevidad máxima de los organismos. En el futuro quizá sea posible ampliar este límite mediante ingeniería molecular. Sin embargo, incluso con el material genético natural, a menudo los organismos pueden incrementar su longevidad un 50-100 % a base de restricción calórica, ejercicio y erradicación de la enfermedad. Aparte de vivir más tiempo, la calidad y vitalidad de nuestras vidas pueden incrementarse mediante una actividad metabólica aumentada si nos atenemos a ciertas reglas. La primera propuesta consiste en reducir la extensión del deterioro irreversible causado por enfermedades, accidentes, malos hábitos alimentarios, etcétera, hasta niveles que permitan la estimulación de nuestras células y cuerpos (para mantenerlos activos y evitar que sus subsistemas se pierdan) sin superar su capacidad de autorreparación. Selye ya insistió hace tiempo en que el estrés produce cambios muy similares a los ligados al envejecimiento.

Se ha demostrado que la restricción calórica incrementa la longevidad. Para que esta restricción sea efectiva, las calorías de la dieta deben estar bastante por debajo de la cantidad de calorías que suele proporcionar una alimentación ad libitum. Asimismo, no debe conducir a malnutrición o dietas impropias, ni limitar el aporte de nutrientes. La restricción calórica prolonga la longevidad de varias especies, en particular roedores, y disminuye el deterioro del material genético en animales viejos.

Como Bortz, Toussaint sugiere que debemos luchar contra el «síndrome de desuso», que conduce a vulnerabilidad cardiovascular, fragilidad musculoesquelética, obesidad, depresión, etcétera (las enfermedades de la gente sedentaria). Este principio parece ser válido al nivel subcelu-

lar (activaciones enzimáticas, etcétera), al nivel tisular (atrofia muscular y osteoporosis por falta de esfuerzos, prestaciones disminuidas del sistema nervioso central por falta de estímulos) y al nivel organísmico (apatía, obesidad, etcétera). ¡Úsalo o piérdelo!

El sistema termodinámico humano

El escritor de ciencia ficción Philip K. Dick tiene varios cuentos en los que imagina personas criogenizadas que sobreviven a largos viajes espaciales; pero incluso entonces sus cerebros, a veces alimentados con fantasías por los ordenadores de la nave, permanecen mínimamente activos para que el organismo se mantenga vivo. Algunas bacterias son capaces de sobrevivir a temperaturas cercanas al cero absoluto. Los animales como nosotros, sin embargo, integramos muchas más partes. Por ejemplo, si la sangre de un mamífero deja de circular durante demasiado tiempo debido a un colapso cardíaco, el animal muere. Poseemos una variedad de modos metabólicos. Tiritamos y sudamos. Subimos corriendo las escaleras y luego nos tumbamos en la cama para echar una cabezada de bajo metabolismo. Pero no somos máquinas. No podemos desenchufarnos por completo. Una vez más, vemos que la vida tal como la conocemos, y la vivimos, no sólo requiere una codificación estructural en genes y proteínas, sino también el flujo de energía sin el cual no puede funcionar.

Aunque aún no adoptada por la mayoría de médicos o facultades de medicina, el estamento médico está más familiarizado con la perspectiva evolutiva —«medicina darwiniana»— que con las ideas termodinámicas. Victoroff, por ejemplo, señala que ese gran azote conducente a la diabetes, la obesidad (el resultado de comer en exceso), puede atribuirse a la escasez de alimento en el hábitat natural de nuestros antepasados evolutivos.²¹ En el medio ambiente donde evolucionaron nuestros ancestros, la facultad de almacenar energía en forma de grasa corporal habría marcado en ciertos momentos y lugares la diferencia entre la vida y la muerte. Pero hoy día nuestra atracción atávica por los indicadores de fruta madura (dulzor y colores vivos) y nuestro apetito de sal (menos disponible en tierra que en el mar) y de grasa animal (una fuente de carbono de alta energía) son demasiado fáciles de satisfacer. Con la disponibilidad aumentada de alimentos procesados, sus sensaciones gustativas se asocian a colorantes alimentarios. Los cereales multicoloreados imitan las fuentes de vitamina C y glucosa de nuestros ancestros arborícolas y frugívoros (además de diseminadores de semillas). Sin embargo, aunque se suplementen con vitaminas, los alimentos refinados a menudo carecen de

los nutrientes incluidos en el paquete original de la naturaleza (y del contexto de la energía invertida en la caza y la recolección).

La medicina evolutiva interviene en la justificación de Bortz de la importancia del ejercicio, en particular correr y caminar. Como nosotros, nuestros ancestros eran estructuras termodinámicas fluyentes. Pero, a diferencia de nosotros, tenían muchas más oportunidades de correr y sudar hasta la extenuación. De hecho, la explicación más plausible de nuestra carencia de vello corporal en relación con nuestros primos genéticos (chimpancés, gorilas, orangutanes y gibones) es que era un inconveniente para nuestras carreras de resistencia. Los primeros seres humanos, que, millones de años antes de los últimos tres o cuatro milenios de civilización, hacían uso de su inteligencia para seguir la pista de sus presas, sudaban profusamente. La evaporación del sudor refrescaba los cuerpos relativamente lampiños mejor que los velludos, lo que representaba una ventaja (aunque ahora nosotros, cuando hace frío, tengamos que cubrirnos con prendas que sustituyen el pelaje perdido). Bortz subraya que las carreras también contribuían a incrementar el riego sanguíneo cerebral, un posible bucle retroactivo evolutivo entre actividad física e inteligencia. Por meritorias que sean las justificaciones políticas para oponerse a la visión de «tabula rasa» de la naturaleza humana, el determinismo genético estricto, especialmente en el caso humano, no puede ser tomado científicamente en serio. Aquí, y en todas partes, la dicotomización se demuestra más útil para la controversia que para la edificación. Nuestros ancestros estaban genéticamente dotados para pensar, pero su decisión de cazar grandes mamíferos en grupo los hizo aún más inteligentes. Aunque ahora vivimos en un mundo completamente distinto, la decisión de llevar una vida más activa tiene el potencial de devolvernos a la condición física de nuestros ancestros. En el juego de la salud, las cartas genéticas cuentan mucho, pero también cómo jugamos con ellas. Nuestras decisiones sobre la manera de adquirir y utilizar nuestra energía pueden favorecer o comprometer nuestra salud, y prolongar o acortar nuestra vida.

Nada tiene tanto éxito como el exceso.

Oscar Wilde

El criterio de la verdad es que se cumple aunque nadie esté preparado para reconocerla.

Ludwig von Mises

Mercados que siguen gradientes y la pérdida de la verdad

Las pautas de flujo de energía estudiadas por la termodinámica de gradientes pueden aplicarse también a diversas áreas de la economía. Tal vez ésta debería ser reformulada para reflejar nuestra comprensión de los sistemas económicos como sistemas energéticos de no equilibrio. Las economías emanan de las actividades de los organismos, en sí mismos sistemas de no equilibrio. Reconocemos que las economías y las civilizaciones no tienen las propiedades estadísticas, fácilmente mensurables, de los sistemas termodinámicos no vivos, mucho más simples. Sin embargo, puesto que los mercados, las economías, las ciudades y las civilizaciones son sistemas abiertos, deberíamos esperar que manifestasen formas de comportamiento con las que ya estamos familiarizados. En efecto, el simple acto de que un vendedor y un comprador convengan un precio representa más que un acuerdo entre las partes: representa un sistema transaccional que alcanza un equilibrio local. El dinero, como la energía, fluye. Antes hemos visto que los flujos de carbono son convertibles en flujos de energía ecosistémicos. Para ello, Ulanowicz y otros¹ tomaron prestado el método de cálculo del Premio Nobel de economía Wassily Leontief, cuyos estudios del flujo del dinero a través de los sistemas económicos inspiraron cálculos como el del producto nacional bruto (PNB). Si el procesamiento energético total en un ecosistema es similar al PNB de una economía nacional, entonces una economía impulsada por el dinero es similar a un ecosistema impulsado por la energía. Los flujos económicos también tienen sus equivalentes de producción de entropía, como las cuotas y los impuestos sobre las transacciones. Estos gastos generales a menudo añaden poco valor al producto o las unidades de energía transferidas, pero tienden a nivelar las transacciones.

Y el dinero tiene sus equivalentes energéticos. En el año 2005, el equivalente energético del petróleo crudo a 0,31 dólares por litro era

de 27.700 kilocalorías por dólar. El dinero circula de manera cíclica, lo cual se parece mucho a la circulación de la energía en los ecosistemas. No obstante, mientras que en los ecosistemas la energía y la materia fluyen en la misma dirección, en los sistemas económicos el dinero y la energía circulan en sentidos opuestos: el dinero se intercambia por energía, bienes y trabajo. Hoy día se pagan cientos de trillones de dólares por la energía: China, Estados Unidos y Europa importan petróleo y gas, en tanto que los dólares fluyen hacia los países exportadores. El dinero, intercambiable por energía, trabajo y productos, se comporta como la energía que cambia de forma mientras organiza los flujos a través de los sistemas naturales no humanos.

Así como, en la ecología, los organismos capaces de obtener más recursos para su crecimiento y mantenimiento tienden a prosperar, así también los beneficios económicos tienden a ir a parar a aquellos operadores más capaces de acaparar materiales y recursos para mantener o expandir sus propias operaciones. El dicho «dinero hace dinero» no es sólo un axioma del capitalismo, sino también un reflejo de los procesos de crecimiento típicos de los sistemas de no equilibrio. Estos sistemas incrementan su diferenciación y complejidad en relación con el mundo exterior a base de canalizar recursos para su propia expansión, explotando y a veces agotando los gradientes que generan flujos de energía. Además, puesto que los seres humanos somos los primeros manipuladores de símbolos conocidos, el equivalente económico de la biomasa o la energía metabólica —el dinero— puede hacerse a base de reducir sistemáticamente los diferenciales de precio «meramente simbólicos». En las finanzas esto se conoce como «arbitraje», que el diccionario define como «la compra y venta simultánea de un mismo título o equivalente para sacar partido de diferencias de precio». Al vender en un sitio y comprar en otro, el arbitraje reduce las diferencias de precio, expandiendo el flujo e incrementando el negocio. Podemos ir más lejos y sostener que las transacciones de materiales y energía entre individuos actúan como un mecanismo vinculador que los cohesionan y les permite competir a niveles que serían prohibitivos en solitario. Así pues, el incremento del comercio rentable, como la expansión de los flujos materiales en los sistemas de no equilibrio no humanos, puede entenderse como un motor de la organización creciente y la emergencia de «individualidad» a escalas mayores y más abarcadoras.

Esto no significa que los mercados se dirijan en línea recta hacia el equilibrio. Si lo demás no cambia, el reconocimiento de diferenciales aprovechables en el mercado global enriquece a los que actúan según su conocimiento probabilístico, creando nuevas disparidades que excluyen

cualquier equilibrio (o «eficiencia» de mercado) simple o duradero entre mercados globales interconectados. Esto parece obvio siempre que tengamos en mente que los mercados y las economías no son sistemas cerrados, ni siquiera dentro de la esfera global humana, sino que dependen en última instancia del recurso «no renovable» definitivo, el sol. Los mercados, como los organismos, dependen de fuentes externas para sus actividades de mantenimiento de su complejidad y reducción de gradientes. Las economías, como los ecosistemas, se expanden a través de la riqueza natural de los gradientes que las rodean, y prosperan según su capacidad de adquirir mecanismos, conscientes o no, para degradarlos. Éste puede ser un proceso asintótico, pero ni mucho menos cerrado o mecánicamente predecible. Las innovaciones en el mercado, como la evolución de nuevos organismos capaces de utilizar recursos viejos de maneras nuevas, o de encontrar recursos explotables completamente nuevos, aseguran que la única economía enteramente estable (como el único ecosistema enteramente estable) no sería en absoluto una economía. Las economías y los mercados, como los organismos y los ecosistemas, son sistemas metaestables de no equilibrio.

El financiero George Soros, discípulo del filósofo australiano Karl Popper, ha ganado miles de millones de dólares a base de capitalizar, como él lo describe, las diferencias entre realidad y percepción, así como la tendencia de esta última, una vez formada, a acelerarse por su propio impulso. Como señala él mismo:

«Vivimos en el mismo universo que estamos intentando comprender, y nuestras percepciones pueden influir en los sucesos de los que somos partícipes. Si nuestros pensamientos pertenecieran a un universo y su tema a otro, la verdad podría estar dentro de nuestro alcance. Esto puede valer para la ciencia natural, pero en los asuntos sociales y políticos las percepciones de los participantes contribuyen a la determinación de la realidad. En estas situaciones, los hechos no necesariamente constituyen criterios fiables para juzgar la verdad de los enunciados. Hay una conexión de dos sentidos —un mecanismo retroactivo— entre pensamiento y hechos [...]. Uno de los logros de Popper fue demostrar que una teoría como el marxismo no tiene la categoría de ciencia. En el caso del *laissez-faire*, la pretensión científica es más difícil de cuestionar, porque se basa en la teoría económica, y la economía es la más reputada de las ciencias sociales. No se puede equiparar así como así la economía de mercado con la economía marxista. Pero, afirmo, la ideología del *laissez-faire* representa la misma perversión de verdades supuestamente científicas que el

marxismo-leninismo. El principal fundamento científico de la ideología del *laissez-faire* es la teoría de que los mercados libremente competitivos equilibran la oferta y la demanda y aseguran la distribución óptima de los recursos. Esto se acepta ampliamente como una verdad eterna, y en cierto sentido lo es [...]. Pero [...], tal como se formuló originalmente, la teoría de la competencia perfecta, del equilibrio natural de la oferta y la demanda, asumía un conocimiento perfecto, productos homogéneos y fácilmente divisibles, y un número de participantes lo bastante grande para que ningún individuo solo pudiera influir en el precio de mercado. La premisa de conocimiento perfecto se demostró insostenible, así que se substituyó por un ingenioso artificio. La oferta y la demanda se consideraron independientes [...]. Esta condición de independencia no es conciliable con la realidad, al menos en lo que concierne a los mercados financieros (y éstos tienen un papel crucial en la distribución de los recursos). En los mercados financieros, compradores y vendedores quieren descartar un futuro que dependa de sus propias decisiones. La forma de las curvas de la oferta y la demanda no puede darse por sentada, porque ambas incorporan expectativas sobre hechos conformados por esas mismas expectativas. Hay un mecanismo retroactivo de dos sentidos entre el pensamiento de los participantes en el mercado y la situación en la que piensan. Esta “reflexividad” explica tanto la comprensión imperfecta de los participantes (el reconocimiento de cuál es la base del concepto de la sociedad abierta) como la indeterminación del proceso en el que participan. Si las curvas de la oferta y la demanda no son independientes, ¿cómo se determinan los precios de mercado? Si observamos el comportamiento de los mercados financieros, lo que vemos es que, en vez de tender al equilibrio, los precios continúan fluctuando en relación con las expectativas de compradores y vendedores. Durante largos periodos, los precios se apartan de cualquier equilibrio teórico, y aunque al final muestren una tendencia a volver, el equilibrio no es el que se habría alcanzado sin el periodo intermedio. Pero el concepto de equilibrio resiste».²

Soros, quien se ha hecho rico aplicando su teoría (que se basa en identificar separaciones entre realidad y percepción y sacar partido de su acuerdo), habla de «reflexividad», y señala que las teorías económicas no son independientes, sino que interaccionan de manera retroactiva con la realidad económica. Así pues, su propia teoría está inmersa en el proceso de relativismo económico que él mismo describe. No obstante, su distinción de la naturaleza reflexiva de los mercados y su negación de un equi-

librio simple suenan bien. Por ejemplo, en los mercados líquidos (indicativo de flujo) los cambios de un día para otro en la oferta y la demanda (como los provocados por las noticias) pueden causar «huecos» o «ventanas» en los gráficos que emplean los negociantes para indicar cambios o continuaciones en las tendencias de los precios. Si el comercio reduce los gradientes de oferta-demanda, el arbitraje reduce los gradientes de precios; y el dinero ganado con ambos tiende a incrementar el flujo de bienes entre los nodos de sistemas cada vez más interconectados. Puesto que el comercio requiere reconocer la oferta y la demanda, así como los diferenciales de precio en puntos dispares, estas prácticas económicas seleccionan formas de transporte y comunicación cada vez más sofisticadas (la raíz del nexo electrónico que Marshall McLuhan llamó «la aldea global» allá por los años sesenta). Los medios de comunicación, al permitir el reconocimiento y rectificación de los gradientes de oferta-demanda, están integralmente implicados en el crecimiento de la economía global.

Pero un siglo antes de McLuhan, en la década de 1860, la estrecha relación entre comercio y conexión social ya fue apreciada por un contemporáneo de Darwin, el novelista y teórico de la evolución de las máquinas Samuel Butler:

«[Llegará un día] en que todos los hombres de todos los lugares, sin pérdida de tiempo, serán conocedores a través de sus sentidos de todo lo que desean saber de los otros lugares, a un coste bajo, de manera que el colono de un país remoto podrá estar al tanto de la venta de su lana en Londres y tratar con el comprador en persona; podrá estar sentado en una silla dentro de su choza mientras escucha la representación de *Israel en Egipto* en el Exeter Hall; podrá probar un helado en el Rakaia [un río neozelandés], que pagará y recibirá en el teatro de la ópera italiano [...] [Es] la gran aniquilación de tiempo y lugar por la que todos estamos esforzándonos, y que en una pequeña parte se nos ha permitido ver realizada en la actualidad».³

A través de la historia de la economía (la palabra deriva de los términos griegos que significan «casa» y «medida»), la «gran aniquilación» espaciotemporal de Butler ha ido avanzando. A medida que las sociedades se hacían más elaboradas, el trueque se reemplazó por el dinero o sus equivalentes (conchas en algunos pueblos isleños, ganado en África, arroz entre los japoneses del siglo XIII) a modo de denominador común físico, cuyo principal efecto práctico fue facilitar un flujo de bienes incrementado tanto interior como entre sociedades. (El equivalente químico intracelular del dinero es el ATP, un compuesto endergónico, o almace-

nador de energía, que puede gastarse exergónicamente mediante la liberación de su energía. Como hemos discutido en el capítulo sobre el origen de la vida, Freeman Dyson y otros que defienden una visión metabólica antes que genética de la vida sugieren que el ATP vino antes que el ARN y el ADN.)

El trueque parece un ejemplo humano de un proceso natural, el intercambio de bienes entre agentes que incrementa la conectividad y el reciclado en sistemas cada vez más diferenciados. Puesto que las células y los organismos son sistemas abiertos fuera de equilibrio, sus comportamientos se «seleccionarán» siempre que contribuyan a organizar sistemas reductores de gradientes mayores y más eficientes. Como muchos organismos, los seres humanos son agentes sensitivos y móviles, pero no necesariamente racionales. Y como sus primos naturales, los ecosistemas, las economías se expanden y organizan en respuesta a demandas energéticas. El flujo de energía a través de sistemas complejos constituye la base de la obtención y el reciclado de materiales en las economías, que reducen gradientes naturales (como el gradiente de potencial redox entre combustibles fósiles y oxígeno) y «sintéticos» (como los diferenciales de precios). Como hemos visto al principio, la destrucción de un gradiente para liberar su energía potencial requiere una energía de activación, E_a , de ahí que ganar dinero requiera dinero, al igual que la obtención de energía metabólica requiere la combustión catabólica del alimento. Así como los ecosistemas exuberantes reflejan tasas aumentadas de reducción de gradientes, así también la prosperidad de una economía boyante puede atribuirse a la expansión de los flujos de energía, o del dinero, las acciones y otros instrumentos que los representan temporalmente. Hay controversia sobre si los bancos centrales, al incrementar el dinero disponible para proporcionar estímulo económico (en esencia, a base de imprimir dinero; por ejemplo, rebajando los tipos de interés), pueden producir riqueza real,⁴ o acaban suscitando secuelas negativas. De acuerdo con esta segunda tesis, defendida por una escuela económica austriaca asociada a Von Mises,⁵ la expansión monetaria inevitablemente conduce a la quiebra, la recesión o la depresión económica, porque la política de facilitar el crédito de los bancos centrales instaura una ilusión de riqueza que tarde o temprano se ajusta a la realidad de penuria económica. La inflación es un ejemplo de este ajuste cuando la riqueza creada a través de títulos ya no es capaz de comprar lo que se desea (como la inversión en un negocio) más de lo que lo era la sofocante carencia de dinero precedente. En esta visión, el valor de fortunas en forma de acciones de bolsa y otros títulos será ajustado finalmente a la baja por las fuerzas del mercado. En última instancia, el incremento de símbolos de valor del estilo de accio-

nes, papel moneda o créditos expandidos puede destruir la confianza, ya que la deuda simbólica o los instrumentos de comercio no tienen un límite natural, mientras que la demanda que se supone que satisfacen no es imaginaria. En el límite, la creación de deuda puede causar quiebras de la bolsa, bancarrotas y devaluación de la moneda nacional. Sin embargo, es un acto de fe que de común acuerdo crea dinero y crédito en primera instancia, y sin el «espejismo» de un medio de intercambio común las economías tal como las conocemos apenas podrían existir.

Históricamente, los mercados surgen a lo largo de rutas comerciales y se concentran en las ciudades, incrementando el flujo de materiales entre seres humanos, cuya organización se hace más eficiente cuando se diferencian en tareas y profesiones especializadas. No obstante, ni las ciudades ni el intercambio (los procesos fundamentales que reducen un gradiente de oferta-demanda) son objeto de tratamiento explícito por parte de la teoría económica tradicional. La economía ortodoxa asume que una economía es un sistema eficiente y en equilibrio estabilizado por actores racionales. Pero ni los agentes de los sistemas económicos son especialmente racionales (considérese la codicia y el miedo de las subidas y bajadas de la bolsa) ni las economías, que se alimentan de reservas externas de alimento y combustible, están en un equilibrio genuino. A pesar de las matemáticas que pretenden describirlas, las economías no son sistemas estables, sino sistemas disipativos metaestables. Como los organismos y los ecosistemas, tienden a crecer y encontrar maneras de explotar gradientes para reducir su entropía y reciclar materiales.

Según el economista C. Dyke:

«Podría parecer que lo más juicioso sería tratar los sistemas económicos como si fueran meros *análogos* de las estructuras disipativas normalmente consideradas en la literatura de la TNE. Pero no creo que esto sea correcto [...]. El principal criterio de las estructuras disipativas es su dependencia temporal. Este criterio ciertamente debe cumplirse. Resulta bastante evidente que los sistemas económicos lo cumplen; pero hemos de procurar ver claramente *cómo* lo cumplen. Porque buena parte de la teoría económica clásica, neoclásica y ortodoxa hace uso de técnicas que rebajan u oscurecen la dependencia temporal esencial de los procesos económicos. En particular, los análisis de equilibrio tratan los procesos de intercambio económico como si fueran reversibles. Éste es el meollo de la teoría de precios ortodoxa y su sistema de contabilidad. Sin embargo, en otro sentido, to-

davía dentro de la teoría ortodoxa, los procesos de intercambio *no pueden* ser reversibles. La vía hacia el cierre de una negociación no puede ser recorrida por negociantes racionales. En cualquier caso, es una ilusión pensar que la economía ortodoxa trata del comercio. En ninguna parte se examina el proceso de intercambio comercial. Sólo se examinan las consecuencias lógicas de una serie de asunciones, como que el sistema de negociación sólo incluye hombres económicamente racionales [...]. Lo que hace la *TNE* es mostrarnos que hay interrelaciones entre nuestras estructuras sociales y el flujo material requerido para sustentarlas [...]; nos dice que la deuda entrópica en la que incurre nuestra elaborada organización puede pagarse de varias maneras; que el contenido de información de nuestro sistema social está necesariamente conectado con el flujo material requerido para su mantenimiento. Por ejemplo, sólo para fijar ideas, la línea estándar (desde Hume) sostiene que los sistemas económicos se caracterizan por una escasez moderada. Pero la escasez no es la condición primaria de una economía. Las economías descansan sobre gradientes. Dependen de encontrar maneras de mantener el flujo material adecuado. A veces esto es reconocido por los propios economistas [...]. Pero es más frecuente que la necesidad de los gradientes no se reconozca».⁶

En un comentario sobre Janet Jacobs,⁷ quien identificó el papel central de las ciudades en la economía, Dyke apunta que

«a pesar del énfasis bifurcado en individuos y naciones en cuanto que constituyentes importantes de los sistemas económicos (en micro- y macroeconomía, respectivamente), los componentes estructurales dominantes de la vida económica son las ciudades, que son centros de reemplazo de importaciones y sus regiones asociadas. Jacobs no ofrece una descripción general del surgimiento de tales ciudades. Quizá no la haya. Pero, una vez establecidas, organizan una economía que prospera a un plazo significativamente largo. Estas ciudades deben contrastarse con otras que *no* organizan economías viables. La vida económica en estas últimas y alrededor de ellas es muy diferente de la vida económica en torno a las ciudades favorecidas. Pues bien, nadie que esté familiarizado con la *TNE* y lea el libro de Jacobs puede dejar de advertir la semejanza de estas ciudades favorecidas con estructuras disipativas. La ausencia de una descripción general de su génesis es en sí misma indicativa del fracaso de los modelos causales lineales para explicarlas».⁸

La asunción de que los sistemas económicos humanos están esencialmente en equilibrio queda invalidada por la constatación de que la principal fuente de nuestra riqueza es el Sol, cuya energía se almacena en la fotosíntesis que llevan a cabo, por ejemplo, las plantas cultivadas, las cuales proporcionan el recurso básico original para la explosión demográfica humana. Como otros sistemas termodinámicos que hemos analizado, los sistemas económicos humanos son abiertos. No están aislados, como suele asumir la teoría, sino que se alimentan de los gradientes que explotan. Vernadsky, enfatizando el carácter energético de la biosfera, habló de un sistema terrestre-solar y remitió el movimiento natural de los organismos (en el cual incluía no sólo las migraciones de las aves, sino también los flujos globales humanamente asistidos de productos y máquinas, debido, quizás, a la impresión que le causó el movimiento global de material bélico durante la primera guerra mundial) a la energía solar biológicamente transformada en la superficie terrestre. Los preludios ecológicos de las alzas y bajas económicas incluyen las extinciones en masa asociadas a impactos de meteoritos. Las «quiebras» arcaicas podrían haber venido dadas por causas particulares, como el agotamiento de las fuentes apropiadas de alimento hidrocarbonado para la fermentación heterotrófica bacteriana, o del hidrógeno y el sulfuro de hidrógeno del que dependían las bacterias fotosintéticas primigenias. Pero, puesto que la vida era un sistema termodinámico en evolución, siempre había variantes mutantes en la recámara que podían hacer un uso mejor de la energía solar y otros recursos energéticos. La conversión de la energía solar en formas de vida activa, células y grupos de células concentraba, en la expresión inexacta pero evocadora de Vernadsky, la «presión de la vida»: los organismos no sólo competían por los recursos, sino también por imponerse dentro de un dominio de materiales limitados pero de energía virtualmente inagotable. La máxima de Harold Morowitz, «la energía fluye, la materia se recicla», se aplica también a los problemas especiales de la vida económica.

Del mismo modo que la prosperidad económica va seguida de la quiebra, la mayor invención metabólica en la historia de la vida, esto es, el uso de agua como fuente de hidrógeno por los ancestros fotosintéticos de las plantas, condujo a la peor «depresión» que ha contemplado nuestro planeta. La descomposición del agua (H_2O) asistida por energía lumínica para obtener hidrógeno producía oxígeno libre como producto secundario, lo que elevó los niveles de oxígeno gaseoso en el aire de virtualmente nada a una quinta parte de la atmósfera. El oxígeno es un gas reactivo que destruía muchas de las bacterias verdes que lo producían, lo cual otorgaba ventaja a los organismos que lo toleraban. Las bacterias verdes que crea-

ron la amenaza sobrevivieron transformadas en los plástidos (las partes coloreadas de verde, y a veces púrpura) de algas y plantas. Las bacterias que neutralizaban el oxígeno empleándolo para su respiración también se propagaron como el fuego, y se convirtieron en las mitocondrias citoplasmáticas de animales, plantas, hongos y algas. La prosperidad y la depresión a escala global antecedieron a la humanidad, con crisis de contaminación y extinción en masa como secuelas de la producción de entropía que envenenó a los organismos reductores de gradientes. Como sugiere Dyke, las similitudes entre las economías y los sistemas termodinámicos de no equilibrio parecen ser estructurales y formales, no meras analogías. Las economías, a pesar de su dependencia de agentes humanos, *son* sistemas TNE. Los sistemas ecológicos y económicos comparten la necesidad de sumideros además de fuentes. Con eficiencias variables, convierten el excedente energético en organizaciones complejas, cohesionando los organismos en redes de orden superior con metabolismos y problemas de eliminación de desechos a gran escala. (También son innovadores y, como los organismos, pueden encontrar nuevas fuentes de energía para reciclar productos de desecho entrópico en estructuras funcionales.)

«La basura, el hollín y las aguas residuales parecen un molesto e inconveniente subproducto de nuestras vidas y actividades más que una consecuencia necesaria de ellas. Pero sin un gradiente por el que pueda caer el flujo material, ninguna estructura disipativa puede mantenerse estable.»⁹ Ahora bien, lejos de promover una producción de desechos sin freno, Dyke afirma que para mantener nuestra existencia económica debemos reconocer que «nuestra existencia como estructuras disipativas define un espacio de posibilidades para nosotros, y lo hace de manera bastante estricta». Nuestros ancestros humanos, que eran mucho menos numerosos antes de las innovaciones de la agricultura, tendían a ser nómadas que no se preocupaban por la destrucción de su entorno, porque se trasladaban a otro campamento. Con la presente densidad de población, ya no podemos permitirnos este lujo, lo que nos obliga, insinúa Dyke, a integrar los problemas inevitables derivados de la producción de entropía en nuestros cálculos de la riqueza económica. Aquí vale la pena señalar que todo incentivo político o gubernamental dirigido a la industria del petróleo actúa como un control estatal centralizado que interfiere con las fuerzas del mercado, las cuales, en su ausencia, tenderían a promover recursos relativamente renovables como la energía solar y el viento, menos dañinos para el medio ambiente, así como las células de hidrógeno y otras tecnologías que reflejan mejor las «biotecnologías naturales» de la Tierra.¹⁰ En resumen, el consumo de recursos en la economía estándar parece diferente del que se produciría en una economía basada en la TNE, que ten-

dría en cuenta de manera explícita tanto la naturaleza no equilibrada de la economía como la relativa estabilidad de algunos recursos básicos y gradientes respecto de otros.

Aunque la economía ortodoxa a menudo las mete en el mismo saco, hay una diferencia entre las entidades estables que surgen para reducir gradualmente un flujo asociado a un gradiente, aprovechándose de su trabajo, y aquellas que canalizan el excedente y los beneficios para perpetuar su expansión. El comercio promotor de organización distribuye materiales y energía, incluida la energía humana, dentro de una economía.

Los mercados comienzan siguiendo gradientes e intercambios, pero también pueden dedicar parte de sus beneficios al incremento de su propia organización, adquiriendo sistemas de crédito, construyendo centros y desviando sus recursos hacia dentro para impulsar el desarrollo económico y, finalmente, producir las bases económicas de civilizaciones y culturas. Si bien las estructuras disipativas económicas pueden surgir más o menos espontáneamente, las economías genuinas incorporan decisiones, reglas y control manipulativo centralizado. Una lonja del viejo oeste norteamericano es un ejemplo de centro de intercambio, aunque todavía no es un mercado. Las vías promotoras de flujos no necesariamente se convierten en mercados, ni todos los mercados se convierten necesariamente en economías plenamente desarrolladas. El hecho de que una puerta de acceso a un gradiente aprovechable no llegue a convertirse en mercado se parece al caso de una pradera que no completa la sucesión hacia un bosque. Debe haber materiales y organización suficientes para canalizar el excedente energético hacia formas más complejas. Por ejemplo, algunos ecosistemas y mercados están claramente constreñidos por la falta de efectivos suficientes para establecer conexiones o por condiciones extremas, como el frío glacial.

El desarrollo abortado de sistemas económicos nacientes puede compararse con las muchas estructuras disipativas que no llegan a convertirse en sistemas coherentes duraderos. La ciudad de un solo producto, como es el caso de las poblaciones mineras, es vulnerable en el mismo sentido en que lo son las especies superespecializadas. Una ciudad o una especie que se consagra con demasiada rigidez a una sola función es vulnerable a los cambios del mercado o del entorno. Algunos pueblos fantasma, por ejemplo, fueron en otro tiempo localidades principalmente mineras, y cuando ya no fueron capaces de producir su recurso (aunque fuera en gran medida un «símbolo», como el oro) pagaron su deuda entrópica. La superespecialización en el combustible hidrocarbonado, mucho menos «sim-

bólico» para la marcha del sistema TNE global, puede tener en retrospectiva efectos «fantasmagóricos» similares.

Como los otros sistemas TNE que hemos examinado (células de Bénard, reacciones BZ, vórtices de Taylor, sistemas prebiológicos, organismos y ecosistemas), la economía es un sistema organizado por flujos de energía. Una economía genuinamente termodinámica reconocería que las economías están estabilizadas, en la medida en que son estables, fuera del equilibrio por flujos materiales y energéticos. Esta economía precisaría de un sistema de contabilidad modificado que incluyera los requerimientos de flujo urbano. Como sugiere Dyke: «Dentro de la economía estándar, todas las decisiones son enmarcables como decisiones de coste/beneficio. Los costes y beneficios se proyectan como asignaciones de recursos, incluyendo la asignación de nuestro propio tiempo y energía, todo dentro del marco de eficiencia “equilibrada”. Salvo en las formas más superficiales, *nunca* examinamos las relaciones entre nuestras pautas de organización social y el flujo material necesario para sustentarlas».¹¹

El más conocido intento académico, en tiempos recientes, de romper con la economía ortodoxa partió de Nicholas Georgescu-Roegen, cuyas ideas fueron abrazadas —quizá demasiado— por el movimiento ecologista de la primera época. Un detallado texto disponible en Internet y compilado por la New School en Nueva York,¹² describe a Georgescu-Roegen como «uno de los pensadores más notables y profundos de la economía moderna, y uno de los pocos cuya reputación e influencia, a pesar de su relativa desatención en vida, no han hecho más que aumentar con el tiempo y prometen seguir aumentando».

Formado en estadística matemática en Bucarest y la Sorbona, Georgescu-Roegen se doctoró a los veinticuatro años. «En la década de los treinta pasó tres años en Harvard, donde aprendió economía con Joseph Schumpeter, y enseguida dejó su sello en este nuevo campo con unos cuantos artículos sobresalientes sobre teoría de productores y consumidores (1935, 1936) [y] proposiciones sobre elección estocástica y preferencias lexicográficas.»¹³ De vuelta a Bucarest, Georgescu-Roegen se puso al servicio del gobierno rumano e intervino en la negociación con la Unión Soviética tras la guerra. Luego abandonó la Rumanía comunista en 1948, «escondiéndose con su mujer dentro de barriles a bordo de un buque de carga con destino a Estambul».¹⁴ Consiguió un empleo en la Universidad de Vanderbilt, en Tennessee, donde hizo contribuciones a

«la programación lineal y la teoría general del equilibrio [...], incluyendo el descubrimiento independiente de las condiciones de Hawkins-Simon, una demostración de existencia alternativa para el sistema de Von Neumann, las leyes generales de sustituibilidad para los sistemas de Leontief y [contribuciones a] la teoría marxista de la crisis (1960) [...]. En 1966, Georgescu-Roegen lanzó torpedos críticos [a la teoría económica ortodoxa], contenidos en la lúcida y erudita introducción a su *Analytical Economics* (1966). Aquí expuso sus ideas iniciales sobre un nuevo enfoque biológico o evolutivo de la teoría económica, que desarrolló y consolidó en su obra magna, *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). La tesis de Georgescu-Roegen, entre otras, era que toda economía está sujeta a límites de crecimiento, para lo cual invocaba la segunda ley de la termodinámica (“la energía útil se disipa”). Aunque generalmente ignorado por la corriente principal de la economía, fue encumbrado por el incipiente movimiento ambientalista y, hasta el final de su vida, nunca dejó de hablar de sus ideas para un nuevo enfoque de la teoría económica. Hoy su obra está ganando influencia, y sus intuiciones se están implantando en el nuevo campo de la economía evolutiva».¹⁵

En buena medida, los economistas clásicos y Marx basaron sus teorías en una concepción de la economía como un proceso circular de producción y consumo. Georgescu-Roegen discrepaba acaloradamente:

«[N]inguna otra concepción podría estar más lejos de la interpretación correcta de los hechos. No hay más que tomar en consideración el aspecto físico del proceso económico para ver que este proceso no es circular, sino *unidireccional*. En lo que concierne únicamente a este aspecto físico, el proceso económico consiste en una transformación continua de baja entropía en alta entropía, esto es, en *desechos irre recuperables* o, empleando un término más tópico, *polución*».¹⁶

La asunción del flujo circular equivale a la asunción de que los recursos son inagotables, lo cual constituye una clara violación de la segunda ley. No obstante, la razón por la que apuntamos que las ideas de Georgescu-Roegen quizá se hayan tomado demasiado a pecho es que a finales de los años setenta, en el punto álgido de la crisis energética, apareció un libro titulado *Entropy* (1980), escrito por Jeremy Rifkin, que incluía una entrevista con el Premio Nobel de economía. Por desgracia, el libro predecía ingenuamente, sobre la base de la segunda ley, un inevitable agotamiento de los recursos energéticos. Si bien la noción de no

renovabilidad es clave para el movimiento ecologista (debería hacer que nuestros gobiernos pusiesen freno a su afán acaparador, su estrecho enriquecimiento a base de explotar gradientes, y hacer caso a la voluntad popular de dedicar más dinero a alternativas como la energía eólica en las dos Dakotas o el hidrógeno de los viajes espaciales), la destrucción dictada por la segunda ley también es, como hemos visto, una fuerza creativa. El ímpetu de Georgescu-Roegen contribuyó a abrir las puertas a un necesario enfoque termodinámico. Sin embargo, aunque la segunda ley asegure la polución, no excluye nuevas formas de desarrollo o incluso (como descubrieron las bacterias en sus arcaicas economías metabólicas) el reciclado completo de los desechos. La menguante energía de nuestra economía basada en el petróleo puede estar a punto de dejar tirado lo que queda de civilización en medio de la carretera de lo que pasa por progreso. Pero otras fuentes de energía (eólica, solar o química) esperan a los organismos, humanos o no, lo bastante inteligentes para hacer uso de ellas. Una visión de recursos limitados es un paliativo necesario para la teoría económica ortodoxa, pero debe entenderse en el contexto más amplio de los mercados y economías fuera de equilibrio que encuentran nuevas maneras de desarrollarse, de manera esencialmente natural, a caballo de gradientes. Una ironía de las predicciones pesimistas de los años setenta es que la escasez de recursos, lejos de hacer subir indefinidamente los precios de los minerales y la energía, propició nuevas técnicas de extracción que rebajaron los precios de muchas mercancías. Heinz D. Kurz y Neri Salvadori,¹⁷ de la Universidad de Graz y la Universidad de Pisa respectivamente, argumentan que, a pesar de que las asunciones circulares de la teoría económica clásica o neoclásica tienen importantes ventajas, en última instancia deben acomodar la visión termodinámica de una producción unidireccional en un mundo de recursos agotables.

El pensamiento termodinámico en economía tiene aplicaciones prácticas además de teóricas. El financiero internacional George Soros, como Günter Wächtershäuser, fue espoleado por Karl Popper. Como ya se ha mencionado, Soros sostiene, sobre la base de su propia noción de no equilibrio, que los mercados siempre reaccionan de manera descompensada, porque las creencias se perpetúan y persisten más allá de la realidad. Su hazaña más notoria fue cortocircuitar el Banco de Inglaterra en un sistema de libre mercado, cuando el gobierno estaba intentando mantener el precio de su moneda a base de fabricar demanda. El crédito puede ampliarse indefinidamente, pero se ajusta a las fuentes de riqueza subyacentes de base energética. Soros, operando en los intersticios entre ma-

croeconomías presuntamente racionales, se alimenta de la desconexión entre percepción y realidad (que también podría considerarse un gradiente) y se beneficia de la pérdida asociada a la expectativa injustificada. Los negociantes saben que los mercados son esperablemente emocionales y tienden a perpetuar sus direcciones.

Si un excedente de energía y sus símbolos parecen seleccionar medios cada vez más sofisticados de hacer dinero, así como unos medios de comunicación y reacción cada vez más rápidos para ponerlos en práctica, lo opuesto, una suerte de atrofia financiera y el descenso a culturas más simples, o, al menos, organizaciones termodinámicas más primitivas, es el resultado natural de la merma de recursos y la tensión social.

El historiador de la cultura Howard Bloom identifica un efecto Savonarola, llamado así por el santo del mismo nombre, cuyo ascenso al poder clerical coincidió con la privación material y el anhelo de la otra vida.¹⁸ Cuando soportan la carga de un flujo energético disminuido, las ciudades pueden revertir a modos más primitivos y autoritarios con una redistribución de los recursos más jerárquica y menos equitativa. No importa especialmente si los principios ideológicos que organizan políticamente las comunidades son verdaderos, y menos bajo los reinados del terror que se organizan tras la estela de la privación. La regresión puede ser similar a la de un ecosistema sometido a estrés medioambiental, como ya hemos visto. Por otro lado, cuando los recursos de una sociedad retornan, o se establecen nuevas rutas comerciales de seguimiento de gradientes, como la que benefició a Italia durante el Renacimiento, la relativa abundancia permite una mayor libertad individual. La especulación de Bloom describe la miseria, la tendencia al totalitarismo y la ignorancia de las comunidades humanas materialmente desfavorecidas. Predispuestos a impulsos organizativos arcaicos, la religión y la irracionalidad, los sistemas humanos, como sus contrapartidas TNE no humanas, revierten a patrones de organización previos. Un ejemplo fisiológico de este fenómeno termodinámico ocurre cuando, durante el ejercicio físico intenso, se pasa de la respiración aeróbica a la fermentación. Esta última es un modo metabólico más ancestral que la respiración aeróbica, anterior a la contaminación de la atmósfera primitiva por el oxígeno. Aunque menos eficiente, el cuerpo revierte a la fermentación en condiciones de anoxia muscular. Puede que la transición a modos energéticos más antiguos bajo tensión sea un rasgo universal de los sistemas TNE complejos.

El comportamiento termodinámico de ciudades y mercados desmiente la interpretación darwinista ortodoxa según la cual la selección natural sólo actúa sobre el «individuo», o esa parte divisible del individuo (que literalmente significa «no dividido») que es el gen. Hasta las

bacterias manifiestan conductas de mercado incipientes, juntando sus genes, metabolitos y otros recursos para llevar a cabo actividades y construir estructuras imposibles para una célula sola. Las biopelículas van desde los tapetes microbianos hasta «ciudades» rocosas redondas llamadas «estromatolitos», los más antiguos de los cuales tienen miles de millones de años. Las bacterias evolucionaron por simbiosis hacia nuestros ancestros, las células nucleadas, al principio asexuales y luego atrapadas en ciclos de reproducción sexual. Estas células nucleadas dieron lugar a algas y mohos mucilaginosos, la fase agregada de amebas que la mayor parte del tiempo se alimentan por separado. Las bacterias que aunaron sus genes para formar células nucleadas evolucionaron a su vez hacia los ancestros de los hongos, los recicladores del bosque, las plantas y los animales. A otro nivel de consolidación de «individuos» en grupos con economías de escala, los animales dieron lugar a colmenas de abejas, manadas de lobos, bandadas de aves, ejércitos de hormigas, termiteros y seres humanos con economías globales. La teoría evolutiva estándar es correcta. Sí, los individuos varían y a unos les va mejor que a otros. Pero la superpoblación (testimonio de su éxito) propicia nuevas eficiencias a partir de poblaciones densas, que ocasionalmente emergen como individualidades a nuevos niveles de organización. Variando, el individuo puede convertirse en una parte especializada de una entidad mayor. Así, con el paso del tiempo, la integración funcional tiende a evolucionar hacia niveles cada vez más altos, o al menos más inclusivos. Desde el principio, la condición de sistema abierto de la vida le ha dado el potencial de organizarse en colectivos mayores y más abarcadores. Y la actividad que llamamos comercio, y que se estudia en la disciplina humana de la economía, es en realidad un caso especial de un fenómeno más general, la compartición de productos e información por masas de «individuos» transformadores de energía.

La misma palabra *economía*, en su forma verbal *economizar*, sugiere funcionalidad a través de una elegancia y una eficiencia aumentadas. *Economías de escala* tiene la connotación tanto de ahorro de dinero (un representante de la energía) como de expansión operativa. Éstos son rasgos que vemos en los ecosistemas: crecimiento hasta el límite y retardo de los ciclos que mantienen la forma operacional. La misma expansión y declinación se aplica a compañías e industrias: si son buenas se expanden, pero no sin límite. La diversidad aumenta, así como la interconexión de las compañías; en la economía global, la parte correspondiente a la humanidad tecnológica, eso que Vernadsky llamó la «noosfera», recicla bienes como un ecosistema gigante (sembrado de extraños productos químicos como las botellas de plástico, nunca antes presentes en la biosfera). Pero ni

la síntesis de nuevas moléculas ni sus principios organizadores son originales de la economía humana, que no hace más que seguir los pasos de un sistema mucho mayor y probablemente mucho más estable, el ecosistema global.

Así pues, creemos que nuestra versión ampliada de la segunda ley («la naturaleza aborrece los gradientes») se aplica también a la economía. Aunque más subjetivos que los gradientes físicos y químicos de los sistemas termodinámicos estándares, los gradientes económicos y las organizaciones que los reducen son dignos de consideración. Los gradientes económicos se reducen mediante trueques, transacciones monetarias, instrumentos financieros, mercados negros y corporaciones expansivas. Mediadas por seres humanos racionales y no tan racionales, las economías también se alimentan de energía. Como sus primos biológicos, las economías incrementan su reciclaje y su conectividad a medida que crecen. Como especies que se extinguen, las economías y las monedas nacionales desaparecen en última instancia. Y como en la evolución, donde la biodiversidad puede oscurecer de entrada la direccionalidad, el ruido económico puede oscurecer de entrada la evidencia de un comportamiento no aleatorio y termodinámicamente dirigido. Por ejemplo, si examinamos los negocios individuales efectuados en la bolsa, veremos que unos pocos crecen rápidamente, otros son marginalmente beneficiosos año tras año, y muchos acaban en bancarrota. Si comparamos las empresas individuales cuyas acciones cotizan en bolsa, nos costará apreciar alguna dirección clara. Pero si atendemos al volumen de acciones de todas las compañías, encontraremos un incremento continuado a lo largo del tiempo. Este crecimiento del volumen de negocio total, como el incremento del número de especies con el tiempo, representa un incremento de la energía total obtenida, procesada y degradada por el sistema complejo.

El gradiente económico más obvio y quizá más importante es el gradiente oferta-demanda. Los que incrementan la oferta para satisfacer la demanda, los que reconocen y rectifican gradientes oferta-demanda, y los que crean y luego satisfacen nuevas demandas pueden acumular una riqueza considerable. Todo arbitraje (comercio de instrumentos financieros para sacar partido de las diferencias de precio) es una forma de reconocer y rectificar gradientes de oferta-demanda. Por ejemplo, si el precio del té en China es de dos dólares el kilo y en Irlanda es de cuatro dólares el kilo, cualquier empresario irlandés que pueda comprar el mismo té chino por menos de dos dólares el kilo puede embolsarse la diferencia. Por supuesto, los arbitrades modernos se valen de las telecomunicaciones para comprar instrumentos financieros donde son baratos y venderlos donde son caros, obteniendo beneficios, a veces pingües, de ello.

El efecto de tales transacciones es reducir los diferenciales de precio, lo que conduce a una estabilización de las cotizaciones. Los beneficios obtenibles también promueven nuevas formas de comunicación a larga distancia, de comercio y transporte. La tendencia natural a la reducción de gradientes, trasladada a la esfera económica humana, está detrás de la transformación del planeta en lo que el teórico de la comunicación Marshall McLuhan llamó «la aldea global». McLuhan, cuyo mantra era «el medio es el mensaje», fue uno de los primeros en percibir los inexorables efectos globalizadores de las telecomunicaciones modernas. La fortuna de los Rothschild se amasó antes de la televisión o el teléfono, a base de disponer series de mensajeros para llevar noticias de guerra desde el frente, y de negociar con ventaja en la bolsa de valores antes de que otros supieran lo que ocurría. Los mercados acortan el tiempo y el espacio porque aquellos que encuentran maneras de reducir diferencias de información, y quizá diferencias entre percepción y realidad, de un sitio a otro acumulan beneficios. De este modo, la red de datos dispersos de las sociedades humanas tiende a condensarse y parecerse cada vez más a los órganos sensoriales y de discernimiento de un solo ser.

Los organismos se han juntado antes, aunando cuerpos para la duración de los ciclos vitales mutuos, incluso intercambiando genes. Pero la versión humana del proceso es distinta, porque depende menos de los genes que de los *memes*, símbolos e ideas que nos cohesionan en grupos cada vez más interdependientes. El lenguaje compartido y la expansión de sistemas de intercambio de bienes y servicios —economías— son cruciales para la versión humana de esta transformación. Para nosotros, la expansión de las economías es un proceso termodinámico dependiente de la ruptura de gradientes. Los sistemas abiertos de flujo no sólo divergen para dar lugar a nuevas especies, sino que se fusionan para formar sistemas más grandes y poderosos. El euro, por ejemplo, elimina las comisiones por cambio de moneda, lo que contribuye a romper las fronteras nacionales y los gradientes culturales. El resultado es un incremento en la cantidad y la circulación de bienes dentro de las fronteras europeas. La economía europea puede ahora competir con la norteamericana y la asiática. La tendencia humana de la tribu al reino, a la nación-Estado y a la alianza supranacional no es individual, sino colectiva. Y uno de los lubricantes clave de esta integración, intrínsecamente más internacional que el lenguaje, es el dinero en sus miríadas de formas.

La economía global muestra signos definidos de ser un sistema termodinámico complejo. La circulación y el consumo de productos aumentan y comprenden distancias cada vez mayores. Además, la economía global se ha ido estratificando de tal manera que ciertos productos se fa-

dinámica y la evolución.² Bortz también conecta con la comunidad científica y médica por medio de artículos del estilo de «Envejecimiento como entropía» y otros, publicados en revistas médicas profesionales.³ La geriatría y la gerontología constituyen un activo campo de investigación, con miles de científicos dedicados a desentrañar por qué y cómo envejecemos y morimos. Leonard Hayflick obtuvo en 1961 un resultado clave en la investigación del envejecimiento, al mostrar que el ADN de los fibroblastos humanos (células que forman el tejido conjuntivo) cultivados en laboratorio sólo puede replicarse un cierto número de veces. Esto establecía un límite superior para la mortalidad del organismo. Hayflick halló que las células humanas tienen una capacidad finita para reproducirse y que, por lo tanto, son mortales. Desde entonces se han venido identificando algunas líneas celulares, como la germinal o cepas cancerosas, que parecen ser inmortales. Más tarde se descubrió que este fenómeno era consecuencia del acortamiento de los telómeros. Éstos son secuencias repetitivas de nucleótidos que se encuentran en los extremos de cada uno de nuestros cromosomas. Los telómeros se acortan en el curso de la división celular normal, lo cual limita la multiplicación de las células. Las enfermedades, las lesiones y el estrés también acortan la longevidad. Aunque hoy por hoy no existe una teoría del envejecimiento que cuente con una aceptación general, Bortz defiende con elocuencia que el envejecimiento metabólico puede retardarse mediante una dosis óptima de ejercicio.

Se ha dicho que uno es tan viejo como se siente. No sólo es cierto que la edad cronológica no necesariamente se corresponde con la edad fisiológica, sino también que hay pruebas fehacientes de que esta última puede retardarse y, quizás, hasta invertirse, lo que permitiría sumar años de vida efectiva. Con la ayuda de su hijo, Bortz recopiló datos sobre consumo máximo de oxígeno (VO_2 max) en carrera por parte de maratonianos, velocistas, remeros y ciclistas, así como de personas que no hacían ejercicio.

Los investigadores médicos consideran que el consumo máximo de oxígeno es una medida excelente de la salud cardiovascular. A partir de los treinta y cinco años, los atletas van perdiendo su capacidad física a razón de un 0,5 % anual,⁴ mientras que las personas sedentarias lo hacen a razón de un 2 % anual. La diferencia puede parecer escasa, pero es acumulativa. El efecto del ejercicio «puede parecer pequeño [...], pero cuando la diferencia del 1,5 % anual se multiplica por décadas, se hace enorme».⁵ Lo que los Bortz quieren decir es que mientras los deportistas envejecen cinco años por década, las personas sedentarias envejecen veinte años en el mismo tiempo. Estos resultados son asombrosos, y sus implicaciones

deberían resultar obvias para una sociedad preocupada por la salud global, que gasta billones de dólares anuales en sanidad. Lo primero que revelan estos datos es que las personas de más de treinta y cinco años medianamente activas envejecen fisiológicamente a razón de un 1% anual. Éste es el envejecimiento normal. Los superatletas pueden rebajar esta tasa a la mitad, mientras que las personas sedentarias envejecen el doble de rápido de lo normal. Al cabo de veinte años, estas personas habrán envejecido fisiológicamente cuarenta años, y los deportistas sólo diez (figura 18.1). Si esto es cierto, se ha descubierto una fuente de la juventud, y su base termodinámica es el flujo de energía. Forzar al cuerpo a emplearse energéticamente a la manera de nuestros ancestros puede prevenir los efectos del envejecimiento. Los sistemas termodinámicos requieren flujos de energía. La inactividad, el desuso del aparato cardiovascular, disminuye la vitalidad. La conexión longevidad-ejercicio parece ser aún más evidente en la gente mayor. Según el investigador Rick Lovett, «con seis meses de entrenamiento invertimos 30 años de envejecimiento».⁶ Lovett añade que nadie es demasiado viejo para beneficiarse del ejercicio, y que cuando la gente abandona la rutina de unos cuantos periodos cortos de ejercicio intenso, sus músculos se atrofian y mueren. El cliché «úsalo o piérdelo» tiene una base bioenergética. Lovett también ofrece datos que sugieren que el ejercicio excesivo puede causar un deterioro permanente: después de dieciséis a dieciocho carreras de ultramaratón (100 kilómetros), la condición física de los corredores decae drásticamente.⁷

Ni quemarse ni apagarse

A pesar de los grandes avances y las promesas de la medicina occidental, como el conocimiento creciente de las bases genéticas de la enfermedad y las posibles terapias génicas, abundan los malentendidos. Aunque intuitivamente puesto de manifiesto en algunos remedios populares, en prácticas indígenas y en la medicina oriental, el vínculo termodinámico entre salud y reducción óptima de gradientes no se ha enunciado explícitamente. La intuición más obvia de este vínculo reside en la constatación general de que los regímenes alimentarios y de ejercicio son importantes para nuestra salud. Cuando el paciente entra en el consultorio, el médico tiene enfrente uno de los sistemas termodinámicos más complejos de este mundo. A diferencia de las máquinas construidas por ingenieros, este cuerpo humano (mucho más que humano cuando se considera su historia metabólica, celular y animal) tiene el legado de un flujo más o menos ininterrumpido durante los últimos 3000 millones de años. La medicina oc-

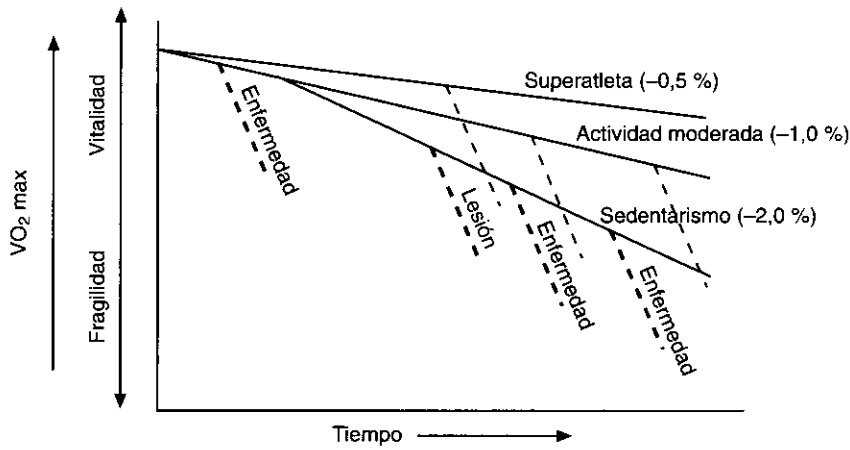


Figura 18.1. La vitalidad y la fragilidad humanas medidas por el consumo máximo de oxígeno ($VO_2 \text{ max}$) en función de la edad. Después de los treinta y cinco años, las personas comienzan a perder capacidad cardiovascular. Esto es envejecimiento normal. Pero la rapidez con que se pierde la salud cardiovascular depende de la cantidad de ejercicio. La gente en buena forma pierde un 0,5 % de capacidad cardiovascular cada año, la que está en una forma aceptable envejece un 1 % al año, y la que no hace ejercicio, un 2% al año. Al cabo de veinte años, los que están en baja forma habrán envejecido metabólicamente unos cuarenta años, mientras que los que están en mejor forma sólo habrán envejecido diez años. Las enfermedades y las lesiones pueden acelerar el proceso de envejecimiento. (Datos de Bortz y Bortz, 1996.)

cidental, a pesar de sus proezas, se ha basado en un modelo incompleto del cuerpo como máquina. Esta diferenciación entre organismos y artefactos humanos resulta crucial.⁸ Los organismos pueden resentirse del exceso de trabajo. Sin embargo, mucho más que la mayoría de máquinas, también se resienten de la falta de trabajo. Nuestro antiguo legado de transformación energética requiere que nos mantengamos activos para estar en forma y para que alcancemos nuestra longevidad máxima. Además, los organismos deben tomar decisiones que las máquinas no afrontan, y que afectan a su futuro. La frase «úsalo o piérdelo» resume tanto la opcionalidad del ejercicio como la importancia de proporcionar a las «máquinas naturales» que llamamos organismos el flujo de energía que precisan y que, como hemos visto, es clave para comprender su función y comportamiento básicos.

Eugene (Gene) Yates, un doctor en medicina y profesor en las escuelas médicas de Stanford y en la Universidad de California en Los Ángeles, ha introducido una perspectiva termodinámica en el asunto del envejecimiento, la senectud y la muerte. Con setenta y cinco años, Yates es un

sabio polifacético que se encuentra igual de cómodo discutiendo sobre fisiología, termodinámica o mecánica cuántica. Es un hombre alto y recio aficionado a la pesca, la caza y las acampadas. Entre los comités de que forma parte, se encuentra una junta de la NASA que analiza las cuestiones fisiológicas que plantearán los viajes a Marte. Lo reseñamos porque fue uno de los primeros en reconocer la importancia que la autoorganización y la termodinámica revisten para la biología. En 1979 Yates organizó un encuentro en Dubrovnik, en la antigua Yugoslavia, que reunió a treinta científicos procedentes de los campos de la biología, la química, la geología, la física, la matemática y la ingeniería del control. Entre los presentes estaban Harold Morowitz, Brian Goodwin, Stephen Jay Gould, Philip Anderson y Ralph Abraham. Se habló de la organización, la emergencia, la información, el individuo, la evolución, la complejidad y la estabilidad, entre otros temas. Fue una conferencia adelantada a su tiempo.⁹

Yates prefiere la palabra *senescencia* para referirse al deterioro asociado con la edad. «Es la senescencia, no el envejecimiento, lo que preludia la muerte por vejez.»¹⁰ Yates cree que *salud* es sinónimo de estabilidad. La mala salud es un signo de inestabilidad, cuya expresión última es el colapso de la dinámica del sistema, que llamamos muerte. Yates contempla la senescencia y la muerte como el resultado de un fallo parcial o total del sistema. El primer caso puede consistir en un desarreglo de procesos como la reparación y protección del ADN o la fidelidad de su replicación, la eliminación de desechos, la protección de los radicales libres o el deterioro del sistema inmunitario, como ocurre en el sida. «La muerte del sistema sobreviene cuando una constelación de partes y procesos interrelacionados experimenta una reducción del rango dinámico, más allá de cierto mínimo crítico [requerido] para la estabilidad en un medio fluctuante.»¹¹ La muerte súbita se deriva de cambios en múltiples ligaduras que acarrearán la pérdida de la estabilidad del sistema.

El ochenta por ciento de la longevidad de las especies se correlaciona con el peso cerebral, el peso corporal, el metabolismo específico y la temperatura corporal. Yates esboza algunas propiedades de la senescencia:¹²

1.^a La mortalidad humana aumenta monotónicamente de los treinta a los noventa años.

2.^a La composición química del cuerpo cambia regularmente con la edad.

3.^a Las funciones fisiológicas y bioquímicas declinan progresivamente (como se aprecia en el descenso del consumo máximo de oxígeno con la edad).

4.^a La capacidad de adaptación a los cambios ambientales se reduce.

5.^a Aumenta la vulnerabilidad a ciertas enfermedades.

6.^a Muchos procesos, como el metabolismo, se retardan.

7.^a Algunos aspectos de la función cerebral pueden fallar, como ocurre en el Alzheimer, mientras que otros, como la madurez y la sabiduría, pueden mejorar con la edad.

Para Yates, la senescencia comienza cuando los procesamientos y transformaciones de energía han copado todos los grados de libertad del sistema, de manera que no quedan vías ni escapes disponibles. Conviene con Bortz en que lo que no se usa se pierde. Sin un flujo de energía adecuado, los sistemas biológicos se atrofian. Yates también aborda un tema que todos los superatletas conocen: lo que se usa *también* se puede perder.¹³ Por encima de las 2000-3000 kilocalorías semanales de ejercicio, el rendimiento anabólico decrece y se imponen el deterioro oxidativo y el desgaste. La figura 18.2 es una representación gráfica de esta idea. La coordenada horizontal corresponde a las diferentes tasas de actividad metabólica (básica, sedentaria, activa y superactiva) y la vertical al procesamiento energético total. Nótese que el flujo de energía aumenta con la actividad. La curva más interesante es la de rendimiento anabólico. Este concepto se refiere a la faceta constructiva del metabolismo, como la producción de tejido muscular. Según la representación de Yates, alcanzaría un punto óptimo hacia las 2500 kilocalorías semanales. Por debajo de esta cantidad de ejercicio estaríamos en el ámbito del «usar o perder», y por encima en la situación hiperactiva del «usar y perder».

Yates compara la curva de rendimiento anabólico con la eficiencia creciente y el par de torsión en un motor de combustión. El incremento de revoluciones por minuto genera más potencia, pero sólo hasta cierto punto. Por encima de ese valor, acelerar las revoluciones del motor no hará más que rebajar la potencia y la eficiencia. Análogamente, el organismo es un sistema biológico cuyo rendimiento óptimo se obtiene no al máximo o al mínimo, sino dentro de un estrecho rango de actividad. Un flujo de energía máximo deteriora y degrada el sistema y favorece la senescencia. El organismo se quema. Por el contrario, un flujo de energía mínimo lleva a la atrofia y el estancamiento. El organismo se apaga.

Bortz y el neurólogo Jeff Victoroff argumentan que la salud física y mental depende de un punto medio, un nivel óptimo energético entre sedentarismo y estrés, entre déficit y exceso de flujo de energía. El ejercicio aeróbico proporciona el flujo de energía necesario para una vida larga, pero el exceso de ejercicio deteriora las células y puede perjudicar nues-

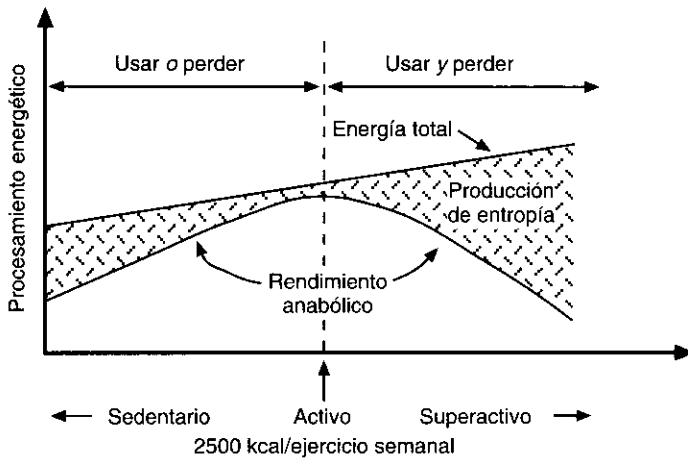


Figura 18.2. La abscisa de esta gráfica es el nivel de actividad: sedentario, activo y muy activo. La ordenada es el procesamiento o consumo energético de los sujetos. Como es de esperar, el procesamiento o consumo energético aumenta con el nivel de actividad. De especial interés es el rendimiento anabólico, o la parte constructiva del metabolismo, que evidencia un nivel óptimo de ejercicio o actividad. Yates estima este nivel óptimo en unas 2500 kilocalorías de ejercicio por semana. Por debajo de esta cantidad de ejercicio el cuerpo pierde capacidad metabólica, y por encima comienza a perderla también debido al desgaste y la caída del rendimiento metabólico. (Adaptado de Yates y Benton, 1995.)

tra salud a largo plazo. Como señala Bortz, el sistema vascular no consiste en tuberías inertes, sino que se remodela constantemente en respuesta a la demanda de riego sanguíneo. Las arterias en desuso se estrechan. Los músculos en desuso se atrofian. Por el contrario, el flujo sanguíneo (que con su suministro de hemoglobina incrementa el gradiente glucosa/oxígeno del que obtienen energía las neuronas) aumenta en virtud de actos voluntarios. El más simple y efectivo de tales actos es el ejercicio. La naturaleza del acoplamiento entre actividad neuronal y flujo sanguíneo es una activa área de investigación en el campo de la imagería cerebral. Aunque las neuronas no consumen energía al enviar impulsos nerviosos, mantienen gradientes de iones a través de la membrana celular. Son estos gradientes los que hacen posible la neurotransmisión. Sin embargo, su mantenimiento depende del riego sanguíneo cerebral (por eso el pensamiento o el estudio intensivos, aun sin movimiento corporal, pueden abrir el apetito).

La decisión consciente de hacer ejercicio es sólo la punta del iceberg o el inicio de una cascada que tiene numerosas consecuencias. Las má-

quinas no toman decisiones de este estilo ni se vigorizan por los flujos puestos en juego a causa de su decisión. La autopsia de Clarence Demar, que corrió la maratón de Boston treinta y dos veces y la ganó en siete ocasiones, reveló que sus arterias estaban enormemente dilatadas. Las arterias se expanden literalmente con el uso. Receptores de flujo en la cara interna de las arterias captan la energía del torrente sanguíneo y ajustan las dimensiones de los vasos a la demanda de sangre. Puesto que unas arterias constreñidas incrementan las posibilidades de sufrir una embolia, ensancharlas a base de ejercicio es un modo útil y natural de prevenir las embolias y la arteriosclerosis. La aspirina, tomada en pequeñas dosis, ayuda a deshacer las plaquetas (fragmentos de células sanguíneas que resañan las hemorragias). Las plaquetas pueden aglomerarse con depósitos de colesterol y taponar una arteria, dejando sin suministro de sangre a las neuronas abastecidas por ella y provocando una embolia. Hoy los médicos reconocen que las embolias vienen precedidas de arteriosclerosis y otros factores de riesgo mucho antes de que se manifiesten.

La serie de factores que desembocan en una embolia se denomina «riesgo cerebrovascular». Las presiones arteriales demasiado bajas, o demasiado altas, también se asocian con las embolias; el torrente circulatorio debe fluir con el caudal justo. El sistema musculoesquelético también es dinámico y se fortalece con el uso, como saben aquellos que trabajan al aire libre. Aunque el cerebro no es un músculo, la investigación neurológica evidencia que también (y especialmente) se desarrolla con el uso. Por ejemplo, los ciegos (cuya audición, en algunos casos, duplica en prestaciones la de los no ciegos) emplean áreas del córtex visual primario, pero no para procesar información visual. Esta reconfiguración cerebral en función de la utilidad sensorial no se limita a los seres humanos: los gatos ciegos, por ejemplo, dedican áreas de su córtex visual a la audición, mientras que los gatos sordos «ven» con su córtex auditivo. Por automática y casi fisiológica que se vuelva con el hábito, esta reorientación de las tendencias genéticas del cerebro puede iniciarse de manera voluntaria. Los cerebros de los violinistas tienen el lóbulo frontal derecho sobredimensionado, en correspondencia con su uso aumentado de los dedos de la mano izquierda. Los efectos del uso que hacemos de nuestro cerebro no son sólo a corto plazo. Varios estudios evidencian que la educación mantiene a raya la enfermedad de Alzheimer. A mayor educación, mayor efecto, aunque aquélla se haya producido hace décadas. Este robustecimiento probablemente se explica por que las rutas termodinámicas, una vez establecidas, se refuerzan por el uso. Pueden ser inicialmente electivas, pero luego continúan fluyendo por sí mismas. El vínculo entre genética y termodinámica viene a ser como el existente entre la infraes-

estructura y el tráfico de una ciudad: los genes construyen las calles, pero la termodinámica determina su uso en tiempo real.

Respaldándose en la termodinámica y en la creciente conciencia de la vanguardia médica acerca de la importancia de nuestra historia evolutiva, Bortz propone que el mejor método general para alargar la vida es el ejercicio. Un ejemplo llamativo es el de un osteópata profesional que interpretó mal la radiografía de una pierna que había estado seis meses escayolada: pensó que pertenecía a un hombre veinte años mayor que su auténtico dueño.¹⁴ Esto es lo que acarrea la falta de uso: el flujo sanguíneo disminuido en la pierna inmóvil simuló los efectos del envejecimiento.

Este ejemplo también acentúa la diferencia entre los organismos desarrollados de manera natural (sistemas abiertos termodinámicamente) y las máquinas construidas por el hombre (su inadecuado modelo médico). Los sistemas naturales son capaces de funcionar elegantemente a temperatura ambiente, a diferencia de las máquinas industriales, que precisan de altas temperaturas y presiones. A temperaturas ordinarias y a la presión atmosférica, las células respiran oxígeno y producen agua como producto de desecho; ni que decir tiene, también pueden crecer y reproducirse. Las máquinas, en cambio, parecen toscas, torpes, ineficientes y usualmente inferiores en la mayoría de estos rasgos principales, si no en todos. Los organismos vivos (al menos en su forma animal) no se guardan en una estantería entre uso y uso. Por el contrario, los materiales del cuerpo no dejan de circular. Esta circulación, relacionada con el ciclo natural de los sistemas complejos formados en la vecindad de los gradientes, es más o menos continuada desde la concepción hasta la muerte. Cuando el flujo de energía es insuficiente, las formas reductoras de gradientes manifiestan signos sistémicos de estrés, desorganización y, en última instancia, pérdida fatal de función. Hay que decir que, por un breve periodo de tiempo durante el sueño, los mamíferos pierden su homeotermia, la capacidad de regular su temperatura. Esta pérdida de termorregulación se ha interpretado como una especie de retorno nocturno a la fisiología de nuestros ancestros reptilianos. Los reptiles, menos eficientes metabólicamente que los mamíferos, evolucionaron antes. Pero el cerebro mamífero (incluido el neocórtex humano, el responsable de nuestras amplias frentes) está evolutivamente erigido sobre una base reptiliana. Los reptiles no sueñan. Puede que los sueños sean un defecto de diseño fisiológico, breves accesos nocturnos de confusión mental que reflejan la interferencia de un cerebro reptiliano todavía parcialmente activo.

El biólogo molecular belga Olivier Toussaint estudia la termodinámica del estrés y el envejecimiento en los sistemas celulares. Aunque apenas ha superado los cuarenta años de edad, ya ha publicado más de setenta y cinco artículos científicos. Como director de un laboratorio de una pequeña universidad jesuita en Namur, cerca de la frontera franco-belga, lidera un equipo de veinte investigadores en proyectos internacionales e intercontinentales. Olivier, físicamente limitado por padecer distrofia muscular, quizá tenga un interés personal en el flujo de energía y sus efectos sobre las células. En cualquier caso, como Stephen Hawking, su espíritu y su intelecto recorren libremente el paisaje físico y científico. Ha viajado a numerosos encuentros internacionales por todo el mundo, y le encanta conducir por las carreteras de vuelta a Bélgica y Montana, en vehículos acondicionados que lo liberan de las restricciones que le impone su enfermedad.

La investigación de Toussaint se ha centrado en los efectos del estrés sobre el envejecimiento celular. En este libro hemos visto los efectos del estrés sobre ecosistemas y organismos. La obra de Toussaint nos da idea de estos procesos al nivel celular. La mayor parte de su trabajo está relacionado con el estrés químico oxidativo en células cultivadas. Dentro de nuestras células se producen normalmente compuestos de oxígeno reactivos, principalmente durante la respiración celular. Las mitocondrias de la célula se valen del oxígeno para respirar y producir la unidad energética fundamental de la vida, el trifosfato de adenosina, o ATP. Esta molécula contiene un enlace químico rico en energía que abastece a numerosos enzimas implicados en el metabolismo celular. Los enzimas son proteínas con actividad catalítica, lo cual significa que aceleran las reacciones químicas requeridas para que el organismo se mantenga vivo. Estos procesos permiten la síntesis de nuestras proteínas musculares y de los lípidos que constituyen las membranas celulares.

Los subsistemas celulares que nos mantienen dependen del metabolismo del oxígeno. Sin embargo, el oxígeno es un gas altamente reactivo (consumido despacio contribuye al crecimiento de los bosques, pero también alimenta los incendios forestales). La dicotomía entre la combustión «buena» y la «mala» (que ya hemos visto en capítulos anteriores) ocupa un lugar central en el proceso de envejecimiento. No sólo maduramos, sino que también envejecemos. Y lo hacemos no sólo porque nos marchitamos, sino porque nos quemamos. Cuando nuestras células funcionan normalmente, existe un gradiente de protones (H^+ , un átomo de hidrógeno positivamente cargado) a través de los orgánulos celulares consumidores

de oxígeno, que mantiene fuera los iones de calcio y de sodio. Pero cuando estos orgánulos, las mitocondrias, no pueden producir ATP, se ven incapaces de mantener el gradiente. Los iones de calcio y sodio entran en la célula, en un proceso fatal llamado «necrosis celular». También puede ocurrir que el oxígeno reaccione en el lugar equivocado de la cadena de transporte de electrones, formándose superóxidos. Estos compuestos pertenecen a un grupo de moléculas oxigenadas llamadas «radicales libres» (átomos o moléculas con electrones desapareados), que reaccionan indebidamente y malogran la función celular.

Buena parte del deterioro celular asociado al envejecimiento parece deberse a los estragos causados en el ADN por el ataque de los radicales libres. Una razón de que los «antioxidantes» —como las vitaminas C y E— sean buenos para nosotros es que reaccionan con los radicales libres y los neutralizan. El ejercicio incrementa la circulación de los poderosos cazadores de radicales libres del cuerpo, enzimas antioxidantes como la glutatión-peroxidasa, la superóxido-dismutasa y la catalasa. Por otra parte, el ácido láctico, que produce una sensación de quemazón en los músculos extenuados, puede constituir en sí mismo un poderoso antioxidante.¹⁵ No obstante, por la misma función y organización cíclica de la célula, la necrosis puede autorreforzarse. Por ejemplo, los niveles de glutatión, antioxidante intracelular, descienden cuando escasea el ATP. Así pues, la falta de ATP reduce la capacidad de la célula para producir más ATP, que ahora necesita más que nunca. La evolución ha dotado a las células de sistemas antioxidantes que destruyen los radicales libres reactivos, reparan el ADN y neutralizan la mayoría de productos finales tóxicos de las reacciones oxidativas, en una guerra aparentemente implacable de especies químicas. Es como la imagen especular de la autocatálisis. En la salud, y en todas partes, la organización cíclica de la reducción de gradientes proporciona la base termodinámica de lo que a veces se conoce como el «principio de san Mateo»: «Al que tiene, se le dará; y al que no tiene aun lo poco que parece tener, se le quitará». En la salud y en la enfermedad, pequeñas cosas como la decisión de hacer ejercicio pueden amplificarse hasta llegar a tener efectos más que significativos en el bienestar y la longevidad de los organismos.

El concepto de estrés organísmico-celular fue introducido antes de la segunda guerra mundial por el médico húngaro Hans Selye.¹⁶ Tras inyectar una variedad de toxinas en ratas, observó hipertrofia de las glándulas suprarrenales y alteraciones regresivas del timo y los nódulos linfáticos. Selye concluyó que tales síntomas representaban una respuesta

inespecífica a los agentes tóxicos en general. Su investigación sugirió que la reacción inicial al estrés es de choque, como el que producen el calor o frío intensos. A esta sacudida inicial le sigue una fase de adaptación y recuperación que puede derivar gradualmente en una resistencia al estrés. Selye contemplaba el estrés biológico como una respuesta inespecífica del cuerpo a cualquier demanda extra.¹⁷

Hoy el concepto de estrés está implantado en la mayoría de campos de la biología, la medicina, la psicología y hasta las ciencias sociales. Como señalan Toussaint y sus colegas: «Los biólogos celulares y moleculares, trabajen con células humanas, animales o vegetales, están de acuerdo en que cualquier factor medioambiental potencialmente desfavorable para un organismo vivo supone una tensión. También se reconoce de manera general que si se exceden los límites de tolerancia y la capacidad adaptativa se fuerza demasiado, el resultado puede ser un daño permanente o incluso la muerte».¹⁸

Un criterio crucial para el desarrollo biológico es la capacidad de las células y organismos de degradar gradientes energéticos. Toussaint cree que la senescencia de los sistemas biológicos comienza cuando esta capacidad degradativa disminuye, lo que en última instancia lleva a la muerte. De hecho, se ha demostrado experimentalmente que la producción de entropía disminuye con la edad de los organismos, órganos, tejidos o células.¹⁹

El estrés leve y continuado resultante de la producción basal de radicales libres no compromete automáticamente el sistema entero. En situaciones de estrés moderado, los métodos de resistencia pueden prevenir el deterioro celular. Siempre que el estrés no implique una acumulación de modificaciones irreversibles, puede considerarse un ensayo positivo para los sistemas de reparación que estimula. La inmunización y el sistema inmunitario son un ejemplo paradigmático de estrés estimulador de un sistema necesario. Si no se reparan, las alteraciones celulares se hacen irreversibles y se acumulan. Cuando el deterioro supera la operatividad de los mecanismos compensatorios, la célula se transforma y se instala en un nuevo estado estacionario, acompañado de degeneración celular y supresión de actividad bioquímica. Esto es senescencia normal.

El estrés crónico o los episodios repetidos de estrés agudo pueden causar elevadas concentraciones de radicales oxidantes, que son producidos por una inflamación derivada, por ejemplo, de la exposición a humos, tóxicos o radiación. Si el daño causado por estos radicales no se repara, quedará menoscabada la síntesis de ATP y descenderá la actividad bioquímica general y la transformación de energía libre. El envenenamiento oxidativo puede inducir el mecanismo de autodestrucción celular llamado «apoptosis».

Toussaint y sus colegas idearon experimentos en los que se sometía a células humanas a estrés subletal con oxidantes o radiación ultravioleta, y encontraron que, al cabo de varios días de exposición a estos factores estresantes, aparecían muchos rasgos de las células senescentes. Estos cambios incluían morfologías seniles, cambios en la expresión génica y supresiones de material genético.²⁰

El grupo de Toussaint ha descrito procesos moleculares que explican la aparición de lo que llaman «senescencia prematura inducida por estrés». Cuando una célula está sometida a estrés, sensores moleculares detectan los daños y ponen en marcha una cascada de mensajes que, en última instancia, informan a nuestros genes. Se ha descubierto que la estabilidad del estado celular se pierde por el establecimiento de nuevos ciclos reguladores, que empujan al sistema celular a asumir un nuevo comportamiento, en este caso el propio de las células seniles.

¿Hay algún modo de retrasar el proceso de envejecimiento? ¿Hay alguna fuente de juventud? El antes mencionado número de Hayflick parece imponer un límite superior a la capacidad replicativa del ADN y a la longevidad máxima de los organismos. En el futuro quizá sea posible ampliar este límite mediante ingeniería molecular. Sin embargo, incluso con el material genético natural, a menudo los organismos pueden incrementar su longevidad un 50-100 % a base de restricción calórica, ejercicio y erradicación de la enfermedad. Aparte de vivir más tiempo, la calidad y vitalidad de nuestras vidas pueden incrementarse mediante una actividad metabólica aumentada si nos atenemos a ciertas reglas. La primera propuesta consiste en reducir la extensión del deterioro irreversible causado por enfermedades, accidentes, malos hábitos alimentarios, etcétera, hasta niveles que permitan la estimulación de nuestras células y cuerpos (para mantenerlos activos y evitar que sus subsistemas se pierdan) sin superar su capacidad de autorreparación. Selye ya insistió hace tiempo en que el estrés produce cambios muy similares a los ligados al envejecimiento.

Se ha demostrado que la restricción calórica incrementa la longevidad. Para que esta restricción sea efectiva, las calorías de la dieta deben estar bastante por debajo de la cantidad de calorías que suele proporcionar una alimentación ad libitum. Asimismo, no debe conducir a malnutrición o dietas impropias, ni limitar el aporte de nutrientes. La restricción calórica prolonga la longevidad de varias especies, en particular roedores, y disminuye el deterioro del material genético en animales viejos.

Como Bortz, Toussaint sugiere que debemos luchar contra el «síndrome de desuso», que conduce a vulnerabilidad cardiovascular, fragilidad musculoesquelética, obesidad, depresión, etcétera (las enfermedades de la gente sedentaria). Este principio parece ser válido al nivel subcelu-

lar (activaciones enzimáticas, etcétera), al nivel tisular (atrofia muscular y osteoporosis por falta de esfuerzos, prestaciones disminuidas del sistema nervioso central por falta de estímulos) y al nivel organísmico (apatía, obesidad, etcétera). ¡Úsalo o piérdelo!

El sistema termodinámico humano

El escritor de ciencia ficción Philip K. Dick tiene varios cuentos en los que imagina personas criogenizadas que sobreviven a largos viajes espaciales; pero incluso entonces sus cerebros, a veces alimentados con fantasías por los ordenadores de la nave, permanecen mínimamente activos para que el organismo se mantenga vivo. Algunas bacterias son capaces de sobrevivir a temperaturas cercanas al cero absoluto. Los animales como nosotros, sin embargo, integramos muchas más partes. Por ejemplo, si la sangre de un mamífero deja de circular durante demasiado tiempo debido a un colapso cardíaco, el animal muere. Poseemos una variedad de modos metabólicos. Tiritamos y sudamos. Subimos corriendo las escaleras y luego nos tumbamos en la cama para echar una cabezada de bajo metabolismo. Pero no somos máquinas. No podemos desenchufarnos por completo. Una vez más, vemos que la vida tal como la conocemos, y la vivimos, no sólo requiere una codificación estructural en genes y proteínas, sino también el flujo de energía sin el cual no puede funcionar.

Aunque aún no adoptada por la mayoría de médicos o facultades de medicina, el estamento médico está más familiarizado con la perspectiva evolutiva —«medicina darwiniana»— que con las ideas termodinámicas. Victoroff, por ejemplo, señala que ese gran azote conducente a la diabetes, la obesidad (el resultado de comer en exceso), puede atribuirse a la escasez de alimento en el hábitat natural de nuestros antepasados evolutivos.²¹ En el medio ambiente donde evolucionaron nuestros ancestros, la facultad de almacenar energía en forma de grasa corporal habría marcado en ciertos momentos y lugares la diferencia entre la vida y la muerte. Pero hoy día nuestra atracción atávica por los indicadores de fruta madura (dulzor y colores vivos) y nuestro apetito de sal (menos disponible en tierra que en el mar) y de grasa animal (una fuente de carbono de alta energía) son demasiado fáciles de satisfacer. Con la disponibilidad aumentada de alimentos procesados, sus sensaciones gustativas se asocian a colorantes alimentarios. Los cereales multicoloreados imitan las fuentes de vitamina C y glucosa de nuestros ancestros arborícolas y frugívoros (además de diseminadores de semillas). Sin embargo, aunque se suplementen con vitaminas, los alimentos refinados a menudo carecen de

los nutrientes incluidos en el paquete original de la naturaleza (y del contexto de la energía invertida en la caza y la recolección).

La medicina evolutiva interviene en la justificación de Bortz de la importancia del ejercicio, en particular correr y caminar. Como nosotros, nuestros ancestros eran estructuras termodinámicas fluyentes. Pero, a diferencia de nosotros, tenían muchas más oportunidades de correr y sudar hasta la extenuación. De hecho, la explicación más plausible de nuestra carencia de vello corporal en relación con nuestros primos genéticos (chimpancés, gorilas, orangutanes y gibones) es que era un inconveniente para nuestras carreras de resistencia. Los primeros seres humanos, que, millones de años antes de los últimos tres o cuatro milenios de civilización, hacían uso de su inteligencia para seguir la pista de sus presas, sudaban profusamente. La evaporación del sudor refrescaba los cuerpos relativamente lampiños mejor que los velludos, lo que representaba una ventaja (aunque ahora nosotros, cuando hace frío, tengamos que cubrirnos con prendas que sustituyen el pelaje perdido). Bortz subraya que las carreras también contribuían a incrementar el riego sanguíneo cerebral, un posible bucle retroactivo evolutivo entre actividad física e inteligencia. Por meritorias que sean las justificaciones políticas para oponerse a la visión de «tabula rasa» de la naturaleza humana, el determinismo genético estricto, especialmente en el caso humano, no puede ser tomado científicamente en serio. Aquí, y en todas partes, la dicotomización se demuestra más útil para la controversia que para la edificación. Nuestros ancestros estaban genéticamente dotados para pensar, pero su decisión de cazar grandes mamíferos en grupo los hizo aún más inteligentes. Aunque ahora vivimos en un mundo completamente distinto, la decisión de llevar una vida más activa tiene el potencial de devolvernos a la condición física de nuestros ancestros. En el juego de la salud, las cartas genéticas cuentan mucho, pero también cómo jugamos con ellas. Nuestras decisiones sobre la manera de adquirir y utilizar nuestra energía pueden favorecer o comprometer nuestra salud, y prolongar o acortar nuestra vida.

Nada tiene tanto éxito como el exceso.

Oscar Wilde

El criterio de la verdad es que se cumple aunque nadie esté preparado para reconocerla.

Ludwig von Mises

Mercados que siguen gradientes y la pérdida de la verdad

Las pautas de flujo de energía estudiadas por la termodinámica de gradientes pueden aplicarse también a diversas áreas de la economía. Tal vez ésta debería ser reformulada para reflejar nuestra comprensión de los sistemas económicos como sistemas energéticos de no equilibrio. Las economías emanan de las actividades de los organismos, en sí mismos sistemas de no equilibrio. Reconocemos que las economías y las civilizaciones no tienen las propiedades estadísticas, fácilmente mensurables, de los sistemas termodinámicos no vivos, mucho más simples. Sin embargo, puesto que los mercados, las economías, las ciudades y las civilizaciones son sistemas abiertos, deberíamos esperar que manifestasen formas de comportamiento con las que ya estamos familiarizados. En efecto, el simple acto de que un vendedor y un comprador convengan un precio representa más que un acuerdo entre las partes: representa un sistema transaccional que alcanza un equilibrio local. El dinero, como la energía, fluye. Antes hemos visto que los flujos de carbono son convertibles en flujos de energía ecosistémicos. Para ello, Ulanowicz y otros¹ tomaron prestado el método de cálculo del Premio Nobel de economía Wassily Leontief, cuyos estudios del flujo del dinero a través de los sistemas económicos inspiraron cálculos como el del producto nacional bruto (PNB). Si el procesamiento energético total en un ecosistema es similar al PNB de una economía nacional, entonces una economía impulsada por el dinero es similar a un ecosistema impulsado por la energía. Los flujos económicos también tienen sus equivalentes de producción de entropía, como las cuotas y los impuestos sobre las transacciones. Estos gastos generales a menudo añaden poco valor al producto o las unidades de energía transferidas, pero tienden a nivelar las transacciones.

Y el dinero tiene sus equivalentes energéticos. En el año 2005, el equivalente energético del petróleo crudo a 0,31 dólares por litro era

de 27.700 kilocalorías por dólar. El dinero circula de manera cíclica, lo cual se parece mucho a la circulación de la energía en los ecosistemas. No obstante, mientras que en los ecosistemas la energía y la materia fluyen en la misma dirección, en los sistemas económicos el dinero y la energía circulan en sentidos opuestos: el dinero se intercambia por energía, bienes y trabajo. Hoy día se pagan cientos de trillones de dólares por la energía: China, Estados Unidos y Europa importan petróleo y gas, en tanto que los dólares fluyen hacia los países exportadores. El dinero, intercambiable por energía, trabajo y productos, se comporta como la energía que cambia de forma mientras organiza los flujos a través de los sistemas naturales no humanos.

Así como, en la ecología, los organismos capaces de obtener más recursos para su crecimiento y mantenimiento tienden a prosperar, así también los beneficios económicos tienden a ir a parar a aquellos operadores más capaces de acaparar materiales y recursos para mantener o expandir sus propias operaciones. El dicho «dinero hace dinero» no es sólo un axioma del capitalismo, sino también un reflejo de los procesos de crecimiento típicos de los sistemas de no equilibrio. Estos sistemas incrementan su diferenciación y complejidad en relación con el mundo exterior a base de canalizar recursos para su propia expansión, explotando y a veces agotando los gradientes que generan flujos de energía. Además, puesto que los seres humanos somos los primeros manipuladores de símbolos conocidos, el equivalente económico de la biomasa o la energía metabólica —el dinero— puede hacerse a base de reducir sistemáticamente los diferenciales de precio «meramente simbólicos». En las finanzas esto se conoce como «arbitraje», que el diccionario define como «la compra y venta simultánea de un mismo título o equivalente para sacar partido de diferencias de precio». Al vender en un sitio y comprar en otro, el arbitraje reduce las diferencias de precio, expandiendo el flujo e incrementando el negocio. Podemos ir más lejos y sostener que las transacciones de materiales y energía entre individuos actúan como un mecanismo vinculador que los cohesionan y les permite competir a niveles que serían prohibitivos en solitario. Así pues, el incremento del comercio rentable, como la expansión de los flujos materiales en los sistemas de no equilibrio no humanos, puede entenderse como un motor de la organización creciente y la emergencia de «individualidad» a escalas mayores y más abarcadoras.

Esto no significa que los mercados se dirijan en línea recta hacia el equilibrio. Si lo demás no cambia, el reconocimiento de diferenciales aprovechables en el mercado global enriquece a los que actúan según su conocimiento probabilístico, creando nuevas disparidades que excluyen

cualquier equilibrio (o «eficiencia» de mercado) simple o duradero entre mercados globales interconectados. Esto parece obvio siempre que tengamos en mente que los mercados y las economías no son sistemas cerrados, ni siquiera dentro de la esfera global humana, sino que dependen en última instancia del recurso «no renovable» definitivo, el sol. Los mercados, como los organismos, dependen de fuentes externas para sus actividades de mantenimiento de su complejidad y reducción de gradientes. Las economías, como los ecosistemas, se expanden a través de la riqueza natural de los gradientes que las rodean, y prosperan según su capacidad de adquirir mecanismos, conscientes o no, para degradarlos. Éste puede ser un proceso asintótico, pero ni mucho menos cerrado o mecánicamente predecible. Las innovaciones en el mercado, como la evolución de nuevos organismos capaces de utilizar recursos viejos de maneras nuevas, o de encontrar recursos explotables completamente nuevos, aseguran que la única economía enteramente estable (como el único ecosistema enteramente estable) no sería en absoluto una economía. Las economías y los mercados, como los organismos y los ecosistemas, son sistemas metaestables de no equilibrio.

El financiero George Soros, discípulo del filósofo australiano Karl Popper, ha ganado miles de millones de dólares a base de capitalizar, como él lo describe, las diferencias entre realidad y percepción, así como la tendencia de esta última, una vez formada, a acelerarse por su propio impulso. Como señala él mismo:

«Vivimos en el mismo universo que estamos intentando comprender, y nuestras percepciones pueden influir en los sucesos de los que somos partícipes. Si nuestros pensamientos pertenecieran a un universo y su tema a otro, la verdad podría estar dentro de nuestro alcance. Esto puede valer para la ciencia natural, pero en los asuntos sociales y políticos las percepciones de los participantes contribuyen a la determinación de la realidad. En estas situaciones, los hechos no necesariamente constituyen criterios fiables para juzgar la verdad de los enunciados. Hay una conexión de dos sentidos —un mecanismo retroactivo— entre pensamiento y hechos [...]. Uno de los logros de Popper fue demostrar que una teoría como el marxismo no tiene la categoría de ciencia. En el caso del *laissez-faire*, la pretensión científica es más difícil de cuestionar, porque se basa en la teoría económica, y la economía es la más reputada de las ciencias sociales. No se puede equiparar así como así la economía de mercado con la economía marxista. Pero, afirmo, la ideología del *laissez-faire* representa la misma perversión de verdades supuestamente científicas que el

marxismo-leninismo. El principal fundamento científico de la ideología del *laissez-faire* es la teoría de que los mercados libremente competitivos equilibran la oferta y la demanda y aseguran la distribución óptima de los recursos. Esto se acepta ampliamente como una verdad eterna, y en cierto sentido lo es [...]. Pero [...], tal como se formuló originalmente, la teoría de la competencia perfecta, del equilibrio natural de la oferta y la demanda, asumía un conocimiento perfecto, productos homogéneos y fácilmente divisibles, y un número de participantes lo bastante grande para que ningún individuo solo pudiera influir en el precio de mercado. La premisa de conocimiento perfecto se demostró insostenible, así que se substituyó por un ingenioso artificio. La oferta y la demanda se consideraron independientes [...]. Esta condición de independencia no es conciliable con la realidad, al menos en lo que concierne a los mercados financieros (y éstos tienen un papel crucial en la distribución de los recursos). En los mercados financieros, compradores y vendedores quieren descartar un futuro que dependa de sus propias decisiones. La forma de las curvas de la oferta y la demanda no puede darse por sentada, porque ambas incorporan expectativas sobre hechos conformados por esas mismas expectativas. Hay un mecanismo retroactivo de dos sentidos entre el pensamiento de los participantes en el mercado y la situación en la que piensan. Esta “reflexividad” explica tanto la comprensión imperfecta de los participantes (el reconocimiento de cuál es la base del concepto de la sociedad abierta) como la indeterminación del proceso en el que participan. Si las curvas de la oferta y la demanda no son independientes, ¿cómo se determinan los precios de mercado? Si observamos el comportamiento de los mercados financieros, lo que vemos es que, en vez de tender al equilibrio, los precios continúan fluctuando en relación con las expectativas de compradores y vendedores. Durante largos periodos, los precios se apartan de cualquier equilibrio teórico, y aunque al final muestren una tendencia a volver, el equilibrio no es el que se habría alcanzado sin el periodo intermedio. Pero el concepto de equilibrio resiste».²

Soros, quien se ha hecho rico aplicando su teoría (que se basa en identificar separaciones entre realidad y percepción y sacar partido de su acuerdo), habla de «reflexividad», y señala que las teorías económicas no son independientes, sino que interaccionan de manera retroactiva con la realidad económica. Así pues, su propia teoría está inmersa en el proceso de relativismo económico que él mismo describe. No obstante, su distinción de la naturaleza reflexiva de los mercados y su negación de un equi-

librio simple suenan bien. Por ejemplo, en los mercados líquidos (indicativo de flujo) los cambios de un día para otro en la oferta y la demanda (como los provocados por las noticias) pueden causar «huecos» o «ventanas» en los gráficos que emplean los negociantes para indicar cambios o continuaciones en las tendencias de los precios. Si el comercio reduce los gradientes de oferta-demanda, el arbitraje reduce los gradientes de precios; y el dinero ganado con ambos tiende a incrementar el flujo de bienes entre los nodos de sistemas cada vez más interconectados. Puesto que el comercio requiere reconocer la oferta y la demanda, así como los diferenciales de precio en puntos dispares, estas prácticas económicas seleccionan formas de transporte y comunicación cada vez más sofisticadas (la raíz del nexo electrónico que Marshall McLuhan llamó «la aldea global» allá por los años sesenta). Los medios de comunicación, al permitir el reconocimiento y rectificación de los gradientes de oferta-demanda, están integralmente implicados en el crecimiento de la economía global.

Pero un siglo antes de McLuhan, en la década de 1860, la estrecha relación entre comercio y conexión social ya fue apreciada por un contemporáneo de Darwin, el novelista y teórico de la evolución de las máquinas Samuel Butler:

«[Llegará un día] en que todos los hombres de todos los lugares, sin pérdida de tiempo, serán conocedores a través de sus sentidos de todo lo que desean saber de los otros lugares, a un coste bajo, de manera que el colono de un país remoto podrá estar al tanto de la venta de su lana en Londres y tratar con el comprador en persona; podrá estar sentado en una silla dentro de su choza mientras escucha la representación de *Israel en Egipto* en el Exeter Hall; podrá probar un helado en el Rakaia [un río neozelandés], que pagará y recibirá en el teatro de la ópera italiano [...] [Es] la gran aniquilación de tiempo y lugar por la que todos estamos esforzándonos, y que en una pequeña parte se nos ha permitido ver realizada en la actualidad».³

A través de la historia de la economía (la palabra deriva de los términos griegos que significan «casa» y «medida»), la «gran aniquilación» espaciotemporal de Butler ha ido avanzando. A medida que las sociedades se hacían más elaboradas, el trueque se reemplazó por el dinero o sus equivalentes (conchas en algunos pueblos isleños, ganado en África, arroz entre los japoneses del siglo XIII) a modo de denominador común físico, cuyo principal efecto práctico fue facilitar un flujo de bienes incrementado tanto interior como entre sociedades. (El equivalente químico intracelular del dinero es el ATP, un compuesto endergónico, o almace-

nador de energía, que puede gastarse exergónicamente mediante la liberación de su energía. Como hemos discutido en el capítulo sobre el origen de la vida, Freeman Dyson y otros que defienden una visión metabólica antes que genética de la vida sugieren que el ATP vino antes que el ARN y el ADN.)

El trueque parece un ejemplo humano de un proceso natural, el intercambio de bienes entre agentes que incrementa la conectividad y el reciclado en sistemas cada vez más diferenciados. Puesto que las células y los organismos son sistemas abiertos fuera de equilibrio, sus comportamientos se «seleccionarán» siempre que contribuyan a organizar sistemas reductores de gradientes mayores y más eficientes. Como muchos organismos, los seres humanos son agentes sensitivos y móviles, pero no necesariamente racionales. Y como sus primos naturales, los ecosistemas, las economías se expanden y organizan en respuesta a demandas energéticas. El flujo de energía a través de sistemas complejos constituye la base de la obtención y el reciclado de materiales en las economías, que reducen gradientes naturales (como el gradiente de potencial redox entre combustibles fósiles y oxígeno) y «sintéticos» (como los diferenciales de precios). Como hemos visto al principio, la destrucción de un gradiente para liberar su energía potencial requiere una energía de activación, E_a , de ahí que ganar dinero requiera dinero, al igual que la obtención de energía metabólica requiere la combustión catabólica del alimento. Así como los ecosistemas exuberantes reflejan tasas aumentadas de reducción de gradientes, así también la prosperidad de una economía boyante puede atribuirse a la expansión de los flujos de energía, o del dinero, las acciones y otros instrumentos que los representan temporalmente. Hay controversia sobre si los bancos centrales, al incrementar el dinero disponible para proporcionar estímulo económico (en esencia, a base de imprimir dinero; por ejemplo, rebajando los tipos de interés), pueden producir riqueza real,⁴ o acaban suscitando secuelas negativas. De acuerdo con esta segunda tesis, defendida por una escuela económica austriaca asociada a Von Mises,⁵ la expansión monetaria inevitablemente conduce a la quiebra, la recesión o la depresión económica, porque la política de facilitar el crédito de los bancos centrales instaura una ilusión de riqueza que tarde o temprano se ajusta a la realidad de penuria económica. La inflación es un ejemplo de este ajuste cuando la riqueza creada a través de títulos ya no es capaz de comprar lo que se desea (como la inversión en un negocio) más de lo que lo era la sofocante carencia de dinero precedente. En esta visión, el valor de fortunas en forma de acciones de bolsa y otros títulos será ajustado finalmente a la baja por las fuerzas del mercado. En última instancia, el incremento de símbolos de valor del estilo de accio-

nes, papel moneda o créditos expandidos puede destruir la confianza, ya que la deuda simbólica o los instrumentos de comercio no tienen un límite natural, mientras que la demanda que se supone que satisfacen no es imaginaria. En el límite, la creación de deuda puede causar quiebras de la bolsa, bancarrotas y devaluación de la moneda nacional. Sin embargo, es un acto de fe que de común acuerdo crea dinero y crédito en primera instancia, y sin el «espejismo» de un medio de intercambio común las economías tal como las conocemos apenas podrían existir.

Históricamente, los mercados surgen a lo largo de rutas comerciales y se concentran en las ciudades, incrementando el flujo de materiales entre seres humanos, cuya organización se hace más eficiente cuando se diferencian en tareas y profesiones especializadas. No obstante, ni las ciudades ni el intercambio (los procesos fundamentales que reducen un gradiente de oferta-demanda) son objeto de tratamiento explícito por parte de la teoría económica tradicional. La economía ortodoxa asume que una economía es un sistema eficiente y en equilibrio estabilizado por actores racionales. Pero ni los agentes de los sistemas económicos son especialmente racionales (considérese la codicia y el miedo de las subidas y bajadas de la bolsa) ni las economías, que se alimentan de reservas externas de alimento y combustible, están en un equilibrio genuino. A pesar de las matemáticas que pretenden describirlas, las economías no son sistemas estables, sino sistemas disipativos metaestables. Como los organismos y los ecosistemas, tienden a crecer y encontrar maneras de explotar gradientes para reducir su entropía y reciclar materiales.

Según el economista C. Dyke:

«Podría parecer que lo más juicioso sería tratar los sistemas económicos como si fueran meros *análogos* de las estructuras disipativas normalmente consideradas en la literatura de la TNE. Pero no creo que esto sea correcto [...]. El principal criterio de las estructuras disipativas es su dependencia temporal. Este criterio ciertamente debe cumplirse. Resulta bastante evidente que los sistemas económicos lo cumplen; pero hemos de procurar ver claramente *cómo* lo cumplen. Porque buena parte de la teoría económica clásica, neoclásica y ortodoxa hace uso de técnicas que rebajan u oscurecen la dependencia temporal esencial de los procesos económicos. En particular, los análisis de equilibrio tratan los procesos de intercambio económico como si fueran reversibles. Éste es el meollo de la teoría de precios ortodoxa y su sistema de contabilidad. Sin embargo, en otro sentido, to-

davía dentro de la teoría ortodoxa, los procesos de intercambio *no pueden* ser reversibles. La vía hacia el cierre de una negociación no puede ser recorrida por negociantes racionales. En cualquier caso, es una ilusión pensar que la economía ortodoxa trata del comercio. En ninguna parte se examina el proceso de intercambio comercial. Sólo se examinan las consecuencias lógicas de una serie de asunciones, como que el sistema de negociación sólo incluye hombres económicamente racionales [...]. Lo que hace la *TNE* es mostrarnos que hay interrelaciones entre nuestras estructuras sociales y el flujo material requerido para sustentarlas [...]; nos dice que la deuda entrópica en la que incurre nuestra elaborada organización puede pagarse de varias maneras; que el contenido de información de nuestro sistema social está necesariamente conectado con el flujo material requerido para su mantenimiento. Por ejemplo, sólo para fijar ideas, la línea estándar (desde Hume) sostiene que los sistemas económicos se caracterizan por una escasez moderada. Pero la escasez no es la condición primaria de una economía. Las economías descansan sobre gradientes. Dependen de encontrar maneras de mantener el flujo material adecuado. A veces esto es reconocido por los propios economistas [...]. Pero es más frecuente que la necesidad de los gradientes no se reconozca».⁶

En un comentario sobre Janet Jacobs,⁷ quien identificó el papel central de las ciudades en la economía, Dyke apunta que

«a pesar del énfasis bifurcado en individuos y naciones en cuanto que constituyentes importantes de los sistemas económicos (en micro- y macroeconomía, respectivamente), los componentes estructurales dominantes de la vida económica son las ciudades, que son centros de reemplazo de importaciones y sus regiones asociadas. Jacobs no ofrece una descripción general del surgimiento de tales ciudades. Quizá no la haya. Pero, una vez establecidas, organizan una economía que prospera a un plazo significativamente largo. Estas ciudades deben contrastarse con otras que *no* organizan economías viables. La vida económica en estas últimas y alrededor de ellas es muy diferente de la vida económica en torno a las ciudades favorecidas. Pues bien, nadie que esté familiarizado con la *TNE* y lea el libro de Jacobs puede dejar de advertir la semejanza de estas ciudades favorecidas con estructuras disipativas. La ausencia de una descripción general de su génesis es en sí misma indicativa del fracaso de los modelos causales lineales para explicarlas».⁸

La asunción de que los sistemas económicos humanos están esencialmente en equilibrio queda invalidada por la constatación de que la principal fuente de nuestra riqueza es el Sol, cuya energía se almacena en la fotosíntesis que llevan a cabo, por ejemplo, las plantas cultivadas, las cuales proporcionan el recurso básico original para la explosión demográfica humana. Como otros sistemas termodinámicos que hemos analizado, los sistemas económicos humanos son abiertos. No están aislados, como suele asumir la teoría, sino que se alimentan de los gradientes que explotan. Vernadsky, enfatizando el carácter energético de la biosfera, habló de un sistema terrestre-solar y remitió el movimiento natural de los organismos (en el cual incluía no sólo las migraciones de las aves, sino también los flujos globales humanamente asistidos de productos y máquinas, debido, quizás, a la impresión que le causó el movimiento global de material bélico durante la primera guerra mundial) a la energía solar biológicamente transformada en la superficie terrestre. Los preludios ecológicos de las alzas y bajas económicas incluyen las extinciones en masa asociadas a impactos de meteoritos. Las «quiebras» arcaicas podrían haber venido dadas por causas particulares, como el agotamiento de las fuentes apropiadas de alimento hidrocarbonado para la fermentación heterotrófica bacteriana, o del hidrógeno y el sulfuro de hidrógeno del que dependían las bacterias fotosintéticas primigenias. Pero, puesto que la vida era un sistema termodinámico en evolución, siempre había variantes mutantes en la recámara que podían hacer un uso mejor de la energía solar y otros recursos energéticos. La conversión de la energía solar en formas de vida activa, células y grupos de células concentraba, en la expresión inexacta pero evocadora de Vernadsky, la «presión de la vida»: los organismos no sólo competían por los recursos, sino también por imponerse dentro de un dominio de materiales limitados pero de energía virtualmente inagotable. La máxima de Harold Morowitz, «la energía fluye, la materia se recicla», se aplica también a los problemas especiales de la vida económica.

Del mismo modo que la prosperidad económica va seguida de la quiebra, la mayor invención metabólica en la historia de la vida, esto es, el uso de agua como fuente de hidrógeno por los ancestros fotosintéticos de las plantas, condujo a la peor «depresión» que ha contemplado nuestro planeta. La descomposición del agua (H_2O) asistida por energía lumínica para obtener hidrógeno producía oxígeno libre como producto secundario, lo que elevó los niveles de oxígeno gaseoso en el aire de virtualmente nada a una quinta parte de la atmósfera. El oxígeno es un gas reactivo que destruía muchas de las bacterias verdes que lo producían, lo cual otorgaba ventaja a los organismos que lo toleraban. Las bacterias verdes que crea-

ron la amenaza sobrevivieron transformadas en los plástidos (las partes coloreadas de verde, y a veces púrpura) de algas y plantas. Las bacterias que neutralizaban el oxígeno empleándolo para su respiración también se propagaron como el fuego, y se convirtieron en las mitocondrias citoplasmáticas de animales, plantas, hongos y algas. La prosperidad y la depresión a escala global antecedieron a la humanidad, con crisis de contaminación y extinción en masa como secuelas de la producción de entropía que envenenó a los organismos reductores de gradientes. Como sugiere Dyke, las similitudes entre las economías y los sistemas termodinámicos de no equilibrio parecen ser estructurales y formales, no meras analogías. Las economías, a pesar de su dependencia de agentes humanos, *son* sistemas TNE. Los sistemas ecológicos y económicos comparten la necesidad de sumideros además de fuentes. Con eficiencias variables, convierten el excedente energético en organizaciones complejas, cohesionando los organismos en redes de orden superior con metabolismos y problemas de eliminación de desechos a gran escala. (También son innovadores y, como los organismos, pueden encontrar nuevas fuentes de energía para reciclar productos de desecho entrópico en estructuras funcionales.)

«La basura, el hollín y las aguas residuales parecen un molesto e inconveniente subproducto de nuestras vidas y actividades más que una consecuencia necesaria de ellas. Pero sin un gradiente por el que pueda caer el flujo material, ninguna estructura disipativa puede mantenerse estable.»⁹ Ahora bien, lejos de promover una producción de desechos sin freno, Dyke afirma que para mantener nuestra existencia económica debemos reconocer que «nuestra existencia como estructuras disipativas define un espacio de posibilidades para nosotros, y lo hace de manera bastante estricta». Nuestros ancestros humanos, que eran mucho menos numerosos antes de las innovaciones de la agricultura, tendían a ser nómadas que no se preocupaban por la destrucción de su entorno, porque se trasladaban a otro campamento. Con la presente densidad de población, ya no podemos permitirnos este lujo, lo que nos obliga, insinúa Dyke, a integrar los problemas inevitables derivados de la producción de entropía en nuestros cálculos de la riqueza económica. Aquí vale la pena señalar que todo incentivo político o gubernamental dirigido a la industria del petróleo actúa como un control estatal centralizado que interfiere con las fuerzas del mercado, las cuales, en su ausencia, tenderían a promover recursos relativamente renovables como la energía solar y el viento, menos dañinos para el medio ambiente, así como las células de hidrógeno y otras tecnologías que reflejan mejor las «biotecnologías naturales» de la Tierra.¹⁰ En resumen, el consumo de recursos en la economía estándar parece diferente del que se produciría en una economía basada en la TNE, que ten-

dría en cuenta de manera explícita tanto la naturaleza no equilibrada de la economía como la relativa estabilidad de algunos recursos básicos y gradientes respecto de otros.

Aunque la economía ortodoxa a menudo las mete en el mismo saco, hay una diferencia entre las entidades estables que surgen para reducir gradualmente un flujo asociado a un gradiente, aprovechándose de su trabajo, y aquellas que canalizan el excedente y los beneficios para perpetuar su expansión. El comercio promotor de organización distribuye materiales y energía, incluida la energía humana, dentro de una economía.

Los mercados comienzan siguiendo gradientes e intercambios, pero también pueden dedicar parte de sus beneficios al incremento de su propia organización, adquiriendo sistemas de crédito, construyendo centros y desviando sus recursos hacia dentro para impulsar el desarrollo económico y, finalmente, producir las bases económicas de civilizaciones y culturas. Si bien las estructuras disipativas económicas pueden surgir más o menos espontáneamente, las economías genuinas incorporan decisiones, reglas y control manipulativo centralizado. Una lonja del viejo oeste norteamericano es un ejemplo de centro de intercambio, aunque todavía no es un mercado. Las vías promotoras de flujos no necesariamente se convierten en mercados, ni todos los mercados se convierten necesariamente en economías plenamente desarrolladas. El hecho de que una puerta de acceso a un gradiente aprovechable no llegue a convertirse en mercado se parece al caso de una pradera que no completa la sucesión hacia un bosque. Debe haber materiales y organización suficientes para canalizar el excedente energético hacia formas más complejas. Por ejemplo, algunos ecosistemas y mercados están claramente constreñidos por la falta de efectivos suficientes para establecer conexiones o por condiciones extremas, como el frío glacial.

El desarrollo abortado de sistemas económicos nacientes puede compararse con las muchas estructuras disipativas que no llegan a convertirse en sistemas coherentes duraderos. La ciudad de un solo producto, como es el caso de las poblaciones mineras, es vulnerable en el mismo sentido en que lo son las especies superespecializadas. Una ciudad o una especie que se consagra con demasiada rigidez a una sola función es vulnerable a los cambios del mercado o del entorno. Algunos pueblos fantasma, por ejemplo, fueron en otro tiempo localidades principalmente mineras, y cuando ya no fueron capaces de producir su recurso (aunque fuera en gran medida un «símbolo», como el oro) pagaron su deuda entrópica. La superespecialización en el combustible hidrocarbonado, mucho menos «sim-

bólico» para la marcha del sistema TNE global, puede tener en retrospectiva efectos «fantasmagóricos» similares.

Como los otros sistemas TNE que hemos examinado (células de Bénard, reacciones BZ, vórtices de Taylor, sistemas prebiológicos, organismos y ecosistemas), la economía es un sistema organizado por flujos de energía. Una economía genuinamente termodinámica reconocería que las economías están estabilizadas, en la medida en que son estables, fuera del equilibrio por flujos materiales y energéticos. Esta economía precisaría de un sistema de contabilidad modificado que incluyera los requerimientos de flujo urbano. Como sugiere Dyke: «Dentro de la economía estándar, todas las decisiones son enmarcables como decisiones de coste/beneficio. Los costes y beneficios se proyectan como asignaciones de recursos, incluyendo la asignación de nuestro propio tiempo y energía, todo dentro del marco de eficiencia “equilibrada”. Salvo en las formas más superficiales, *nunca* examinamos las relaciones entre nuestras pautas de organización social y el flujo material necesario para sustentarlas».¹¹

El más conocido intento académico, en tiempos recientes, de romper con la economía ortodoxa partió de Nicholas Georgescu-Roegen, cuyas ideas fueron abrazadas —quizá demasiado— por el movimiento ecologista de la primera época. Un detallado texto disponible en Internet y compilado por la New School en Nueva York,¹² describe a Georgescu-Roegen como «uno de los pensadores más notables y profundos de la economía moderna, y uno de los pocos cuya reputación e influencia, a pesar de su relativa desatención en vida, no han hecho más que aumentar con el tiempo y prometen seguir aumentando».

Formado en estadística matemática en Bucarest y la Sorbona, Georgescu-Roegen se doctoró a los veinticuatro años. «En la década de los treinta pasó tres años en Harvard, donde aprendió economía con Joseph Schumpeter, y enseguida dejó su sello en este nuevo campo con unos cuantos artículos sobresalientes sobre teoría de productores y consumidores (1935, 1936) [y] proposiciones sobre elección estocástica y preferencias lexicográficas.»¹³ De vuelta a Bucarest, Georgescu-Roegen se puso al servicio del gobierno rumano e intervino en la negociación con la Unión Soviética tras la guerra. Luego abandonó la Rumanía comunista en 1948, «escondiéndose con su mujer dentro de barriles a bordo de un buque de carga con destino a Estambul».¹⁴ Consiguió un empleo en la Universidad de Vanderbilt, en Tennessee, donde hizo contribuciones a

«la programación lineal y la teoría general del equilibrio [...], incluyendo el descubrimiento independiente de las condiciones de Hawkins-Simon, una demostración de existencia alternativa para el sistema de Von Neumann, las leyes generales de sustituibilidad para los sistemas de Leontief y [contribuciones a] la teoría marxista de la crisis (1960) [...]. En 1966, Georgescu-Roegen lanzó torpedos críticos [a la teoría económica ortodoxa], contenidos en la lúcida y erudita introducción a su *Analytical Economics* (1966). Aquí expuso sus ideas iniciales sobre un nuevo enfoque biológico o evolutivo de la teoría económica, que desarrolló y consolidó en su obra magna, *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). La tesis de Georgescu-Roegen, entre otras, era que toda economía está sujeta a límites de crecimiento, para lo cual invocaba la segunda ley de la termodinámica (“la energía útil se disipa”). Aunque generalmente ignorado por la corriente principal de la economía, fue encumbrado por el incipiente movimiento ambientalista y, hasta el final de su vida, nunca dejó de hablar de sus ideas para un nuevo enfoque de la teoría económica. Hoy su obra está ganando influencia, y sus intuiciones se están implantando en el nuevo campo de la economía evolutiva».¹⁵

En buena medida, los economistas clásicos y Marx basaron sus teorías en una concepción de la economía como un proceso circular de producción y consumo. Georgescu-Roegen discrepaba acaloradamente:

«[N]inguna otra concepción podría estar más lejos de la interpretación correcta de los hechos. No hay más que tomar en consideración el aspecto físico del proceso económico para ver que este proceso no es circular, sino *unidireccional*. En lo que concierne únicamente a este aspecto físico, el proceso económico consiste en una transformación continua de baja entropía en alta entropía, esto es, en *desechos irre recuperables* o, empleando un término más tópico, *polución*».¹⁶

La asunción del flujo circular equivale a la asunción de que los recursos son inagotables, lo cual constituye una clara violación de la segunda ley. No obstante, la razón por la que apuntamos que las ideas de Georgescu-Roegen quizá se hayan tomado demasiado a pecho es que a finales de los años setenta, en el punto álgido de la crisis energética, apareció un libro titulado *Entropy* (1980), escrito por Jeremy Rifkin, que incluía una entrevista con el Premio Nobel de economía. Por desgracia, el libro predecía ingenuamente, sobre la base de la segunda ley, un inevitable agotamiento de los recursos energéticos. Si bien la noción de no

renovabilidad es clave para el movimiento ecologista (debería hacer que nuestros gobiernos pusiesen freno a su afán acaparador, su estrecho enriquecimiento a base de explotar gradientes, y hacer caso a la voluntad popular de dedicar más dinero a alternativas como la energía eólica en las dos Dakotas o el hidrógeno de los viajes espaciales), la destrucción dictada por la segunda ley también es, como hemos visto, una fuerza creativa. El ímpetu de Georgescu-Roegen contribuyó a abrir las puertas a un necesario enfoque termodinámico. Sin embargo, aunque la segunda ley asegure la polución, no excluye nuevas formas de desarrollo o incluso (como descubrieron las bacterias en sus arcaicas economías metabólicas) el reciclado completo de los desechos. La menguante energía de nuestra economía basada en el petróleo puede estar a punto de dejar tirado lo que queda de civilización en medio de la carretera de lo que pasa por progreso. Pero otras fuentes de energía (eólica, solar o química) esperan a los organismos, humanos o no, lo bastante inteligentes para hacer uso de ellas. Una visión de recursos limitados es un paliativo necesario para la teoría económica ortodoxa, pero debe entenderse en el contexto más amplio de los mercados y economías fuera de equilibrio que encuentran nuevas maneras de desarrollarse, de manera esencialmente natural, a caballo de gradientes. Una ironía de las predicciones pesimistas de los años setenta es que la escasez de recursos, lejos de hacer subir indefinidamente los precios de los minerales y la energía, propició nuevas técnicas de extracción que rebajaron los precios de muchas mercancías. Heinz D. Kurz y Neri Salvadori,¹⁷ de la Universidad de Graz y la Universidad de Pisa respectivamente, argumentan que, a pesar de que las asunciones circulares de la teoría económica clásica o neoclásica tienen importantes ventajas, en última instancia deben acomodar la visión termodinámica de una producción unidireccional en un mundo de recursos agotables.

El pensamiento termodinámico en economía tiene aplicaciones prácticas además de teóricas. El financiero internacional George Soros, como Günter Wächtershäuser, fue espoleado por Karl Popper. Como ya se ha mencionado, Soros sostiene, sobre la base de su propia noción de no equilibrio, que los mercados siempre reaccionan de manera descompensada, porque las creencias se perpetúan y persisten más allá de la realidad. Su hazaña más notoria fue cortocircuitar el Banco de Inglaterra en un sistema de libre mercado, cuando el gobierno estaba intentando mantener el precio de su moneda a base de fabricar demanda. El crédito puede ampliarse indefinidamente, pero se ajusta a las fuentes de riqueza subyacentes de base energética. Soros, operando en los intersticios entre ma-

croeconomías presuntamente racionales, se alimenta de la desconexión entre percepción y realidad (que también podría considerarse un gradiente) y se beneficia de la pérdida asociada a la expectativa injustificada. Los negociantes saben que los mercados son esperablemente emocionales y tienden a perpetuar sus direcciones.

Si un excedente de energía y sus símbolos parecen seleccionar medios cada vez más sofisticados de hacer dinero, así como unos medios de comunicación y reacción cada vez más rápidos para ponerlos en práctica, lo opuesto, una suerte de atrofia financiera y el descenso a culturas más simples, o, al menos, organizaciones termodinámicas más primitivas, es el resultado natural de la merma de recursos y la tensión social.

El historiador de la cultura Howard Bloom identifica un efecto Savonarola, llamado así por el santo del mismo nombre, cuyo ascenso al poder clerical coincidió con la privación material y el anhelo de la otra vida.¹⁸ Cuando soportan la carga de un flujo energético disminuido, las ciudades pueden revertir a modos más primitivos y autoritarios con una redistribución de los recursos más jerárquica y menos equitativa. No importa especialmente si los principios ideológicos que organizan políticamente las comunidades son verdaderos, y menos bajo los reinados del terror que se organizan tras la estela de la privación. La regresión puede ser similar a la de un ecosistema sometido a estrés medioambiental, como ya hemos visto. Por otro lado, cuando los recursos de una sociedad retornan, o se establecen nuevas rutas comerciales de seguimiento de gradientes, como la que benefició a Italia durante el Renacimiento, la relativa abundancia permite una mayor libertad individual. La especulación de Bloom describe la miseria, la tendencia al totalitarismo y la ignorancia de las comunidades humanas materialmente desfavorecidas. Predispuestos a impulsos organizativos arcaicos, la religión y la irracionalidad, los sistemas humanos, como sus contrapartidas TNE no humanas, revierten a patrones de organización previos. Un ejemplo fisiológico de este fenómeno termodinámico ocurre cuando, durante el ejercicio físico intenso, se pasa de la respiración aeróbica a la fermentación. Esta última es un modo metabólico más ancestral que la respiración aeróbica, anterior a la contaminación de la atmósfera primitiva por el oxígeno. Aunque menos eficiente, el cuerpo revierte a la fermentación en condiciones de anoxia muscular. Puede que la transición a modos energéticos más antiguos bajo tensión sea un rasgo universal de los sistemas TNE complejos.

El comportamiento termodinámico de ciudades y mercados desmiente la interpretación darwinista ortodoxa según la cual la selección natural sólo actúa sobre el «individuo», o esa parte divisible del individuo (que literalmente significa «no dividido») que es el gen. Hasta las

bacterias manifiestan conductas de mercado incipientes, juntando sus genes, metabolitos y otros recursos para llevar a cabo actividades y construir estructuras imposibles para una célula sola. Las biopelículas van desde los tapetes microbianos hasta «ciudades» rocosas redondas llamadas «estromatolitos», los más antiguos de los cuales tienen miles de millones de años. Las bacterias evolucionaron por simbiosis hacia nuestros ancestros, las células nucleadas, al principio asexuales y luego atrapadas en ciclos de reproducción sexual. Estas células nucleadas dieron lugar a algas y mohos mucilaginosos, la fase agregada de amebas que la mayor parte del tiempo se alimentan por separado. Las bacterias que aunaron sus genes para formar células nucleadas evolucionaron a su vez hacia los ancestros de los hongos, los recicladores del bosque, las plantas y los animales. A otro nivel de consolidación de «individuos» en grupos con economías de escala, los animales dieron lugar a colmenas de abejas, manadas de lobos, bandadas de aves, ejércitos de hormigas, termiteros y seres humanos con economías globales. La teoría evolutiva estándar es correcta. Sí, los individuos varían y a unos les va mejor que a otros. Pero la superpoblación (testimonio de su éxito) propicia nuevas eficiencias a partir de poblaciones densas, que ocasionalmente emergen como individualidades a nuevos niveles de organización. Variando, el individuo puede convertirse en una parte especializada de una entidad mayor. Así, con el paso del tiempo, la integración funcional tiende a evolucionar hacia niveles cada vez más altos, o al menos más inclusivos. Desde el principio, la condición de sistema abierto de la vida le ha dado el potencial de organizarse en colectivos mayores y más abarcadores. Y la actividad que llamamos comercio, y que se estudia en la disciplina humana de la economía, es en realidad un caso especial de un fenómeno más general, la compartición de productos e información por masas de «individuos» transformadores de energía.

La misma palabra *economía*, en su forma verbal *economizar*, sugiere funcionalidad a través de una elegancia y una eficiencia aumentadas. *Economías de escala* tiene la connotación tanto de ahorro de dinero (un representante de la energía) como de expansión operativa. Éstos son rasgos que vemos en los ecosistemas: crecimiento hasta el límite y retardo de los ciclos que mantienen la forma operacional. La misma expansión y declinación se aplica a compañías e industrias: si son buenas se expanden, pero no sin límite. La diversidad aumenta, así como la interconexión de las compañías; en la economía global, la parte correspondiente a la humanidad tecnológica, eso que Vernadsky llamó la «noosfera», recicla bienes como un ecosistema gigante (sembrado de extraños productos químicos como las botellas de plástico, nunca antes presentes en la biosfera). Pero ni

la síntesis de nuevas moléculas ni sus principios organizadores son originales de la economía humana, que no hace más que seguir los pasos de un sistema mucho mayor y probablemente mucho más estable, el ecosistema global.

Así pues, creemos que nuestra versión ampliada de la segunda ley («la naturaleza aborrece los gradientes») se aplica también a la economía. Aunque más subjetivos que los gradientes físicos y químicos de los sistemas termodinámicos estándares, los gradientes económicos y las organizaciones que los reducen son dignos de consideración. Los gradientes económicos se reducen mediante trueques, transacciones monetarias, instrumentos financieros, mercados negros y corporaciones expansivas. Mediadas por seres humanos racionales y no tan racionales, las economías también se alimentan de energía. Como sus primos biológicos, las economías incrementan su reciclaje y su conectividad a medida que crecen. Como especies que se extinguen, las economías y las monedas nacionales desaparecen en última instancia. Y como en la evolución, donde la biodiversidad puede oscurecer de entrada la direccionalidad, el ruido económico puede oscurecer de entrada la evidencia de un comportamiento no aleatorio y termodinámicamente dirigido. Por ejemplo, si examinamos los negocios individuales efectuados en la bolsa, veremos que unos pocos crecen rápidamente, otros son marginalmente beneficiosos año tras año, y muchos acaban en bancarrota. Si comparamos las empresas individuales cuyas acciones cotizan en bolsa, nos costará apreciar alguna dirección clara. Pero si atendemos al volumen de acciones de todas las compañías, encontraremos un incremento continuado a lo largo del tiempo. Este crecimiento del volumen de negocio total, como el incremento del número de especies con el tiempo, representa un incremento de la energía total obtenida, procesada y degradada por el sistema complejo.

El gradiente económico más obvio y quizá más importante es el gradiente oferta-demanda. Los que incrementan la oferta para satisfacer la demanda, los que reconocen y rectifican gradientes oferta-demanda, y los que crean y luego satisfacen nuevas demandas pueden acumular una riqueza considerable. Todo arbitraje (comercio de instrumentos financieros para sacar partido de las diferencias de precio) es una forma de reconocer y rectificar gradientes de oferta-demanda. Por ejemplo, si el precio del té en China es de dos dólares el kilo y en Irlanda es de cuatro dólares el kilo, cualquier empresario irlandés que pueda comprar el mismo té chino por menos de dos dólares el kilo puede embolsarse la diferencia. Por supuesto, los arbitrades modernos se valen de las telecomunicaciones para comprar instrumentos financieros donde son baratos y venderlos donde son caros, obteniendo beneficios, a veces pingües, de ello.

El efecto de tales transacciones es reducir los diferenciales de precio, lo que conduce a una estabilización de las cotizaciones. Los beneficios obtenibles también promueven nuevas formas de comunicación a larga distancia, de comercio y transporte. La tendencia natural a la reducción de gradientes, trasladada a la esfera económica humana, está detrás de la transformación del planeta en lo que el teórico de la comunicación Marshall McLuhan llamó «la aldea global». McLuhan, cuyo mantra era «el medio es el mensaje», fue uno de los primeros en percibir los inexorables efectos globalizadores de las telecomunicaciones modernas. La fortuna de los Rothschild se amasó antes de la televisión o el teléfono, a base de disponer series de mensajeros para llevar noticias de guerra desde el frente, y de negociar con ventaja en la bolsa de valores antes de que otros supieran lo que ocurría. Los mercados acortan el tiempo y el espacio porque aquellos que encuentran maneras de reducir diferencias de información, y quizá diferencias entre percepción y realidad, de un sitio a otro acumulan beneficios. De este modo, la red de datos dispersos de las sociedades humanas tiende a condensarse y parecerse cada vez más a los órganos sensoriales y de discernimiento de un solo ser.

Los organismos se han juntado antes, aunando cuerpos para la duración de los ciclos vitales mutuos, incluso intercambiando genes. Pero la versión humana del proceso es distinta, porque depende menos de los genes que de los *memes*, símbolos e ideas que nos cohesionan en grupos cada vez más interdependientes. El lenguaje compartido y la expansión de sistemas de intercambio de bienes y servicios —economías— son cruciales para la versión humana de esta transformación. Para nosotros, la expansión de las economías es un proceso termodinámico dependiente de la ruptura de gradientes. Los sistemas abiertos de flujo no sólo divergen para dar lugar a nuevas especies, sino que se fusionan para formar sistemas más grandes y poderosos. El euro, por ejemplo, elimina las comisiones por cambio de moneda, lo que contribuye a romper las fronteras nacionales y los gradientes culturales. El resultado es un incremento en la cantidad y la circulación de bienes dentro de las fronteras europeas. La economía europea puede ahora competir con la norteamericana y la asiática. La tendencia humana de la tribu al reino, a la nación-Estado y a la alianza supranacional no es individual, sino colectiva. Y uno de los lubricantes clave de esta integración, intrínsecamente más internacional que el lenguaje, es el dinero en sus miríadas de formas.

La economía global muestra signos definidos de ser un sistema termodinámico complejo. La circulación y el consumo de productos aumentan y comprenden distancias cada vez mayores. Además, la economía global se ha ido estratificando de tal manera que ciertos productos se fa-

brican en ciertas áreas (automóviles en Japón y Detroit, películas en Hollywood y Nueva Delhi, por ejemplo), una especialización que evoca la diversidad y la capacidad degradativa aumentada de los ecosistemas maduros.

Retrospectivamente, no debería sorprendernos que nuestra economía manifieste procesos orgánicos. Es un sistema termodinámico complejo, conectado a través del ajeteo humano, de nuestras interacciones y transacciones, con la energía del Sol. Así pues, la economía no debe entenderse como un sistema exclusivamente humano y cerrado en sí mismo; compuesta de agentes racionales e irracionales, la economía cabalga sobre el ecosistema global. Aunque no siempre simpática, la telecomunicación global también tiene una conexión termodinámica. Se ha dicho en tono jocoso que vivimos en una «mediocracia» (William Irwin Thompson) y que los individuos modernos aspiran a la mediocridad (Kurt Vonnegut). La reducción a denominadores comunes, un proceso nivelador que reduce las diferencias lingüísticas y culturales, es necesaria para la comunicación entre miembros de poblaciones inteligentes conectadas. Sin embargo, como dijo Robert Frost, la poesía es lo que se pierde en la traducción. La televisión, por ejemplo, reduce historias y noticias complejas a titulares sensacionalistas (al mínimo común denominador, en un sistema cada vez más nervioso). Como individuos podemos afligirnos por la pérdida de diversidad cultural y pensamiento crítico. Pero lo que parece claro es que esta pérdida de diferencia no deja de ser otra reducción de gradientes posibilitada por el desarrollo de un sistema complejo. Si no fuéramos sistemas abiertos, nuestra independencia no podría verse comprometida por la organización de un sistema mayor. Pero lo somos.

Veintiuno, Internet y la mano invisible

La aversión de la naturaleza hacia los gradientes incluso podría ser una ley económica clave. Los propios instrumentos financieros, comenzando por el dinero en efectivo, se negocian fuera de los cuerpos humanos individuales, lo que contribuye a organizar las sociedades y ciudades crecientes de las que todos formamos parte. Aunque simbólicos, el dinero y sus equivalentes contribuyen a reducir todos los productos a un estándar único, lo cual permite intercambiar virtualmente cualquier cosa por cualquier otra. A pesar de que la esclavitud está oficialmente abolida, un joven fue noticia no hace mucho por su intento de subastar su virginidad en eBay, la casa de subastas más grande del mundo. La empresa rechazó su solicitud sobre la base de que lo que pretendía vender era intangible.

No obstante, podemos ver que las innovaciones tecnológicas extracorporales tienden a reducir el gradiente de individualidad entre unas personas y otras, permitiéndonos formar grupos, tribus, naciones y otros superorganismos cuyo poder es muy superior al de cualquier individuo. Las formas específicas de dinero, lenguaje y sistema comercial compartidos nos ligan, rehacen fronteras y nos reorganizan en colectividades nuevas y más poderosas, que nos presionan para conformarnos a ellas, especialmente cuando los recursos escasean.

La capacidad de reconocer gradientes impulsa la evolución de la inteligencia y la percepción (y de nuevos negocios). Un ejemplo inesperado es la innovación, primero por matemáticos y luego por crupieres profesionales, del método de seguimiento de los naipes en el juego del veintiuno. Edward O. Thorpe, un matemático del MIT, fue el primero en publicar un sistema de recuento de cartas que daba una pequeña ventaja a la casa.¹⁹ La idea básica es identificar una preponderancia de números altos y ases en las cartas no entregadas. Puesto que un resto de cartas altas y ases se traduce en una mayor probabilidad tanto de recibir un veintiuno como de que el repartidor «quiebre» (se pase de veintiuno), estar al tanto del contenido en dieces y ases de las cartas remanentes es ventajoso para el jugador. Sin embargo, reconocer esta contingencia estadística requería refinar la técnica de recuento. Lo que nos interesa aquí es que la diferencia identificada cuando un jugador cuenta un número lo bastante alto para apostar o aumentar la apuesta representa un «gradiente informacional».

El gradiente mencionado se da entre cartas altas y cartas bajas. Un «zapato caliente» (un zapato es la serie de mazos de donde el repartidor toma los naipes que reparte) es aquel que es rico en ases y dieces que salen en el curso del juego. Desde la publicación del libro de Thorpe, incluso algo antes, ha habido jugadores profesionales de veintiuno. El mejor de ellos ha ganado cientos de millones de dólares, ha sido expulsado de países cuyos gobiernos inicialmente esperaban que el juego les proporcionara una fuente de ingresos fáciles, y ha mantenido contactos estrechos con el gremio de los casinos. Antes de la segunda guerra mundial, el juego de mesa más popular en los casinos era el de los dados. Ahora es el veintiuno. El gradiente de cartas altas a bajas siempre estuvo ahí. Pero su reconocimiento creó una nueva profesión, y hasta contribuyó a enriquecer a los casinos, que se aprovechaban de los sueños de los jugadores no expertos. (Un poco de conocimiento es peligroso.)

Quienes negocian con acciones, bienes de consumo y monedas (algunos de ellos tuvieron que aprender de los jugadores profesionales cuando toparon con los límites de la casa) también se benefician de gradientes. Una máxima de Wall Street dice: «compra sombreros de paja en

invierno». Este consejo insta esencialmente a explotar un gradiente temporal: hay que comprar lo que será valioso cuando todavía no lo es, y venderlo o subirlo de precio a su debido tiempo. Una táctica relacionada de los negociantes en bolsa es identificar un «hueco», un precio de apertura mayor o menor que el de cierre de la noche anterior. Estos huecos implican incrementos o decrementos no expresados de la noche a la mañana en el balance de la oferta y la demanda. Puesto que representan intereses de compraventa correspondientes a no profesionales (los profesionales no dan órdenes de compra o venta cuando los mercados están cerrados), se piensa que estos huecos son aprovechables cuando se negocian sobre una base regular (la técnica básica consiste en «disipar» el hueco), comprando o vendiendo con la expectativa de que el hueco se cerrará o, si no, de que la tendencia continuará en el mismo sentido. Peter Bennet, un ingeniero electrónico que ha pasado más de tres décadas diseñando sistemas de información y compraventa para negocios financieros, escribió un cuento corto sobre cómo instruir a un ordenador para que reconozca tales huecos.²⁰ El protagonista del cuento, Jamie, es un brujo financiero que emplea un sistema informático capaz de identificar instantáneamente disparidades entre acciones, bienes, bonos y monedas. El ordenador traduce las disparidades de precios en un paisaje tridimensional sobre el que Jamie vuela en realidad virtual; mediante un mando, Jamie nivela los picos, que representan gradientes. En la víspera del nuevo milenio, el Lejano Oriente cierra sus intercambios financieros para evitar contratiempos debido al previsto efecto 2000. Aparece una gran región montañosa, que Jamie nivela rápidamente, embolsándose cientos de millones de dólares en cuestión de minutos.

Otros negocios nuevos que pueden inspeccionarse para el reconocimiento y reducción de gradientes incluyen Amazon, eBay, NetBank y otros supervivientes en la economía de Internet. Aunque muchas compañías y accionistas perdieron dinero (de nuevo, un poco de conocimiento es peligroso), las empresas que sobrevivieron fueron las que se sirvieron de la red para reducir gradientes de oferta-demanda entre compradores y vendedores. Además, las compañías de Internet emplearon la nueva tecnología para prescindir de los intermediarios y reducir costes. Si las corredurías, agencias de viajes, casas de subastas y librerías por Internet pueden ser históricamente únicas, el proceso por el que se enriquecen no lo es. Por ejemplo, mucho antes de que Internet rebajara el precio de las comisiones, aumentando el reciclado global, la construcción del Canal del Erie en 1825 abarató el transporte de alimentos desde el Medio Oeste hasta Nueva York y Boston. El canal eliminó la necesidad de rodear el Niágara o viajar por territorio enemigo (Quebec).

Al minimizar un gradiente de transporte, el Canal del Erie abarató los costes (un 80 % en el precio de la harina, por ejemplo). Asimismo, propició una explosión de las acciones del canal y el consiguiente mercado a la baja. Igualmente, el tendido en 1844 de una línea de telégrafo entre Nueva York y Filadelfia reemplazó mediante electrónica «moderna» un sistema de semáforo (banderas) mucho más lento, lo cual permitió que los precios de los títulos se difundieran con mucha más rapidez y fiabilidad que antes. La primera accionista, la Compañía de las Indias Orientales, mancomunaba recursos para que los inversores pudieran permitirse asumir en conjunto los costes y riesgos de enviar navíos al Nuevo Mundo en busca de especias y oro. Canales, ferrocarriles, telégrafos, teléfonos, estándares monetarios, centros financieros y la red de Internet crearon nuevos conductos que permitían ajustar mejor la oferta a la demanda. Premiando y castigando a los inversores, condujeron a una frenética innovación seguida de un crecimiento más pausado y un aumento de la eficiencia del ajuste de la oferta a la demanda. En el punto álgido de la inflación de los años setenta, con los precios de la energía en una espiral ascendente, parecía que los precios de los bienes de consumo continuarían subiendo para siempre, arrastrando a la perdición a nuestra civilización moderna dependiente de los combustibles fósiles. Desde entonces, desmintiendo en apariencia las predicciones de los ecologistas, muchos precios han bajado, en parte gracias a los avances técnicos en la extracción de recursos como los metales y el petróleo. La misma demanda de bienes en oferta menguante contribuye a incrementar dicha oferta. La extrapolación simplista que no tiene en cuenta la tendencia del gradiente oferta-demanda a rectificarse (aumentando la oferta y bajando precios en ciertos casos) fracasa en sus predicciones económicas.

Parece ser que el capitalismo, como la naturaleza, aborrece los gradientes. En su libro *The Wealth of Nations* (1991), Adam Smith hablaba del temible poder de la «mano invisible» de la economía. Según Smith, la persecución del provecho individual en un mercado libre conduce a una eficiencia general. Las economías se benefician de los individuos y las corporaciones que reducen gradientes de oferta-demanda.

El comercio global es parte de la termodinámica biológica. Los beneficios del movimiento rápido de productos de bajo margen (con poco beneficio por artículo) o del movimiento retardado de los productos de alto margen (con elevado beneficio por artículo) aseguran la circulación biosférica de nuevos productos, materiales y herramientas en las redes autocatalíticas de la vida.

Con el paso del tiempo, cada vez más energía, circulando en ciclos cada vez mayores y más complejos, es reclutada por los sistemas abier-

tos que llamamos vida. De hecho, la propia transformación de un lujo deseado y caro en un bien de consumo barato y disponible (a veces, incluso en una necesidad) puede entenderse como una reducción del gradiente oferta-demanda. «Economizar» es ahorrar a base de comprar más de algo. Pero comprar y vender más representa una expansión del reciclado en un sistema termodinámico. La economización de lo ordinario y lo útil, su incorporación al ámbito comercial, conduce a un reciclado aumentado, a la vez que incrementa los beneficios del vendedor y los ahorros del comprador. Dicho de otro modo, el consumismo y la economización (el incremento de los flujos económicos y el decrecimiento de los precios) son otra manifestación sucesional en sistemas complejos organizados por gradientes. También son procesos de reducción de gradientes que obedecen una lógica termodinámica.

En el presente, para que la sociedad humana global se encuentre resguardada frente al inquietante potencial de algunos para restaurar la mentalidad medieval, será necesario que nos liberemos de la dependencia del petróleo (no sólo el saudí, sino *todo* el petróleo). Ya ha comenzado la investigación de bacterias productoras de hidrógeno susceptibles de clonarse para sintetizar combustible no contaminante. Es un proyecto auspiciado por Celera Genomics, la misma empresa que secuenció el genoma humano. Por supuesto, tales bacterias podrían perturbar la metaestabilidad de la biosfera a su manera, aunque sólo fuera incrementando violentamente la cantidad de energía liberable de forma local. Otras fuentes de energía potenciales incluyen las olas del mar y las células de hidrógeno, cuyo producto de desecho también es agua. De hecho, dada la equivalencia entre materia y energía (como demostrara Einstein en la famosa ecuación $E = mc^2$, que condujo al desarrollo de la bomba atómica), la materia misma es una enorme reserva de energía potencialmente utilizable (aunque el estado actual de nuestra tecnología no nos permite convertir materia en energía, o viceversa, sin grandes dificultades y considerable peligro). Tal vez otras civilizaciones más avanzadas, con las que aún no hemos contactado, hayan aprendido a dominar las interconversiones de materia y energía implícitas en la ecuación de Einstein.

Ciudades y amebas

Los seres humanos, como todas las formas de vida, forman parte de redes ecológicas. Estas redes obedecen reglas termodinámicas para los sistemas disipativos complejos. Como agentes conscientes, podemos reforzar o debilitar las redes ecológicas de las que formamos parte. Comer

carne de buey, por ejemplo, refuerza los ciclos en los que están implicados los cultivos de maíz, el petróleo que propulsa el equipamiento agrícola para alimentar el ganado y los antibióticos administrados en cantidades masivas al ganado para que pueda digerir esta planta, que no forma parte de su dieta tradicional. Los resultados negativos de esta interdependencia incluyen resistencia a los antibióticos, transferida del ganado a las personas, y disminución del número de espermatozoides, posiblemente asociada a los estrógenos usados para engordar el ganado. Hamburguesas, teocracias del petróleo, monocultivos de maíz, resistencia a los antibióticos: nuestras pequeñas elecciones cotidianas, y las de otros que las toman como ejemplo, tienen consecuencias de amplio alcance, acumulativas y, en última instancia, a escala biosférica. Cuando compramos unos productos y no otros, estamos emitiendo un voto ecológico. Las elecciones son continuas, y más que humanas.

También existe un inquietante vínculo entre los ecosistemas estresados y la economía global. El crecimiento demográfico, de miles a miles de millones de personas, no se detiene, alterando las condiciones ancestrales de nuestra especie hasta tal punto que los agentes de estrés ecosistémico (pesticidas, vertidos de petróleo y calor derivado de la actividad urbana, el efecto invernadero del dióxido de carbono y los desagües de las centrales nucleares) tienen un impacto sobre nuestras propias poblaciones. Es de esperar que estas tensiones nos arranquen de nuestra relación «normal» con el medio ambiente, no sólo directamente, sino perturbando los ecosistemas de los que formamos parte. En tiempos de escasez de energía es más probable que surjan jerarquías represivas y conformistas, tan objetables moralmente como efectivas en la asignación de recursos limitados.

Tales jerarquías, marcadas por el liderazgo maquiavélico, el control vertical y hasta el sacrificio sangriento de los «inadaptados», parecen la encarnación del mal. Sin embargo, desde una perspectiva termodinámica, son naturales. Organismos como *Dictyostelium discoideum* comienzan su vida como amebas individuales de vida libre que ondean sus pseudópodos en busca de bacterias. Pero cuando su alimento bacteriano se termina, experimentan una transformación social termodinámicamente mediada cuyo resultado es un organismo de nivel superior. Las amebas se agregan en una masa gelatinosa que se desplaza colectivamente (de ahí su denominación de mohos gelatinosos). Predeciblemente, el colectivo sacrifica algunos de sus miembros para formar un cuerpo integrado mayor, que se erige como un tallo tembloroso compuesto de amebas. ¿Pueden compararse nuestras ciudades respecto de sus habitantes con los mohos gelatinosos respecto de las amebas constituyentes, en el sentido de ser más capaces de alimentarse, algo así como el equivalente humano de masas

ameboides? Así lo creemos. Ningún organismo está aislado; todos están termodinámicamente conectados. Lo que vemos como un «individuo» indisociable puede descomponerse e integrarse en un colectivo. Sus genes y células pueden ser asumidos por sistemas de flujo mayores. Los flujos de energía reconducidos pueden imponer severas presiones sobre los individuos que dependen de ellos. En el caso humano, esto tiene repercusiones políticas desagradables. La construcción de organizaciones colectivas dictatoriales o mercantilistas conlleva la destrucción de las libertades individuales. La vida es un sistema termodinámico complejo, no un paradigma de la virtud. Los orígenes de la tendencia a conformarse y pertenecer a un colectivo, a someterse e integrarse en una totalidad mayor, van más allá del totalitarismo o la ideología humana, y se adentran en las raíces energéticas de los sistemas biológicos estresados.

Sostenibilidad y supervivencia a largo plazo

¿Podemos vivir de manera sostenible en un planeta cada vez más atestado? Hay algunas razones para la esperanza. Los ecosistemas en la fase de clímax no son los únicos reductores de gradientes efectivos. Los sistemas atmosféricos y las corrientes oceánicas también son sistemas disipativos a gran escala con tasas de disipación global similares a las de los bosques maduros. Además, los bosques tienen medios de supervivencia robustos de los que podemos aprender. Uno de los más cruciales consiste en refrenar nuestro crecimiento poblacional e integrarnos de manera más profunda en diversos ecosistemas clímax.²¹ Puesto que nos hemos expandido usando la inteligencia para detectar gradientes no necesariamente sostenibles, la continuidad de la civilización no es una conclusión inevitable. Para asegurarla, debemos seguir los pasos de nuestros compañeros planetarios exitosos. Las ecologías más exitosas a largo plazo implican la fotosíntesis; de hecho, nuestra economía basada en el petróleo se aprovecha de combustibles fósiles fotosintéticos, tesoros enterrados que el resto de la vida había ignorado. Estos tesoros, sin embargo, se están acabando. Además, el acceso a ellos está controlado por alianzas internacionales oligárquicas que no tienen reparo en politizar sus intereses bajo banderas nacionalistas, religiosas o democráticas. La transición a una economía basada en el hidrógeno (cuyo principal producto de desecho sería, admirablemente, el agua) requiere un gran despliegue científico con respaldo gubernamental. El asunto de la energía global siempre entraña riesgos. Los ancestros de las cianobacterias productoras de oxígeno fueron ángeles exterminadores que envenenaron la superficie pla-

netaria antes de crear la atmósfera oxigenada, la cual, junto con el hidrógeno, impulsa toda la vida con la que estamos familiarizados. Es este oxígeno atmosférico que reacciona con el hidrógeno del que la civilización, si quiere mantenerse tal como está, debe aprender a sacar partido.

Para sobrevivir de manera sostenible tenemos que ser como ecosistemas maduros. Esto significa:

Usar gradientes energéticos sostenibles. Esto es lo que hacen los «productores primarios»: bacterias purpúreas y verdeazuladas, algas pardas y verdes, y plantas verdes. Cuando quemamos carbón, petróleo o gas para obtener energía, estamos consumiendo «recursos no renovables», que se agotarán sin ulterior producción primaria. Teóricamente pueden cultivarse bacterias fotosintéticas para la producción barata de hidrógeno combustible. Debemos prescindir de los hidrocarburos productores de dióxido de carbono. El sentido común biosférico sugiere encontrar fuentes alternativas que imiten la multiplicación, por parte de la vida, de subsistemas de salvaguardia redundantes. El viento, la energía hidráulica y la invención de nuevos dispositivos inspirados en la antigua capacidad de la vida de explotar el gradiente redox global son excelentes candidatos a alternativas al petróleo, más en consonancia con la preservación de la libertad individual y la civilización a largo plazo.

Controlar nuestra población. Estaría muy bien conseguir densidades de población ecológicamente ajustadas mediante la planificación, en lugar de mecanismos deletéreos como la guerra y el hambre. En griego, *Prometeo*, el nombre del titán que robó el fuego a los dioses, significa «previsión»; el nombre de su hermano, *Epimeteo*, que se casó con Pandora y abrió su notoria caja, significa «retrospección».

Incrementar la eficiencia energética. Acumular y utilizar la energía de la manera más eficiente posible. Los ecosistemas incrementan su eficiencia a lo largo de la sucesión. Los metabolismos de organismos y ecosistemas funcionan en un modo altamente eficiente en condiciones no patológicas y de estrés relativamente bajo.

Reciclar. Estamos comenzando a hacerlo, pero la vida microbiana perfeccionó el proceso hace miles de millones de años. No sólo nuestros desechos corporales, sino los subproductos tecnológicos deben integrarse en flujos cíclicos si queremos alcanzar la sostenibilidad.*

* El «pensamiento fuera de la caja», una patente de Paul Stamets que implica sembrar cajas de cartón estriado con micelios de hongos y semillas vegetales sin ningún recargo, debería integrarse en nuestra sociedad. Norteamérica produce miles de kilómetros cuadrados de cartón sin blanquear por semana. Las cajas vivas y otras técnicas inteligentes que hagan uso de los antiguos poderes de hongos y bacterias pueden ayudar a reconvertir los eriales en suelo fértil. (*N. de los AA.*)

Restañar las fugas hasta donde sea posible. El agua y los «nutrientes vegetales», en particular el nitrógeno y el fósforo, tienden a perderse. El fósforo concentrado, extraído por la humanidad, es un recurso biosféricamente limitado. Componente del ADN y el ARN (almacenamiento de información) y del ATP (almacenamiento de energía), la distribución medioambiental del fósforo ha sido alterada por el uso industrial de este elemento en abonos, detergentes y otros productos. Buena parte del fósforo dispersado acaba en el mar, donde se diluye aún más. En los próximos siglos la humanidad deberá encontrar maneras de restañar las fugas de los ciclos materiales y reincorporar los desechos en forma de subproductos utilizables.

Adoptar la ecología como visión del mundo. Debemos vivir de manera más simbiótica y «en equilibrio» con el resto del ecosistema global. Para que más de nosotros adoptemos un modo de vida más humano, la ecología debe estar en primer plano político y recibir mucho más apoyo financiero nacional e internacional. Debemos inspeccionar y comprender el papel de nuestra atmósfera, nuestros océanos y las otras especies en los ecosistemas globales y regionales. La ecología nos proporcionará un mejor entendimiento de la significación del aumento del dióxido de carbono en la atmósfera, la sobrepesca y la tala de grandes extensiones de bosque desde Rusia hasta el ecuador.

Promover la diversidad cultural y biológica, más que la uniformidad. La diversidad proporcionará «copias de seguridad» para llevar a cabo procesos importantes en caso de emergencias inevitables.

Promover la interconectividad, pero no hasta el punto de la homogeneidad absoluta. Los ecosistemas sometidos a tensión o privados de energía revierten a fases de organización más tempranas. Estas tendencias son predecibles, y la humanidad no es una excepción.

Si bien la superpoblación está alcanzando cotas inquietantes, el peligro global presente también constituye una oportunidad. Con los fondos y la formación suficientes, ingenieros e inversores pueden identificar gradientes nuevos o alternativos (el viento, por ejemplo, impetuoso en los estados llanos como las dos Dakotas) susceptibles de sustentar nuestros ecosistemas y economías. Los negocios rentables pueden ser generosos porque englobar sistemas subsidiarios en sus redes les permite expandirse. Los economistas estiman que cada dólar gastado en una comunidad pasa por siete a diez manos antes de abandonar la economía local. Este reciclado, característico de los sistemas autocatalíticos, tiene orígenes termodinámicos. Las estrategias publicitarias y promocionales (como

libros autopublicados que anuncian cómo hacerse rico escribiendo libros autopublicados) han entendido desde hace tiempo que la propaganda puede resultar veraz. Las elecciones sabias y las desacertadas pueden propagarse rápidamente a través de redes inteligentes dependientes de la exergía o energía disponible. A largo plazo, las malas elecciones se descartarán porque, una vez más, la reducción máxima de gradientes puede favorecer el crecimiento a corto plazo, pero no es sostenible. Aunque en este libro nos hemos centrado en la ecología, y desde luego no somos economistas, queremos compartir con los lectores el entusiasmo que sentimos por el potencial de una termodinámica de gradientes para iluminar los procesos de flujo en economía.

Tanta belleza, al lado
 de una estación tan breve,
 sugiere a nuestra atónita razón
 esta desoladora conjetura:
 el mundo fue creado sin ningún fin o *telos*
 y si —como nos dirían algunos—
 hay una meta,
 no somos nosotros.

Joseph Brodsky

*Teleología y sus descontentos:
 una breve historia del propósito en la ciencia y la religión*

Hemos dejado para el final del libro un argumento bien simple que puede tener implicaciones filosóficas profundas: la naturaleza intencional de la vida, entendida en sentido amplio, tiene un origen termodinámico. Aunque el diseño tiene connotaciones religiosas, también describe el fenómeno observable de la *orientación hacia una meta futura*. Esta orientación puede ir desde una bacteria que nada a lo largo de un gradiente químico hacia una fuente de alimento (o se aleja de una toxina) hasta un alto ejecutivo que planea una OPA hostil sobre una compañía rival. Lo que queremos decir es que el diseño, en este sentido inclusivo, desde el movimiento orientado hasta la planificación consciente a largo plazo, refleja las ventajas acumuladas por los sistemas vivos que se aseguran el acceso a gradientes energéticos. Así, para nosotros, la finalidad de la vida tiene un origen termodinámico. La «quimiotaxis» es la denominación técnica del movimiento a lo largo de un gradiente químico. Hasta los organismos más simples manifiestan quimiotaxis. Incluso hay procariontes, las magnetobacterias, que nadan hacia los polos magnéticos de la Tierra. Otras células más complejas exhiben comportamientos más sofisticados. No es necesario considerar que las células tienen conciencia, ni invocar una intención última de toda la existencia, para llamar la atención sobre la profundidad y amplitud de los comportamientos orientados a un fin. La vida es intencional. Esto es cierto con independencia de que haya o no

alguna meta final elevada o plan divino. Aunque la vida sea contemplada como un sistema energético complejo del todo natural, tal como hemos hecho en este libro, su finalidad es innegable. Los seres vivos buscan gradientes y muestran dirección en su desarrollo individual, relaciones ecológicas y evolución general. Esta tendencia de los organismos a la acción dirigida la atribuimos a su especial relación con la segunda ley, a cuyo cumplimiento contribuyen generando aleatoriedad, principalmente en forma de calor entrópico, mientras explotan gradientes y replican sus organizaciones complejas. La ciencia se basa en las observaciones, y si negamos la direccionalidad evidente en la ecología y la evolución no estaremos siendo científicos. Esta finalidad de la vida no implica la existencia de un punto final cognoscible, y menos que ese punto final seamos nosotros. Lo que significa es que somos parte de un proceso creativo a escala cósmica que genera estructura, complejidad e inteligencia a la par que destruye gradientes.

En la historia de la filosofía, Aristóteles, a menudo considerado el primer biólogo, fue también el primero en tratar la cuestión del designio. A diferencia de su maestro Platón, quien postulaba un dominio de perfección invisible, Aristóteles estaba más interesado en la observación empírica. Le intrigaba sobre todo la aparente finalidad de los organismos, su tendencia a desarrollarse según un plan preestablecido que, sin embargo, él no consideraba impuesto por un designio externo. De hecho, para Aristóteles era tan importante esta finalidad orgánica observada, concerniente al organismo entero, que criticó a filósofos anteriores como Demócrito, quien había argumentado que todos los fenómenos podían explicarse a partir de sus partes, sus átomos. Aristóteles objetó que en los organismos había algo de lo que carecían los sistemas no vivos. Aunque no podía decir exactamente qué era lo que dirigía la actividad de los organismos como totalidades y los conducía a una forma madura específica, Aristóteles le dio el nombre de *entelequia*, palabra que contiene la raíz *telos*, designio o finalidad, en griego.

Tras la expansión del monoteísmo, el pensamiento griego fue transmitido a Europa por los sabios árabes. Las ideas aristotélicas sobre la finalidad, integradas en la doctrina católica por santo Tomás de Aquino y otros, se confundieron con la idea de un creador intencional. En el Renacimiento, Descartes argumentó que, salvo las personas y Dios, todas las cosas podían verse como máquinas, como parte de la *res extensa*. La gente y Dios formaban parte de la *res cogitans*, la realidad pensante. Sólo esta última podía tener un designio real. Una máquina o un autómatas podía manifestar algo parecido a un designio, pero en realidad era un juguete que no actuaba por sí mismo. El evolucionismo predarwinista añá-

dió más confusión. Lamarck y otros argumentaron que, a base de intentar algo de manera intencionada, el esfuerzo de un organismo podía transmitirse a su descendencia (el ejemplo clásico de la jirafa intentando alcanzar hojas cada vez más altas). Sin embargo, la idea de que el comportamiento intencional en una generación podía dar lugar a rasgos heredables quedó invalidada por el descubrimiento de un mecanismo genético de la herencia que se replicaba a sí mismo y construía cuerpos hechos de proteínas codificadas. Irónicamente, esta concepción excluyó el designio del ámbito de la ciencia correcta, que Descartes había establecido como un dominio de puro mecanismo, esto es, de acción y reacción mecánicas. No obstante, el triunfo de la biología evolutiva fue el de conectarnos con los otros animales y con todas las formas de vida en un único proceso. La continuación de este espíritu de conexión humana con el resto de formas de vida como sistemas naturales hace altamente improbable que sólo nosotros exhibamos un designio genuino, mientras que la realidad orgánica restante sólo lo simule. Si esto fuera cierto, significaría que un perro que araña una puerta queriendo salir «en realidad» no muestra un comportamiento intencional como el nuestro al echar mano de nuestras llaves para abrir esa puerta. Más probable es que el comportamiento del perro sea tan genuinamente intencional como el nuestro (aunque, por supuesto, su planificación sea más limitada) y que tales conductas intencionales no sean especiales ni aisladas, ni un don divino, sino que sus antecedentes haya que buscarlos en el comportamiento de los sistemas naturales. Nos apresuramos a añadir que esta concepción es más congruente con una perspectiva evolutiva que con la visión monoteísta tradicional.

Una complicación añadida, pero no final, es que el lenguaje es inherentemente teleológico (en el sentido de que tiene que ver con fines y metas). Por ejemplo, el lenguaje hablado o escrito no puede usarse por mucho tiempo sin tener que recurrir a las preposiciones *a* y *para* (palabras simples que denotan orientación futura). Así, incluso los biólogos, que (en la tradición cartesiana) no querrían «caer en la trampa» de emplear palabras que sugieran designio (debido a sus connotaciones religiosas, Descartes intentó neutralizarlas confinándolas al dominio humano y divino), acaban haciéndolo cuando dicen cosas como «los ancestros de las aves adquirieron plumas para su aislamiento térmico, preparando fortuitamente el camino para la evolución del vuelo».

Así pues, es fácil ver que factores históricos han dificultado el tratamiento científico del designio. Este concepto se ha asociado durante siglos a la religión, que, como todos sabemos, a menudo ha estado enfrentada a la ciencia, con especial virulencia en la pugna con la biología evolutiva acerca de nuestros orígenes. Debido a estos factores acumulativos, hablar

de diseño en biología ha sido virtualmente tabú. No obstante, el tema es crucial por, al menos, dos razones. En primer lugar, como hemos visto, los sistemas TNE, organizados por gradientes, tienen un estado final natural: el equilibrio termodinámico. Esto en sí mismo prueba que no son meras reacciones al azar, sino que están organizados para una función (que es otra manera más «mecánica» de decir que tienen un diseño). En segundo lugar, la vida misma es un ejemplo esplendoroso de sistema orientado a un fin. De este modo, puede que tanto la ciencia como la religión estén perdiendo el barco en lo que respecta a su comprensión del diseño, o la función. Sea tirándose los trastos o «acordando estar en desacuerdo» y manteniendo separados sus respectivos dominios, en secreto convienen en que el diseño es una cuestión religiosa y humana, mientras que la función mecánica (pero ¿por diseño de quién?) es un tema científico. Nosotros sugerimos lo contrario. Sostenemos que la conducta orientada a un fin y la funcionalidad tal como las experimentamos en nosotros mismos y observamos en otros animales y organismos es una derivación de los sistemas reductores de gradientes no vivos. En definitiva, todos los sistemas TNE tienen una función natural básica: reducir un gradiente ambiental.

La naturalidad de la función

Aunque la base natural del comportamiento intencional de la vida que proponemos puede parecer degradante de entrada, también es estimulante. Nuestra propuesta debe situarse en el contexto de otros cambios de paradigma científico que nos hacen menos especiales de lo que creíamos, a la vez que nos vinculan más íntimamente con la naturaleza no humana. Ligar nuestro comportamiento intencional a la función de la vida como sistema complejo reductor de gradientes parece un paso más en esta tradición científica de incrementar nuestro conocimiento en detrimento de nuestra arrogancia. La intuición de Copérnico de que la Tierra no era el centro del sistema solar incomodó a los que pensaban que éramos literalmente el centro del universo. Situar al Sol en el centro fue una bofetada para nuestro ego, pero también una descripción matemáticamente más elegante de nuestra posición y nuestro movimiento en el espacio. Darwin empeoró las cosas cuando afirmó que evolucionamos a partir de ancestros simiescos. Otra bofetada a nuestro ego. La biología molecular y la microbiología aumentan la presión al mostrar, mediante evidencias genéticas difícilmente cuestionables, que nuestras células «animales» contienen remanentes de bacterias simbióticas que se juntaron para formar la

base celular de todas las amebas, algas, plantas, hongos y animales. Nuestra intencionalidad, nuestra planificación, pueden contemplarse bajo esta misma luz. Como sistemas TNE organizados para reducir gradientes ambientales y canalizar su energía para nuestro propio desarrollo, somos como los sistemas TNE no vivos que incrementan su complejidad a caballo de un flujo de energía. Así como la materia de la vida (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo) se distribuye por todo el universo, el proceso de la vida (bolsas locales de organización creciente) no es único. Estamos emparentados con otros sistemas energéticos que poseen organización funcional.

Alguien podría objetar que el hecho de que las personas tengan intenciones, de que tengamos una voluntad consciente, hace que tendamos a atribuir estas características a otros sistemas naturales que no las poseen. Aunque hay mucho de cierto en esta objeción (a fin de cuentas, separar la realidad física de los caprichos de los dioses fue crucial para los orígenes del pensamiento científico), quizá vaya demasiado lejos. El problema de este juicio es que nubla nuestra apreciación de la ocurrencia natural de la función en asociación con flujos de energía. Sostenemos que los seres humanos son un ejemplo histórico de larga evolución de tales sistemas termodinámicos surgidos espontáneamente «para» reducir gradientes ambientales. El origen de la vida, como hemos visto, adquiere máximo sentido como una estructura de flujo cíclica que «inventó» un medio informacional de autorrenovación a través de la reproducción química. El origen de la vida está conectado con su función presente como proceso reductor de gradientes. El diseño ha sido excluido de la lista de temas biológicos respetables por razones retóricas e históricas, aparte de científicas. Queremos compensar este desajuste mostrando que la biología, especialmente la evolutiva, puede reconocer el propósito como fenómeno natural de raíces termodinámicas. El antropomorfismo y la personificación marcan los mitos y supersticiones de nuestros antepasados animistas, que veían espíritus dentro de todo lo que se movía. Sin embargo, la idea de que lo vivo es completamente *distinto* de otros procesos es tan insostenible como la idea de que los seres humanos somos radicalmente distintos del resto de organismos. La teoría de la evolución conecta los organismos en el tiempo. La ecología los conecta en el espacio. La química los conecta en cuanto a la estructura. La TNE los conecta en cuanto al proceso.

Mucha gente religiosa cree que somos los protagonistas de una historia universal, con un final feliz en el cielo (si uno se salva) y otro infeliz en el infierno (si uno se condena). Éste es el dominio de lo que la teología cristiana llama escatología, el estudio de los fines de la humanidad.

Nuestro designio está así relacionado con un plan divino, y nuestra conducta puede determinar si nos salvamos o no. En otro sentido religioso, la palabra «propósito» sugiere que, aunque no lo parezca, hay un sentido secreto en todo lo malo que ocurre, y que nada ocurre sin una razón, aunque inicialmente se nos escape. Estos significados de propósito están más ligados al familiar, si bien tortuoso, terreno de los impulsos humanos que a la función tal como la contemplamos y hemos descrito en los sistemas naturales. Pero incluso dentro de la ciencia se han vertido argumentos que explican por qué existen los organismos u otras estructuras de maneras que van más allá de las explicaciones mecánicas estándares y aceptadas. El astrofísico Lee Smolin, por ejemplo, ha sugerido que el universo entero tiene como fin la generación de nuevos universos.¹ Una variación sobre este tema es que nuestro cosmos no contiene vida inteligente (nosotros) por casualidad, sino porque esta forma de vida es parte de una trayectoria de capacidad tecnológica incrementada cuyo resultado final es la generación de nuevos universos a través de la producción de agujeros negros en el laboratorio.²

Estas nociones científicas y religiosas de designio, aunque interesantes, difieren de nuestra descripción del designio como un resultado natural de los sistemas TNE organizados por el gradiente que los suscita y sustenta, y dirigidos a reducirlo. Nuestro concepto de designio, visible en los resultados cuantificables de sistemas de flujo energético, es menos antropocéntrico. Simplemente sugiere que lo que describimos en nosotros mismos y a veces en otros organismos como propósito o comportamiento intencional también se sitúa fuera de nosotros. En este sentido parece enmarcarse en las revoluciones científicas antes mencionadas, que nos conectan con un mundo más amplio en detrimento de nuestra pretensión de ser especiales o únicos.

De las cabañas a la vida: sistemas intencionales simples y complejos

Aunque la vida no tenga un propósito teológico o cosmológico, nos parece intencional a la manera de los sistemas termodinámicos. Podemos decir que la función del corazón es bombear sangre o que el propósito de los pulmones es tomar aire sin miedo a ser criticados. Igualmente, afirmamos, la vida tiene un propósito cuasifisiológico. La vida reduce el gradiente electromagnético entre la extremadamente caliente superficie solar (5800 K) y el extremadamente frío espacio exterior (sólo 2,7 K sobre el cero absoluto), y lo hace erigiendo un sistema complejo planetario y disipando entropía, principalmente en forma de calor. La parte del sistema

disipativo de unos 3000 millones de años de antigüedad que reduce mejor el gradiente de temperatura no es la humanizada, sino los frondosos ecosistemas de las selvas tropicales y ecuatoriales. Concluimos que la función básica de la vida, su propósito último, *desde una perspectiva científica*, es el mismo que el de otros sistemas complejos naturales. Pero si la vida es como una versión química de los tornados y las células de Bénard que reducen gradientes de presión y temperatura, ¿por qué muestra una complejidad mucho mayor? La razón parece ser que la vida es un sistema termodinámico genético y replicativo. Esto le permite explotar una fuente de energía, el gradiente solar, mucho más rica que las diferencias de temperatura o los gradientes barométricos que alimentan los sistemas borrascosos (presumiblemente, incluso tormentas tan enormes como la Gran Mancha Roja de Júpiter). Obviamente, se puede hacer más si hay más recursos con los que hacerlo. Alimentándose de la energía solar disponible, la vida se ha copiado a sí misma de manera imperfecta hasta colonizar los últimos rincones de este planeta. Ciertamente, la vida, que tiene un tercio de la edad del universo, ha tenido mucho más tiempo para complicar sus ciclos termodinámicos que, digamos, un vórtice de Taylor.

Como sistemas termodinámicos de larga evolución, exhibimos comportamientos mucho más complejos que los de los sistemas energéticos inanimados. Pero hasta los más simples de tales sistemas revelan un comportamiento intencional. Consideremos, en una pendiente nevada, una cabaña calentada con un fuego de leña.³ El aire de la cabaña no tiene conciencia ni está vivo, pero se comporta como si tuviera una finalidad. El aire caliente exhibe conductas de búsqueda: «intenta» escapar por cualquier grieta disponible (el ojo de una cerradura, o una ventana entreabierta). Un conocido nuestro que se dedicaba al aislamiento térmico de casas vio una vez una serpentina de aire entrar en una habitación a través de un enchufe y subir por la pared; tras recorrer la mitad del techo, y como si cambiara de idea, volvió por el mismo camino hasta el enchufe por donde había entrado. (Los expertos en aislamiento térmico añaden polvo al aire para visualizar su movimiento y así sellar mejor las estancias.) Este comportamiento, que da la impresión de intencionalidad consciente, es teleomático: como la gravedad, es el resultado esperado de una ley natural.

Sexo y muerte

Si un sistema cercano al equilibrio como una serpentina de aire caliente puede manifestar comportamientos que parecen deliberados, entonces la conducta de búsqueda de otros sistemas termodinámicos más

complejos quizá sea de la misma índole. Buena parte del comportamiento animal tiene que ver con encontrar alimento y parejas sexuales, cuidar de la prole y eludir a los predadores. Estos comportamientos mantienen a los sistemas vivos fuera de equilibrio y les permiten seguir degradando gradientes. Así pues, nuestros comportamientos e impulsos alimentarios y sexuales, que nos mantienen como sistemas termodinámicos o perpetúan nuestro linaje cuando nos desgastamos, puede que estén más cerca de los de nuestros primos inanimados de lo que nuestras culturas nos han enseñado a pensar. Freud postuló dos impulsos humanos básicos: *eros*, el impulso sexual, y *thanatos*, el impulso mortal. Ya hemos discutido el primero en términos termodinámicos como el ansia de copular y quizá producir descendencia capaz de continuar la reducción de gradientes más allá de la propia espiral mortal. Pero *thanatos* también puede explicarse como la tendencia de la naturaleza al equilibrio termodinámico. El equilibrio termodinámico equivale a la muerte. El impulso vital, como hemos visto, es doble. La destrucción de gradientes implica la generación espontánea de sistemas complejos: se producen gradientes locales nuevos a la vez que se reducen viejos gradientes globales. Así como los platos caen al suelo por influjo de la ley de la gravedad, nosotros nos vemos impelidos a la muerte y al sexo por influjo de la segunda ley. La diferencia es que, mientras la gravedad actúa sobre nosotros físicamente, la segunda ley actúa a través de nosotros bioquímicamente. Cuando gesticulamos en una conversación animada, acercar nuestras manos a nuestro interlocutor no distorsiona gravitatoriamente su cara en nuestra dirección: aunque la gravedad es una fuerza principal a escala cósmica, sus efectos a nuestra escala son despreciables. No puede decirse lo mismo de la termodinámica, que, a través de su organización de la materia en sistemas cíclicos, incluyendo todos nuestros ancestros, continúa estructurándonos en las profundidades de nuestra organización fisiológica y nuestros impulsos psicológicos.

En nuestra visión, la vida es un medio curiosamente persistente de reducción de gradientes, cuyas peculiaridades no deberían hacernos pasar por alto su reveladora similitud con otros procesos cíclicos naturales que tienden a reducir gradientes. A pesar de su peculiar y larga historia, que nos incluye a nosotros, la vida es un sistema termodinámico que surgió espontáneamente para reducir un gradiente. La humanidad y la vida pueden contemplarse como extensiones de comportamientos dirigidos en sistemas inanimados que buscan maneras (cada vez más eficientes y elaboradas) de alcanzar el equilibrio.

El término general para los comportamientos intencionales es el de *teleología*. Deriva de la raíz griega *telos*, que significa «fin o propósito». El diccionario da tres definiciones. La primera es «el estudio de las evidencias de designio en la naturaleza». La tercera es «el empleo del designio o propósito como explicación de fenómenos naturales». La segunda es «el hecho o carácter atribuido a la naturaleza o procesos naturales de estar dirigidos a un fin o conformados por un propósito». Como se desprende de estas definiciones, la teleología alude a menudo al creacionismo. Pero, como hemos visto, la observación de la naturaleza revela comportamientos intencionales con independencia del designio. Incluso Aristóteles escribió, hace más de dos milenios, que «en los productos naturales la secuencia es invariable, si no hay impedimento. Es absurdo suponer que no hay propósito porque no observamos al agente intencional. El arte no tiene propósito».⁴ El propósito es un asunto resbaladizo, y la teleología se ha descrito como una doncella «sin la que ningún biólogo puede vivir, pero de cuya compañía se avergüenza en público».⁵ La razón de esta actitud es doble: primero, el propósito, o la teleología, existe de diversas formas en la naturaleza y, segundo, la teoría darwiniana de la evolución entra en conflicto con la idea monoteísta bíblica de una creación especial. Sin embargo, a pesar de la reticencia de los científicos profesionales, los organismos están profundamente ligados a la función (no sólo de manera consciente, sino inconsciente, fisiológica y termodinámica).

A la vista de tales complicaciones, Richard O'Grady y Daniel R. Brooks reiteran una división tripartita.⁶ Lo que a menudo se ha descrito a grandes rasgos como «teleología», apuntan, es conveniente dividirlo en *teleología*, *teleonomía* y *teleomática*. Lo teleológico es el propósito que encontramos en los actos deliberados conscientes. En una reflexión sobre la pintura, el artista abstracto De Kooning escribió: «En cuanto se empieza y se descubre lo difícil que es, entonces uno se interesa. Lo tenemos, luego lo perdemos otra vez, y luego volvemos a tenerlo. Uno tiene que cambiar para seguir siendo el mismo».⁷ Éste es un ejemplo de acto artístico, consciente o semiconscientemente deliberado. Pero hay otras clases de procesos intencionales, como el desarrollo de un embrión a partir de un cigoto. Antes de que hubiera Iglesia, su principal influencia intelectual, Aristóteles, escribió: «Si el arte de construir barcos estuviera en la madera, produciría los mismos resultados *por naturaleza*. Por lo tanto, si el propósito está presente en el arte, también lo está en la naturaleza».⁸ Aristóteles, quizás en parte como reacción al énfasis excesivo de Platón en un mundo eterno más allá de lo observable, sugiere que prestemos

atención a los fines de la naturaleza sin invocar ninguna fuerza externa. Cuando así lo hacemos, apreciamos que construir un barco requiere una fuerza externa, en este caso un constructor, mientras que un árbol se construye por sí solo. Pero hay un propósito en ambos.

Aunque asimilado por la doctrina cristiana, Aristóteles no tuvo que vérselas con la competencia entre la causalidad darwiniana, con su énfasis en la adaptación por selección natural como el propósito que se esconde tras los rasgos anatómicos y comportamentales, y la tesis creacionista de que los organismos fueron diseñados por un artista cósmico, esto es, Dios. Para diferenciar entre los diversos conceptos de propósito, Ernst Mayr ha distinguido entre comportamiento teleológico, en el sentido estricto de motivado por un fin consciente, comportamiento teleomático, o promotor de un fin, y comportamiento teleonómico, o dirigido a un fin.⁹ La teleomática es el nivel más básico, e incluye cosas como el equilibrio químico y la gravedad. Una piedra no decide conscientemente caer, ni está genéticamente programada para hacerlo, pero cae hasta un punto final de reposo en el suelo por la acción «teleomática» de la gravedad. Como señalan O'Grady y Brooks, estas divisiones de la teleología están anidadas, de manera que lo teleológico en sentido estricto también es por fuerza teleomático y teleonómico. Una ley de la naturaleza como la gravedad, que promueve la caída de una manzana hacia la superficie del planeta, es teleomática de acuerdo con esta clasificación. Lo mismo puede decirse de la segunda ley de la termodinámica, que promueve la desorganización y la aleatoriedad atómica, la deslocalización de la energía. Lo teleonómico ocupa un dominio intermedio, el de las estructuras darwinianas (como el corazón, cuyo propósito es bombear sangre, o la sangre misma, cuyo propósito es distribuir nutrientes) cuyas funciones deben entenderse en términos de su valor de supervivencia. Un hombre que pinta una casa tiene un propósito consciente, pero una vez comenzada la tarea puede trabajar de manera inconsciente, casi teleonómica, y olvidarse de los movimientos de su mano mientras emprende conscientemente otras tareas. Mientras tanto, su corazón late sin conciencia, desempeñando su antigua función, tan esencial para la supervivencia, con independencia de pensamientos conscientes que podrían interferir en ella. Y ni su propósito consciente de pintar una casa ni su corazón de dos ventrículos, genéticamente determinado pero emocionalmente susceptible, existirían si no se tratara de un sistema TNE, una derivación biológica de la construcción (temporal) de complejidad conforme a los dictados teleomáticos de la segunda ley. Spinoza argumentó que una piedra con libre albedrío pensaría que cae por voluntad propia. En términos de esta división tripartita, según Spinoza, confundiría el aspecto teleomático (dictado por ley) con el as-

pecto teleológico (consciente) de su comportamiento. No podemos sino preguntarnos si nuestro pensamiento (que, con su carácter innovador, es más reciente en términos evolutivos que otras funciones vitales antiguas como la respiración o el metabolismo) no es más que un caso especial, frágil y evolutivamente experimental del propósito de reducir gradientes inherente a la teleomática de la segunda ley. El pensamiento, que imagina numerosas posibilidades potenciales, en su mayoría falaces o irreales, se justifica evolutivamente por el hallazgo ocasional de nuevos gradientes explotables y por ayudar a los animales sociales a coordinar sus actividades sintonizando la percepción y la comunicación. Desde esta posición aventajada, el propósito consciente tal como lo conocemos no es el esplendoroso cénit de la naturaleza, ni la evidencia del designio divino, sino una variación animal, mamífera y primate sobre un tema natural.

Tubos

Creemos que nuestro tratamiento termodinámico arroja luz sobre un tema generalmente tabú en la ciencia: el propósito de la vida. Recurriendo de nuevo a la distinción tripartita de Mayr, la vida parece ser un ascenso teleonómico de la segunda ley teleomática. El comportamiento promotor de un fin (la reducción de gradientes) de los sistemas termodinámicos se ha prolongado evolutivamente en comportamientos dirigidos a un fin. En ciertos organismos, como el hombre que pintaba una casa para dar de comer a su familia, estos comportamientos se han vuelto teleológicos en sentido estricto (la orientación consciente hacia un objetivo, que nos gusta ver como la marca de la superioridad humana, si no de una afinidad con los ángeles).

Pero el pensamiento, tan dependiente del metabolismo de la glucosa, es parte de los medios relativamente estables de reducción de gradientes del cuerpo; ése es su contexto, y hasta el metafísico más incondicional debe comer para sustentar su hábito.

El médico y teórico Eugene Yates, quien no cree que los sistemas vivos funcionen tan lejos del equilibrio, nos comunicó por escrito que

«el hecho de que sólo tengamos unos pocos genes más que un ratón (la diferencia estimada es de ~300) [sugiere que] somos mayormente ratones (en realidad, mayormente mamíferos) y que el gen en sí mismo es un concepto nebuloso y no demasiado importante para lo que más nos interesa: nuestra cacareada conciencia (que también poseen los ratones en menor grado, como conjeturó Darwin)».

Y añade que, si la vida hubiera estado demasiado lejos del equilibrio,

«nunca habría durado 3900 millones de años. Estar lejos del equilibrio es demasiado caro, por lo que es improbable que tales sistemas persistan. No son estables y deben emplear *toda* su energía sólo para existir, lo que no deja nada para comportamientos interesantes, como escribir un poema. Hasta las estrellas de la línea principal arden tranquilamente, y están lo bastante cerca del equilibrio para poderseles aplicar la termodinámica estándar. Sólo cuando comienzan a quedarse sin combustible y se colapsan en supernovas explosivas se alejan del equilibrio. ¡Y a fe que dejan constancia de ello! Las explosiones *están* lejos del equilibrio. Pero los sistemas biológicos no funcionan explosivamente, ni sus motores “petardean”. Con el truco de mantenerse cerca del equilibrio, los seres vivos adquieren complejidad de forma y función a un *bajo* coste energético. Esto lo consiguen inventando “información” como ligadura y como causa. Ninguna otra entidad física hace nada parecido».

Hemos visto que la evolución y los procesos ecológicos exhiben tendencias direccionales que parecen dictadas por la termodinámica. Estén cerca o lejos del equilibrio, lo que nos parece tan asombroso cuando contemplamos los organismos como procesos termodinámicos es su creciente autonomía. La capacidad de los organismos para almacenar y liberar energía es lo que permite a un órgano como el cerebro invertir un exceso de calorías en sus exuberantes, intrigantes, usualmente prácticos, a veces distraídos y ocasionalmente muy útiles procesos de especulación. Podría decirse que la independencia del entorno y la libertad, incluida la libertad de pensamiento, son fruto de nuestra capacidad energética suplementaria.

Así pues, parece que, sin vitalismo ni misticismo alguno (más bien al contrario), el propósito humano puede ser una consecuencia de larga evolución de la tendencia termodinámica al equilibrio. Somos elementos de colectivos reductores de gradientes (como las naciones que recaudan impuestos o los ecosistemas que reciclan nutrientes) desprovistos de cerebros propios (a menos que incluyamos nuestra presencia en ellos). Fuimos seleccionados no sólo por nuestros genes y los rasgos que confieren, sino como formas funcionales de transformación energética. La cultura humana, inestable y en rápida evolución, ha encontrado nuevas maneras de transmitir información sobre el uso de la energía (habla, escritura y medios digitalizados). Sin embargo, pese a toda nuestra grandiosidad, sin medios estables de degradación energética nuestras civilizaciones están

destinadas a derrumbarse. Y como individuos seguimos siendo entes biológicos. Los cerebros que nos han traído cultura también nos han revelado nuestros límites individuales, aunque tendamos a seguir adelante como cierta forma material de organización cíclica (animales de la especie *Homo sapiens*).

Alan Watts, el teólogo de los años sesenta, no sólo intuyó este estatuto termodinámico de la vida, sino que lo afrontó directamente, y encontró en él una fuente de revelación natural:

«Los estándares religiosos, sean judíos, cristianos, mahometanos, hinduistas o budistas, son —tal como se practican ahora— como minas agotadas: muy duras de excavar. Con algunas excepciones no fáciles de encontrar, sus ideas sobre el hombre y el mundo, su imaginería, sus ritos y sus nociones de la buena vida no parecen ajustarse al universo tal como lo conocemos, ni a un mundo humano que está cambiando tan deprisa que mucho de lo que uno aprende en la escuela ya ha quedado obsoleto el día de la graduación [...]. Porque hay un recelo creciente de que la existencia es una carrera de ratas en una trampa: los organismos vivos, personas incluidas, no son más que tubos que tragan cosas por delante y las echan por detrás, las cuales los mantienen haciendo lo mismo y a largo plazo los desgastan. Así que, para seguir con esta farsa, los tubos encuentran maneras de producir nuevos tubos, que también tragan cosas por delante y las echan por detrás. En el extremo de entrada incluso desarrollan ganglios nerviosos denominados cerebros, con ojos y oídos, que les facilitan la búsqueda de cosas que tragar. Siempre y cuando obtengan alimento suficiente, gastan su excedente energético en menearse de maneras complicadas, producir toda clase de sonidos inhalando y exhalando aire por el agujero de entrada y congregarse en grupos para luchar contra otros grupos. Con el tiempo, los tubos adquieren tal abundancia de aparatos adosados que apenas son reconocibles como simples tubos, y se las arreglan para hacerlo en una asombrosa variedad de formas. Existe una norma vaga de no comer tubos de la misma forma que la propia, pero en general hay una intensa competencia por ver quién se convierte en el tipo superior de tubo. Todo esto parece maravillosamente fútil, y sin embargo, si uno se pone a pensar en ello, comienza a parecer más maravilloso que fútil. De hecho, parece sumamente extraño».¹⁰

Copérnico mostró que la Tierra no es el centro de todo. Los cascos de barcos que desaparecían en el horizonte antes que sus mástiles evidenciaron que la Tierra no es plana. Darwin nos mostró que los organismos, que

se devoran unos a otros y cambian a lo largo del tiempo por mortalidad diferencial, tienen una manera de crear nuevos seres por evolución sin intervención divina. Los químicos nos mostraron que los cuerpos vivos están compuestos por elementos presentes en la naturaleza inorgánica, y los astrofísicos comprobaron que estos átomos están ampliamente distribuidos en el espacio, confirmando que la sustancia de la vida no es tan especial. Y ahora llega la TNE para decirnos que incluso el *proceso* de la vida (la construcción de complejidad a caballo de un flujo energético asociado a un gradiente) es un fenómeno completamente natural. He aquí, pues, nuestro candidato a propósito natural de la vida.

Vida extraterrestre

Está cada vez más claro que *cualquier* forma de vida, basada o no en el carbono, será un sistema complejo reductor de gradientes. Kenneth Nealson, del programa de astrobiología de la NASA, ha reconocido este punto y ha propuesto criterios termodinámicos, junto con propiedades químicas y morfológicas reconocidas por ordenador, como parte de un «protocolo de detección de vida no terracéntrica».¹¹ Aunque no siempre parezcan utilizables, los gradientes abundan en este universo. La conexión gradiente-vida parecería incrementar las posibilidades de encontrar vida fuera de nuestro planeta. Es muy posible que la vida extraterrestre sea tan diferente de la que conocemos que no podamos reconocerla como tal o comunicarnos con ella. (Muchas de las especies de la Tierra aún están por catalogar, y ni siquiera nos comunicamos con muchos de los hablantes de otras lenguas de nuestra propia especie.) Distintas formas de vida podrían existir incluso en la superficie de las estrellas;¹² podría ser que para estos alienígenas pasaran generaciones en lo que para nosotros es una fracción de segundo, o que necesitaran siglos para formular una frase. Podría haber vida sin agua. Pero una forma de vida que no esté ligada a ningún gradiente y su flujo de energía asociado supera incluso los límites imaginativos de la ciencia ficción. Hasta el lenguaje ordinario insiste en la conexión: *vivir* no consiste sólo en existir, sino en hacer, sentir o experimentar algo; ése es el objeto del movimiento metabólico.

Individuos y grupos

La energía organiza muchas estructuras en la superficie de la Tierra. Nuestra planificación culturizada y nuestros objetivos civilizados (cum-

plidos con la generosa ayuda de emociones primates como el amor y el miedo) son una prolongación de propiedades ya presentes en las bacterias que nadan hacia la luz o huyen del oxígeno. Las células fotosintéticas se mueven a lo largo de un gradiente lumínico para obtener los fotones que necesitan; las bacterias anaeróbicas buscan el sulfuro indicador de ausencia de oxígeno, que es un veneno para ellas. Estas propensiones quimiotácticas, sin conciencia ni designio, recompensan a sus poseedores con una existencia continuada fuera del equilibrio. Esta persistencia, a su vez, les permite continuar trabajando para la segunda ley, reduciendo gradientes ambientales con más eficacia que en su ausencia. Las bacterias son nuestros ancestros, y como reliquias simbióticas continúan reduciendo gradientes en nuestras células y en las de plantas y animales. La inmensamente compleja evolución de la vida desde las bacterias hasta los seres humanos se ha tratado en numerosos libros, la mayoría de los cuales se concentra en la evolución animal. Aquí simplemente queremos señalar el continuo de reducción de gradientes desde los sistemas TNE no vivos y aparentemente intencionales hasta las sesiones del congreso televisadas con metas conscientemente declaradas.

A pesar del notable egoísmo de los seres vivos organizados para localizar y explotar gradientes, los organismos continúan siendo sistemas abiertos. Esto implica que su individualidad siempre está abierta a la transgresión, desde fuera cuando entablan alianzas con otros seres, y desde dentro cuando células renegadas proliferan sin atender al bien del genotipo al que pertenecen, como en el caso del cáncer. Más importante aún es que un gen por sí solo no es una individualidad; se replica sólo como parte de la reproducción de un sistema termodinámico lo bastante coherente para acceder a gradientes energéticos. Las improbables células de Bénard no requieren ningún relojero. Sin esa asociación integral, un gen no es más que un producto químico, como lo son los cristales inertes de virus separados de la teleonomía activa de las células vivas.

Por obvia que pueda ser intuitivamente, la cuestión de la individualidad sigue siendo un tropiezo para la biología moderna. Tomamos al individuo como la unidad esencial de la biología. Es la sede de la sensación y la percepción, si es que tienen lugar. Pero los organismos son jerarquías anidadas compuestas de unidades que antes fueron individuos por derecho propio. Las algas talófitas, los mohos gelatinosos y los animales simples como las esponjas parecen colecciones de células que, por lo demás, podrían vivir por su cuenta. Y en una escala superior, los animales individuales se agrupan en sociedades complejas que ejecutan tareas de degradación energética que no podría llevar a cabo cada uno por su lado. Los organismos (y no digamos los genes) no son abstracciones

platónicas aisladas, sino centros de flujo que interaccionan caóticamente en poblaciones que evolucionan. La individualidad no es estable a la escala del tiempo evolutivo. Se ve comprometida, desafiada y ocasionalmente suplantada al juntarse los individuos para convertirse en nuevas entidades metaestables, algunas de las cuales son superiores en su capacidad de acceder a la energía. Se puede pensar que esta superioridad, biológica si no moral, explica la tendencia de los grupos cohesivos a sacrificar a sus miembros.

Aunque los egos individuales son energéticamente abiertos por sus raíces termodinámicas, permanecen en gran medida cerrados en cuanto a la información.¹³ Como centros no sólo fisiológicos, sino cognitivos y perceptivos, los egos relacionan estímulos ambientales con sus propios procesos de conocimiento fisiológicamente implantados. El muestrario de respuestas, percepciones y comportamientos inconscientes y conscientes de los seres vivos no evolucionó en el vacío, sino en un contexto de fuentes de energía que se agotan en un fogoso universo sujeto a la segunda ley.

Causas antiguas y modernas

Antes de la termodinámica, antes de la teoría de la evolución de Darwin, antes del monoteísmo, Aristóteles había distinguido cuatro clases de propósito, o causa. Irónicamente, es el doble de lo que suelen considerar hoy los biólogos. En biología se considera relativamente sofisticado distinguir entre causa «próxima» y causa «última».¹⁴ La primera se refiere a los procesos fisiológicos y bioquímicos que dan lugar a los rasgos orgánicos, mientras que la segunda se refiere a la selección natural ejercida no en el presente sino en el pasado. Así, la causa próxima de las variaciones en el color de la piel podría atribuirse a diferencias en secuencias génicas que conducen a una producción diferencial de melanina, el pigmento oscuro de la piel. La causa última, sin embargo, residiría en las condiciones ambientales (fueran las que fueran) que daban ventaja a las pieles oscuras en unos entornos y a las claras en otros, o al puro azar u otros factores que dieron lugar a diferencias genéticas en nuestros ancestros geográficamente dispersos.

Vayamos a las cuatro causas de Aristóteles. Son las siguientes: material (de qué está hecho un rasgo orgánico), eficiente (sus antecedentes inmediatos), formal y final (última). Robert Ulanowicz nos hace pensar en una batalla.¹⁵ La causa material de la batalla sería su tecnología de armamentos, transportes y comunicaciones. La causa eficiente la constituirían los soldados y oficiales que hacen uso de dicha tecnología. La causa for-

mal consistiría en los planes de batalla, las posiciones de los ejércitos atacante y defensivo, las fuerzas naval y aérea, así como la orografía, la meteorología y demás. La causa final podría ser una necesidad de espacio vital, conflictos étnicos o políticos, una depresión económica, etcétera. (La ilustración del texto de Ulanowicz es una casa, con los ladrillos como causa material, el albañil como causa eficiente, el plano como causa formal y la necesidad de abrigo como causa final, el propósito o función de la casa.)

La minuciosa categorización de Aristóteles entra en conflicto con la idea de que la teleología es inevitablemente antropocéntrica, teísta o imprecisa. Stephen Jay Gould, contrastando la teoría de la evolución con la física, señala que los mayores éxitos de la ciencia han llevado a considerar reales sólo las causas eficientes, los antecedentes inmediatos que pueden servir para predecir procesos físicos.¹⁶ En biología, sin embargo, las causas eficientes, los procesos físicos como la secuencia génica y el plegamiento proteico que construye los organismos no son lo mismo que las causas evolutivas; la causa eficiente de la bioquímica actúa a un nivel mucho más inmediato, y no debería confundirse con la causa final de «morfología bien diseñada».¹⁷ En *La estructura de la teoría de la evolución*, Gould cita al filósofo Friedrich Nietzsche, quien argumenta que no debe confundirse la función presente (causa eficiente) con el origen genealógico (causa final). Traducido en términos evolutivos, esto significa que no deberíamos confundir la causa eficiente, el contexto material inmediato del desarrollo de algún rasgo organizmático, con la causa final, esto es, la razón por la que se seleccionó, las condiciones que lo mantuvieron en las poblaciones ancestrales. Consideremos las plumas. Aunque su función presente es permitir que las aves vuelen, probablemente funcionaron antes en un contexto completamente distinto como aislante térmico en reptiles de sangre fría. Éste es su origen genealógico, en palabras de Nietzsche, que no debería confundirse con su función presente. La lección aquí es que hay múltiples niveles de causación implicados al mismo tiempo y a lo largo de diferentes periodos. Hoy las plumas están implicadas en el vuelo, ayer en el aislamiento térmico y originalmente eran rasgos anatómicos que, contribuyeran o no a la supervivencia, al menos no comprometían fatalmente la siempre requerida y prerreproductiva degradación de gradientes del metabolismo.

Por supuesto, nuestra función no se reduce a llegar al equilibrio. De hecho, como hemos visto repetidamente, gravitamos de manera natural hacia *no* ir al equilibrio, porque al hacerlo así continuamos ejerciendo nuestra función reductora de gradientes. Esto es así tanto si queremos vernos «lejos» del equilibrio, como Prigogine, o cerca, como Yates. En cual-

quier caso, está claro que somos más complejos y conscientes que las serpentinatas de aire caliente que «intentan» escapar de un recinto. No obstante, el propósito incipiente ya insinuado por estos procesos relativamente simples cercanos al equilibrio se nos antoja familiar. Si las revoluciones copernicana y darwiniana nos arrancaron de nuestra centralidad geográfica y biológica, la perspectiva termodinámica amenaza con arrebatarnos nuestro monopolio de los procesos cognitivos. Hay un sentido en el que los sistemas cercanos al equilibrio «calculan» cómo llegar al equilibrio. Puede que seamos una versión de esto. Nuestro anhelo de sexo y comida nos ayuda a seguir adelante, permitiéndonos permanecer como cierto tipo de sistema degradador de energía o hacer nuevas copias del modelo humano, que pueden continuar tras nuestra desaparición. Las preocupaciones amorosas y familiares perpetúan nuestro tipo específico de organización material genéticamente afianzada. La invención de maneras de ganar dinero nos ayuda a procurarnos alimento, atraer parejas sexuales y expandir y proteger nuestro tipo de sistema reductor de gradientes. Dicho de otro modo, el vínculo termodinámico entre materia y mente, entre lo teleomático y lo teleológico, sugiere que los comportamientos complejos que asociamos con la conducta deliberada (y, quizás en última instancia, la conducta deliberada misma) están fundamentados en un fenómeno o proceso del todo natural y en gran medida energético.

Diseño inteligente

La idea de que las raíces del comportamiento intencional residen en la segunda ley es apasionante. Nos vincula al universo que nos rodea. Pero nuestra propuesta de las raíces naturales del propósito también permite situar las tesis creacionistas en un contexto termodinámico.

El físico Taner Edis señala que, si bien los creacionistas hacen algunas preguntas interesantes, la ciencia misma ya no trata la naturaleza en general, y la vida en particular, como producto de un designio sobrenatural.¹⁸ El creacionismo, un hecho cultural norteamericano,¹⁹ suele referirse a la creencia en el relato literal de la creación ofrecido en el libro del Génesis, lo que requiere que las especies no sean producto de la evolución, sino que hayan sido creadas. Pero no todas las versiones del creacionismo resultan tan extremas. El teólogo católico Teilhard de Chardin, combinando la teoría de la evolución con las creencias judeocristianas, argumentó que la evolución era inherentemente progresiva y se dirigía hacia un «punto omega» de desarrollo espiritual humano.²⁰ Otros han sugerido que la evolución es principalmente aleatoria, pero sesgada en puntos clave

para asegurar la evolución humana.²¹ En *Nadie pierde* (2000), un libro alabado por el ex presidente Bill Clinton, entre otros, el escritor científico Robert Wright especula con que la evolución haya sido puesta en marcha con un propósito creativo. Los biólogos tienden a argumentar que no hay progreso objetivo,²² o que el progreso percibido es una ilusión basada en el comienzo simple de la evolución.²³

Que los microbios hayan inventado la fotosíntesis, la fijación de nitrógeno a temperatura ambiente, la computación en paralelo, la reproducción tridimensional y otros hitos metabólicos, que están más allá de la presente capacidad de los ingenieros humanos, sugiere que la extendida asunción religiosa de la centralidad y la superioridad humanas tal vez sea errónea. Las ideas creacionistas van desde diatribas contra el engaño de Eva por Satán²⁴ hasta síntesis neochardinianas de la evolución con la teoría del caos y la teología judeocristiana²⁵. Una versión reciente del creacionismo, el llamado diseño inteligente, pretende situarse entre el «inconsecuente meneo de manos de los liberales y el literalismo lunático de los creacionistas».²⁶

Phillip Johnson quizá sea el defensor más conocido del diseño inteligente.²⁷ Johnson es incongruente en que identifica lagunas e inconsistencias en la teoría de la evolución pero elude hacer un ejercicio similar de análisis de las afirmaciones del Génesis. Otro destacado defensor del diseño inteligente es Michael Behe, quien argumenta que la vida exhibe una «complejidad irreducible», en el sentido de estructuras interconectadas que parecen demasiado intrincadas para haberse compuesto paso a paso, por lo que parecerían eludir la capacidad creativa de la selección natural. Hay algo de cierto en esto, porque el neodarwinismo tradicional, que no tiene en cuenta el flujo de energía, tiene una idea inadecuada de los poderes creativos disponibles para refinar la función. El argumento de Behe se parece mucho al de William Paley, clérigo contemporáneo de Darwin, quien comparó el organismo vivo con un reloj, lo que a su modo de ver implicaba que sólo podía haber sido ensamblado por un creador. Aunque algunos de los mejores comentaristas modernos de la teoría de la evolución, como Michael Ruse,²⁸ comparan a Paley con Kant, lo cierto es que Kant señaló que un reloj difiere de un organismo en que las partes de este último no sólo están intrincadamente interconectadas, sino que se producen unas a otras, por lo que no pueden haber tenido un diseñador de tipo humano. Sin embargo, como hemos visto en los capítulos 8-12, estos sistemas interconectados y autorreproductivos no sólo son comunes en termodinámica, sino que la vida misma parece ser el residuo de un sistema autogenerativo de esta clase. Además, como ha sugerido James Lovelock,²⁹ la composición química de la atmósfera de la Tierra es tan ines-

perada desde la perspectiva de la termodinámica del equilibrio que para un observador cósmico sería como encontrar un castillo de arena paseando por la playa (en otras palabras, no podría atribuirse al puro azar).

Así pues, las argumentaciones creacionistas se basan en calcular la improbabilidad de las estructuras de no equilibrio y, a renglón seguido, invocar la divinidad para explicar la producción de lo que, a su juicio, debe requerir una explicación no científica o, a lo sumo, metacientífica. Ahora bien, como hemos visto, la TNE se ocupa de la producción de estructuras complejas a partir de los gradientes circundantes. Si no se tienen en cuenta los gradientes, entonces tales estructuras ciertamente parecen milagrosas o casi milagrosas. La TNE explica estas estructuras que de entrada parecen improbables: son procesos naturales que han surgido espontáneamente a caballo de un flujo de energía o han sido producidos por procesos ancestrales de reducción de gradientes (como vemos en la vida).

Complejidad termodinámica (y los límites de la selección natural)

La creación mecánica de relojes es una actividad humana compleja, desde luego, pero no en la misma división que las proezas metabólicas de los microbios. De hecho, son precisamente estas proezas (la transformación química global efectuada por miríadas de microbios intercambiadores de gases: productores de metano, reductores y oxidadores de azufre, respiradores de oxígeno y demás) lo que hace que la signatura química de la atmósfera terrestre parezca no aleatoria y «diseñada» por un químico atmosférico. Debemos darnos cuenta de que los procesos creativos y constructivos de los seres humanos son sólo un subconjunto limitado de los del universo. Aun cuando son promovidas por corporaciones que financian el desarrollo continuado, las actividades creativas humanas son desdeñables en comparación con la creatividad natural. Los procesos complejos que surgen espontáneamente y tienen como función la reducción de gradientes incluyen los microorganismos y otras formas de vida «no inteligentes» que han alterado y continúan alterando nuestra atmósfera, manteniéndola fuera del equilibrio químico y termodinámico. Esta creatividad ha estado funcionando, sin cerebros ni manos, a escala molecular y macroscópicamente, durante miles de millones de años.

Una perspectiva termodinámica que reconozca los comportamientos complejos de los sistemas buscadores del equilibrio nos ofrece un esquema alternativo a una conciencia intencional externa modelada según las experiencias humanas de la carpintería, la relojería y hasta la programación de ordenadores. La visión «ingenieril» de las cosas ensambladas

como por manos humanas acude de manera natural: es lo que hacemos nosotros. También está implícita en la noción científica de que el cuerpo está «hecho» de células, que a su vez están «hechas» de genes y proteínas, etcétera. Pero, aunque espectacularmente exitosa, esta comprensión de los procesos complejos como resultado del ensamblaje de partes menores queda contradicha por la clase de creatividad que vemos en los flujos termodinámicos. Tras una conferencia en Bellagio a la que asistió el filósofo Karl Popper, entre otros, Theodosius Dobzhansky, uno de los biólogos más respetados de su tiempo, hacía la siguiente reflexión sobre el azar y la creatividad en evolución: «Salvo al nivel humano, la evolución es un proceso ciego, mecánico si se quiere. No puede prever el futuro, concebir propósitos ni esforzarse en su realización. ¿Cómo puede un proceso sin propósito trascenderse a sí mismo? ¿Cómo puede un agente impersonal dar lugar a personas que poseen autoconciencia y conciencia de la muerte? ¿De dónde viene la inconfundible semejanza de la evolución biológica con la creatividad humana?»,³⁰

Nuestra respuesta afirma que la semejanza deriva, al menos en parte, del flujo de energía y el incremento natural de complejidad que se producen en formaciones cíclicas eficientes en la degradación de gradientes. Cuando el célebre zoólogo Richard Dawkins se vio confrontado con la noción de homeorresis global (la regulación de variables medioambientales planetarias como la salinidad, la química atmosférica y la temperatura durante cientos de millones de años), se sintió impelido a negarla. Para él, como para otros biólogos, tal complejidad, típica de la fisiología animal, sólo podía explicarse por selección natural de las variantes reproductivas.³¹ Puesto que, razonó, la biosfera de nuestro planeta es única, sin variantes que hayan perecido por su incapacidad para regular su química atmosférica y otras variables, no había explicación creíble para tales datos. Y sin embargo los datos persisten. Lo que Dawkins no ve es que la complejidad no sólo se acumula por la vía «de abajo arriba» de la selección natural de variantes replicativas, sino también «de arriba abajo» por la vía termodinámica de la degradación de gradientes.³² Lejos de atacar a Dawkins, lo que queremos señalar es que, para hacer frente a la tesis creacionista de la naturaleza milagrosa de la vida, los evolucionistas como él deben tomar en consideración los flujos termodinámicos, que crean intrincadas estructuras funcionales a la vez que destruyen gradientes. Huelga decir que la incapacidad de la selección natural para explicar todos los casos de complejidad (en particular, el origen de la vida y la presente regulación planetaria seudofisiológica de la química atmosférica y otras variables) no debería confundirse con un respaldo del diseño sobrenatural. En nuestra visión, el eslabón perdido es el flujo energético es-

tudiado por la TNE. Junto a la selección natural, el flujo energético también es un poderoso conformador de estructuras complejas.

Behe y el motor protónico

Irónicamente, al rechazar los relatos religiosos de la creación, la ciencia ha adquirido una predilección por las visiones casi igualmente antropomórficas basadas en las experiencias humanas de construcción mecánica. Este reduccionismo, que describe la formación de la complejidad como una suerte de construcción pieza por pieza en vez de un proceso de flujo natural, es un arma en manos de quienes aducen que las estructuras biológicas son demasiado complejas para admitir una explicación científica. En *La caja negra de Darwin* (1996), Michael Behe llama la atención sobre lo que considera un ejemplo de diseño inteligente: la «complejidad irreducible» del «motor protónico rotatorio» de un apéndice bacteriano en forma de sacacorchos, el flagelo. Este aparato locomotor ayuda a la bacteria a desplazarse a través de su medio viscoso. La expresión *motor protónico rotatorio* conjura imágenes de un artífice más que humano, el equivalente divino de esos artistas de Manhattan que escriben poesías en granos de arroz. Los científicos describen el motor protónico como un motor rotatorio real, con un rotor implantado en la membrana accionado por un flujo de iones (partículas cargadas). Posee un filamento helicoidal como propulsor, un gancho como articulación universal, una barra de transmisión y un complejo anular como estátor, que representa el corazón del mecanismo. Algunas bacterias pueden incluso invertir el sentido de giro de sus motores para dar marcha atrás.

Behe se recrea en el claro propósito funcional (propulsar la bacteria a través del agua) y descarta la idea de que tal complejidad microscópica pudiera haber surgido por un proceso evolutivo incremental. De nuevo, sin embargo, un examen más a fondo, que conecta la TNE con la selección natural, nos proporciona una apreciación más clara del potencial creativo de la naturaleza. Las bacterias provistas de tales motores se desplazan a lo largo de gradientes químicos. Cuando las bacterias de la especie *E. coli* surcan el agua, luego se paran y dan marcha atrás (invirtiendo el giro de sus motores), muestrean el entorno para obtener datos y dirigirse hacia fuentes concentradas de carbono, energía y electrones. Aunque a primera vista todo puede parecer imposiblemente bien construido, lo cierto es que los antecedentes evolutivos del «aparato» locomotor bacteriano están ahí. La capacidad de cambiar el sentido de la marcha, por ejemplo, no está presente en todas las bacterias que poseen motores, lo

que sugiere una evolución a partir de formas más simples. Es más, hay estrechas similitudes entre las proteínas que componen los motores flagelares y otras proteínas secretadas rutinariamente por las bacterias, en cumplimiento del mandato termodinámico de la producción de desechos entrópicos. De hecho, en algunos casos las mismas proteínas flagelares son excretadas a través de un tubo muy parecido al observado en la constitución de los motores protónicos.³³ Así, las proteínas implicadas en la secreción probablemente quedaron atrapadas en flujos iónicos a través de la membrana celular, lo que condujo a sistemas de movilidad posteriormente refinados por la selección natural. Detalles aparte, la lección es que los patrones de flujo asociados a gradientes y las estructuras cíclicas complejas acompañantes son omnipresentes: la vida no parte de una hoja en blanco, sino de una pizarra repleta de «diseños» termodinámicos.

Volviendo a los detalles, los flagelos de las bacterias del género *Vibrio* son impulsados por iones de sodio. El gradiente de protones que proporciona a los flagelos su fuerza electromotriz se basa en el mismo gradiente redox que ha energizado a los organismos de la superficie terrestre durante 2000 millones de años, desde que las cianobacterias comenzaron a despedir oxígeno en la atmósfera. Todas las células aeróbicas están cargadas quimioeléctricamente, por la diferencia de potencial electrónico entre el interior y el exterior, y a través de las membranas mitocondriales. En este contexto de energía disponible, la creación y función de estructuras que extraen energía de gradientes es de esperar que sea la regla y no la excepción. El hecho de que algunas de estas estructuras se asemejen a cosas conscientemente diseñadas por el ser humano no significa que las fabricó un ingeniero. Con esto no queremos desestimar la religión en general, sino sólo una visión de la naturaleza que requiere que sea conspicuamente humana en sus protocolos de diseño.

En una ponencia de la misma conferencia de Bellagio sobre reduccionismo en biología antes citada, el filósofo G. Montalenti escribe: «La complejidad estructural y funcional de los organismos y, sobre todo, el finalismo de los fenómenos biológicos han sido la dificultad insuperable, la aporía insoluble que impide la aceptación de una interpretación mecanicista de la vida».³⁴ Pero el finalismo (que es lo mismo que decir teleología en sentido amplio, incluyendo la teleomática y la teleonomía) parece menos insólito cuando se contempla en el contexto de las estructuras fluyentes dirigidas a un fin de la TNE. En lo que respecta a los motores protónicos, las células primigenias podrían haber sido tan proclives a generar estructuras giratorias como la atmósfera actual a generar remolinos borrascosos. Resulta casi cómico retratar una inteligencia divina que dedica su tiempo libre (o, peor aún, su afán de reconocimiento) a la tarea

específica de construir un motor propulsor embutido en el extremo posterior de un selecto grupo de gérmenes.

William Dembski

De acuerdo con Edis,³⁵ el más persuasivo e intelectual de los proponentes del diseño inteligente es William Dembski,³⁶ cuyos argumentos a menudo recurren a la teoría de la información (que, como hemos visto en el capítulo 1, puede aplicarse de manera equivocada y confusa incluso en las teorías laicas). Aunque Dembski admite que la direccionalidad aparente puede ser el resultado simple de una ley natural (por ejemplo, un objeto que se deja caer no se mueve aleatoriamente, sino que se dirige en línea recta hacia el suelo), sugiere que algunos fenómenos exhiben «contingencia, complejidad y especificación» en un grado tal que su existencia requiere una explicación sobrenatural. Por *contingencia* entiende la capacidad de los sistemas informacionales de adoptar múltiples formas, algunas de las cuales tienen significado; por *complejidad* entiende secuencias informacionales demasiado largas y detalladas para ser atribuibles a meros accidentes; y por *especificación* entiende la necesidad de especificar secuencias con sentido antes de su recepción, porque de otro modo podríamos hacer interpretaciones creativas de mensajes que en realidad no están ahí. Por supuesto, la cuestión de diferenciar posibles mensajes con sentido del ruido aleatorio también es importante para el SETI, el proyecto de búsqueda de inteligencia extraterrestre; como tal, el protocolo de Dembski, que parece establecer criterios selectivos no sesgados para detectar signos de designio divino, se acerca a la ciencia. De hecho, algunos investigadores del diseño inteligente invocan explícitamente el SETI para proclamar la existencia de Dios: así como un mensaje complejo procedente del espacio (por ejemplo, una emisión de radioondas que contuviese números primos, como en la película *Contact*) probaría la existencia de una inteligencia extraterrestre, la complejidad informacional del ADN prueba —en su analogía— la existencia de Dios. Se trata de un argumento interesante. Sin embargo, el test de Dembski o cualquier otro similar para diferenciar los mensajes «con sentido» del ruido no proporciona ningún criterio evidente para distinguir una presunta rúbrica divina (que en la visión creacionista debe corresponder al Dios del Antiguo Testamento) de la signature de una inteligencia alienígena.

El físico Heinz Pagels, para quien el universo material no es más que las «ruinas» de la gran explosión caliente, ha sugerido que el universo podría «verse como la vía de comunicación entre la Inteligencia Aliení-

gena —el demiurgo que lo creó— y nosotros».³⁷ *Demiurgo* es un término procedente del gnosticismo, una creencia religiosa que contempla la Tierra como la obra malograda o defectuosa de un creador irresponsable o subsidiario. El demiurgo de los gnósticos puede haberse olvidado de nosotros o haber abandonado la escena de su creación. Aunque menos simpática, tal entidad puede considerarse más lógica que un creador perfecto, considerando que el mundo en el que nos encontramos dista mucho de ser perfecto. No parece que Dembski ofrezca una manera de distinguir entre un creador judeocristiano, un demiurgo gnóstico o una inteligencia extraterrestre. Esto parece dar al traste con el protocolo del diseño inteligente, que pretende ser una prueba «científica» no ya de la no aleatoriedad inteligente, sino de la veracidad del relato bíblico.

Además, aunque los defensores del diseño inteligente pretenden haber ofrecido criterios para distinguir entre la evolución darwiniana y el designio divino, estos criterios han sido criticados por ser inadecuados.³⁸ Dembski ha replicado con el argumento «informático» de que los procesos no inteligentes que transforman y transmiten información no pueden añadir ningún contenido nuevo.³⁹ Sin embargo, esto es flagrantemente falso, como evidencia un examen de los procesos microbianos. La adquisición de genes como resultado de una infección a veces es permanente, lo que conduce precisamente a la adición de un «contenido nuevo» a sistemas de transmisión de información.⁴⁰ Parte del problema de los argumentos basados en la teoría de la información que se esgrimen en contra de la posibilidad de la vida reside en que, aunque su matemática y su lógica puedan ser correctas, se fundamentan en premisas incorrectas. Por ejemplo, las posibilidades de que los componentes químicos del ADN se ensamblen al azar en la secuencia precisa del genoma humano, son prácticamente nulas; de ocurrir, sería un suceso tan improbable y milagroso como el proverbial caso de los monos que, aporreando una máquina de escribir, acabarían escribiendo *El rey Lear*. Del mismo modo, parece increíble que una forma de vida como el ser humano pueda haber evolucionado a partir de una bacteria mediante mutaciones aleatorias. Pero los cálculos de la improbabilidad de la vida no tienen en cuenta ni las reglas de la combinación química ni la tendencia a la transmisión lateral de genes. La célula eucariota, con su núcleo y sus cromosomas, que por sí sola tiene aspecto de ameba y es la base de plantas, animales y hongos, no evolucionó de la nada, sino que fue el resultado de la fusión de bacterias con diferentes aptitudes metabólicas que se devoraban e infectaban unas a otras. Los organismos no se ensamblan átomo a átomo, o molécula a molécula, sino de manera modular, un genoma cada vez. En cuanto constatamos que los organismos tienden a evolucionar como un artista que ex-

perimenta con obras preexistentes, que la evolución no se reduce a mutaciones aisladas, la posibilidad de que evolucione una forma de vida dada, como un moho gelatinoso o una mantis religiosa, parece necesitar menos de la intervención divina. La «complejidad irreducible» se hace mucho más «reducible». A diferencia de las piezas duras de las máquinas, que encajan y punto, las totalidades fluyentes de las células son robustas y también redundantemente prolíficas en su autoensamblado y reproducción, y son capaces de repararse al nivel molecular. Se interrelacionan y juntan de muchas maneras y a muchos niveles. Por ejemplo, el biólogo Donald Williamson ha descubierto que el esperma del erizo de mar *Echinus esculentus* (perteneciente al tipo equinodermo, como las estrellas de mar) no sólo es capaz de fecundar los huevos de *Ascidia mentula* (un tunicado, perteneciente al tipo cordado, igual que nosotros), ¡sino de producir descendencia fértil!⁴¹ Este asombroso cruzamiento interespecífico podría explicarse, al menos en parte, por la ausencia de un sistema inmunitario bien desarrollado en los invertebrados. La rueda no tiene que reinventarse cada vez, y una vez inventada seguro que se difunde.

La cuestión es que los sistemas abiertos de la vida no necesitan reinventar desde cero las estructuras de las que dependen. La transmisión lateral permite a los organismos adquirir información externa, incluyendo genomas enteros preexistentes. Los organismos no necesitan confiar en la suerte más que un conductor necesita construir un automóvil antes de dar un paseo.

No somos tan arrogantes como para insistir en que nunca podría haber existido una entidad original que creara los gradientes en primera instancia. Lo que decimos es que entre lo vivo y lo no vivo hay un continuo de complejidad, y que los modos energéticos de la vida son en algunos casos llamativamente similares a procesos externos a nosotros, en el supuestamente inerte y no inteligente universo. Nos comportamos de manera inteligente, pero la materia pretendidamente aleatoria e insulsa también se organiza, describe ciclos y exhibe comportamientos de búsqueda (piénsese en la serpentina de aire en el techo). La naturaleza no modela las cosas como nosotros, con martillos y clavos. Las estructuras complejas surgen a caballo de flujos de energía, y en el caso de la vida, la información para continuar degradando gradientes, conforme a la tendencia universal descrita por la segunda ley, está asegurada. Además, mientras que los seres humanos *hacen* cosas, la naturaleza las *desarrolla*: sus producciones pueden ser mayores o menores, magníficas o extrañas, pero casi siempre están «confeccionadas» de manera más elegante que las nuestras. Los atributos de la conciencia superior (percepción aguda, aprendizaje, imaginación, modelos mentales, ciencia y tecnología) tienden a incre-

mentar el acceso a los gradientes existentes y las posibilidades de reconocer nuevos gradientes. El mundo mental de la planificación y la conciencia nos parece completamente separado del mundo físico de los sistemas que buscan el equilibrio termodinámico, pero está profundamente inmerso en él. Mente y materia se conectan a través de la TNE.

Lo cual nos lleva a algunas cuestiones sugerentes. Dada la expansión continuada de la vida y los vastos recursos del cosmos energético a su disposición, ¿podría la vida llegar a conquistar el cosmos entero? ¿Podría convertirlo en un vasto ordenador capaz de hacer cualquier cosa, hasta de crear nuevos universos hijos? ¿Podría llegar a hacerse realidad el cielo imaginado por nuestros antepasados? Si el cosmos se colapsa, ¿será la vida capaz de adaptarse? ¿Se invertirán las relaciones entre producción de entropía y complejidad cíclica, de manera que el universo se convierta en un mar de vida con unas pocas islas sin vida? ¿O es esto lo que ya ocurre, pero somos demasiado estúpidos para reconocerlo? Esto es, si la primera ley de la termodinámica dice que la energía nunca se pierde, y la vida es un sistema abierto, ¿podría ser que el universo ya fuera un sistema vivo gigante? La historia evolutiva de 4000 millones de años que ha llevado a la humanidad y las máquinas, ¿podría ser sólo el preludio embrionario de formas futuras? ¿O acaso ya se ha escrito todo, y la muerte térmica imaginada por los victorianos triunfará después de todo?

Éstas son cuestiones interesantes, aunque más propias de la ciencia ficción que de la ciencia. El creacionismo tampoco es ciencia sino, en el mejor de los casos, especulación filosófica de esta clase. Los intentos de encontrar evidencias científicas del relato bíblico de la Creación, escrito hace más de dos milenios, están condenados al fracaso. Los esfuerzos de la llamada «ciencia de la creación» están tendenciosamente concentrados en invalidar la evolución, en vez de ofrecer evidencias científicas de la creación especial relatada en el Génesis, lo cual es comprensible, porque el relato bíblico invoca milagros, que son paradigmáticamente a científicos. El mayor problema del diseño inteligente y su vena creacionista es su ausencia de un auténtico espíritu inquisitivo. Si comparamos la ciencia con una investigación policial, entonces la buena ciencia se comporta como un buen detective, inseguro de quién cometió el crimen pero siguiendo todas las pistas creíbles. La ciencia de la creación, por el contrario, es un detective perezoso y muy posiblemente corrupto, que ya tiene decidido desde el principio quién es el culpable o, más bien, a qué sospechoso le colgará el muerto. Antes de la investigación, la ciencia de la creación ya ha decidido que el culpable de todo es Dios. Como señaló el filósofo Søren Kierkegaard, cuanto menos evidencia tenemos de algo, más fe necesitamos para creer en ello. La ironía del llamado creacionismo

científico es que pretende aplicar la lógica científica para demostrar lo milagroso, pero lo milagroso, por definición, no puede demostrarse científicamente. No es una cuestión de ciencia, sino de fe.

Astucia y olvido

«La filosofía me saca de quicio», escribió Boltzmann. «Si analizamos el fundamento último de todo, entonces al final todo cae en la nada. Pero he decidido reanudar mis clases y mirar la Hydra de la duda directamente a los ojos, lo cual puede ser bastante siniestro si uno valora su vida.»⁴² La vida puede tener un propósito teológico último o no, pero a nosotros nos parece que tiene un propósito material termodinámico. La filosofía sacaba de quicio a Boltzmann por una razón. Hay tantas posibilidades, y es tan difícil —de hecho imposible— restringirlas sin un método científico, sin una manera de descartar ideas incorrectas, que la tarea puede ser fútil y mentalmente perturbadora. No obstante, mirando a «la Hydra de la duda directamente a los ojos» es como podremos tocar las cuestiones más profundas. Es difícil decir por qué el universo está tan organizado (por ejemplo, en espacio y estrellas, un gradiente electromagnético) en primera instancia. Pero una vez que lo está, la vida no parece tan milagrosa, sino otro sistema cíclico cuyo propósito físico, material y mundano es librarse de la complejidad previa en concordancia con la segunda ley. Los efectos en tiempo real de la energía almacenada por el organismo y liberada a través del pensamiento y del movimiento se manejan a un nivel comportamental y sensorial segundo a segundo, que no está bajo control genético. Al interaccionar con el entorno, el clima y entre sí, los organismos adquieren formas y pautas comportamentales complicadas. La radiación electromagnética del Sol que presenta un panorama sensorial es acumulada y desviada hacia la materia viva que pulula en los océanos, los continentes y el aire de la Tierra, y ahora, con los humanos, también en la órbita terrestre. Aunque genéticamente informada, la materia viva persigue fuentes de energía y responde, a veces muy rápido. Los transformadores energéticos vivos poseen una inteligencia que les facilita la preservación de su forma y continuidad material. Puede que las aptitudes de la conciencia y la elección sean inherentes a todos los seres vivos, aunque sea de una forma borrosa. El comportamiento y el movimiento en tiempo real (al ritmo en que los experimentamos) son influidos directamente por los organismos. Astucia, no sólo suerte. Si es así, entonces nuestras acciones y nuestro modelado consciente de ellas, así como nuestra imaginación de acciones posibles, pueden permitirnos establecer

nuevas rutas de flujo termodinámico. Finalmente, dichas rutas de flujo pueden abandonar la atención consciente y pasar a regirse por un control inconsciente de tipo fisiológico. De hecho, cuando repetimos nuestras acciones hasta que se convierten en un hábito, un acto voluntario (algo «teleológico», en el sentido de Mayr) pasa a ser un acto en cuya ejecución ya no tenemos que pensar (algo «teleonómico», en el sentido de Mayr). Nuevamente, parecería que el propósito humano consciente tiene conexiones con propósitos más antiguos de signo fisiológico y termodinámico.

Gradientes temporales, agujeros negros y tiempo invertido

La tendencia inevitable de la energía a disiparse y uniformizarse, a perder su capacidad de realizar trabajo útil, ha quedado asociada a la desoladora perspectiva de un universo inevitablemente aniquilado. La inteligencia permite el reconocimiento de nuevos gradientes: la vida y el universo están conectados, quizá mucho más íntimamente de lo que imaginábamos. Basándose en la física ideada por Stephen Hawking, el cosmólogo de Cambridge, para describir la entropía de los agujeros negros,⁴³ Freeman Dyson sugiere que la vida podría ser capaz de encontrar recursos incluso tras la muerte de las estrellas.⁴⁴

A diferencia de las enanas blancas y las estrellas de neutrones, que llegan al equilibrio termodinámico, los agujeros negros tienen calores específicos negativos y en sus centros nunca vistos contienen enormes cantidades de entropía. Si se admite que los agujeros negros existen, dice Dyson, tiene que haber un lugar donde pueda importarse orden y exportarse desorden. La teoría de Hawking de la termodinámica de los agujeros negros ofrece alguna esperanza de que la muerte térmica del universo imaginada por los victorianos nunca llegue a consumarse. Si Hawking y Dyson están en lo cierto, puede que en un futuro muy lejano nuestros descendientes recurran a los agujeros negros en lugar de las estrellas para proveerse de energía.

La segunda ley está ligada al tiempo, el cual, en nuestra concepción humana sin duda limitada, transcurre en la dirección de probabilidad creciente, que (no por coincidencia) también es la dirección de la expansión del universo, así como la de la radiación saliente (no entrante) de las estrellas. Se ha especulado con la posibilidad de que la expansión del universo ofrezca nuevas áreas ocupables por la energía libre, posponiendo así, indefinidamente, la necesidad de que se alcance un equilibrio final. Cuando el universo comience a contraerse gravitatoriamente (si contiene

suficiente materia oscura para producir una «gran contracción» opuesta a la gran explosión observada), puede que el sentido del tiempo se invierta. El cibernético Norbert Wiener, el termodinámico Ludwig Boltzmann, el físico Thomas Gold, el cosmólogo Stephen Hawking y otros han considerado la inversión temporal en áreas de entropía decreciente, como en el interior de un agujero negro o en un universo futuro en contracción. Es interesante contemplar dicho universo de radiación entrante y desevolución, donde la improbabilidad es un atractor y la naturaleza adora los gradientes, un universo donde las caléndulas emiten luz, los rayos de luz convergen en estrellas y los seres humanos expiran con el placer del orgasmo, en lugar de sufrir hasta la muerte. La cuestión de la asimetría temporal sigue siendo incómoda para la cosmología moderna. Si los gradientes son diferencias medibles entre puntos del espacio, y el espacio está ligado al tiempo, ¿acaso el aborrecimiento de la naturaleza por los gradientes se hace extensivo al tiempo? ¿Es también un gradiente la diferencia entre el pasado remoto y el futuro lejano?

Estas cuestiones están más allá del alcance planetario y ecológico de este libro, pero quizá vivamos en un universo antivictoriano que se encamina no hacia una muerte térmica, sino hacia un nacimiento luminoso; no hacia un suspiro final, sino hacia una explosión.

«Soy Dios»

Schrödinger envió una transcripción de sus conferencias de abril de 1943 a una respetada editorial de Dublín, Cahill & Co., para su publicación. En el manuscrito final insertó un corto epílogo de cuatro páginas sobre el determinismo y el libre albedrío, en el que afirmaba que en sus tres conferencias sólo había hablado de los aspectos científicos de la vida, pero que ahora quería exponer sus propios pensamientos subjetivos sobre las implicaciones filosóficas de su nueva visión de la vida:

«De acuerdo con la evidencia expuesta en las páginas precedentes, los acontecimientos espaciotemporales del cuerpo de un ser vivo correspondientes a la actividad de su mente, a su autoconciencia u otras acciones, son, si no estrictamente deterministas, en todo caso estadístico-deterministas [...]. En apoyo de mi argumento, permítaseme considerar esto como un hecho, como creo que lo haría cualquier biólogo imparcial, si no fuera por esa bien conocida y desagradable sensación de tener que “declararse a uno mismo un mecanismo puro”. Pues se supone que semejante declaración se opone al libre albedrío, tal como

lo garantiza la introspección directa. Pero las experiencias inmediatas, por variadas y dispares que sean, no pueden lógicamente de por sí contradecirse entre ellas. Veamos, pues, si es posible llegar a la conclusión correcta, y no contradictoria, a partir de las dos premisas siguientes: (i) Mi cuerpo funciona como un mecanismo puro conforme a las leyes de la Naturaleza». ⁴⁵

Schrödinger nos advierte aquí de que esta idea del mecanismo debe tomarse con reserva. En el transcurso de sus conferencias recuerda a su audiencia una y otra vez que la vida no es un mecanismo como un reloj o los movimientos planetarios. Ahora reconocemos que los mecanismos inteligentes, la tecnología, emanan de la vida inteligente. Las máquinas no están «incorporadas» a la vida de alguna manera sobrehumana. En vez de eso, la inteligencia intrínseca y más que mecánica de los sistemas de flujo material de base energética genera materia viva con toda su astucia, en la que se incluye la sociedad industrial y consumista de la humanidad moderna.

«Sin embargo, mediante la experiencia directa incontrovertible», escribe Schrödinger,

«sé que estoy dirigiendo sus movimientos, cuyos efectos preveo y cuyas consecuencias pueden ser fatales y de máxima importancia, caso en el cual me siento y me hago enteramente responsable de ellas. La única conclusión posible de estos dos hechos es que yo —es decir, yo en el sentido más amplio de la palabra, o sea, toda mente consciente que alguna vez haya dicho o sentido “Yo”— soy la persona, si es que existe alguna, que controla el “movimiento de los átomos” de acuerdo con las leyes de la Naturaleza [...] [R]esulta osado dar a esta sencilla conclusión la expresión que requiere. Decir en la terminología cristiana: “Por lo tanto, yo soy Dios Todopoderoso”, resulta a la vez blasfemo y extravagante. Pero dejemos a un lado este aspecto, por el momento, y consideremos si la deducción anterior no es acaso la más aproximada que un biólogo puede alcanzar para comprobar a la vez la existencia de Dios y la inmortalidad». ⁴⁶

Como puede imaginarse, este epílogo védico sobresaltó a la Iglesia católica y al Trinity College, la institución que patrocinaba a Schrödinger. Se le pidió que suprimiera sus reflexiones subjetivas y privadas del manuscrito. Con su característica tozudez, se negó a cambiar el epílogo, lo cual hizo que la editorial rehusara publicar el libro. Finalmente, el librito verde de noventa y una páginas fue publicado un año más tarde, en 1944, por Cambridge University Press, en la mucho más laica Inglaterra.

Schrödinger tenía razón. Somos como dioses termodinámicos: cuando el lector cierre este libro estará haciendo uso de su conciencia para dirigir energía, para explotar un gradiente muscular local en su cuerpo, un sistema abierto en un universo marcado en todas partes por la energía y su fluir inexorable.

Postfacio

Principios de la termodinámica de sistemas abiertos

Hemos argumentado que los sistemas complejos de toda clase, desde las células de convección y los ordenadores hasta los huracanes y las biosferas, deben verse como estructuras de flujo energético organizadas por principios termodinámicos. He aquí una lista de tales principios organizadores, con una presentación más formal de lo que parecía apropiado en el texto. No es exhaustiva, y esperamos que se descubran otros principios vinculadores de los sistemas complejos abiertos.

1.º En la región lineal cercana al equilibrio, existen relaciones de reciprocidad tales que fuerzas y flujos están acoplados. Son las relaciones recíprocas de Onsager. Por ejemplo, el flujo laminar de un fluido en una tubería depende linealmente de la presión, mientras que la presión depende linealmente del flujo. Leyes bien conocidas de la química y la física cumplen las relaciones recíprocas de Onsager para los procesos cercanos al equilibrio. La ley de Fourier establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura; la ley de Fick describe la proporcionalidad entre la difusión y el gradiente de concentración química; y la ley de Ohm cuantifica el acoplamiento entre corriente y resistencia. Todas son versiones de las relaciones descritas por Onsager.

2.º En el régimen lineal de Onsager, la producción de entropía total de un sistema debida a los flujos materiales y energéticos alcanza un mínimo en el estado estacionario de no equilibrio. Los procesos cercanos al equilibrio evolucionan hacia un estado estacionario en el que la producción de entropía se torna mínima. Los ejemplos son numerosos. La minimización de la producción de entropía se observa, por ejemplo, en los sistemas químicos en estado estacionario y en la conducción térmica cuando el calor alcanza un estado estacionario a lo largo del sistema.

3.º La potencia se conserva en el sistema. Los sistemas lineales cercanos al equilibrio obedecen la ley de Kirchhoff, la cual establece que los flujos de volumen y masa son análogos al flujo de carga en un cir-

cuito eléctrico. La suma de las diferencias de potencial eléctrico (o químico, de presión o de concentración) se anula a lo largo de un bucle cerrado. Éste es un enunciado simple de la ley de conservación de la potencia. Aplicándola, podemos determinar la topología del sistema (su «circuitería»), así como sus flujos y su almacenamiento y disipación de energía.

4.º A medida que un sistema se aparta del régimen lineal cercano al equilibrio por la imposición de algún gradiente, utilizará todas las vías disponibles para contrarrestarlo y degradarlo. En este contexto, la denominación *estructura disipativa* adquiere un nuevo significado: no sólo incrementa la disipación de materia y energía, sino también la degradación de gradientes. La distinción entre disipación y degradación de energía es importante. La disipación implica la circulación de la energía a través del sistema, como en las células de Bénard. La disipación puede destruir o no gradientes. Por otra parte, la degradación de la energía implica rebajar su calidad. Así pues, la degradación de la energía significa la pérdida de su capacidad para realizar trabajo. En los sistemas simples donde sólo hay involucrado flujo de calor, la degradación de la energía se produce a través de la disipación.

5.º A medida que el gradiente aplicado aumenta, también lo hace la capacidad del sistema para oponerse a un alejamiento mayor del equilibrio. El ejemplo de las células de Bénard muestra que, cuanto más se aleja el sistema del equilibrio, más intenso debe ser el gradiente impuesto para mantenerlo en ese estado.

6.º El apartamiento del equilibrio por un gradiente aumentado irá acompañado de un incremento del flujo de energía y la producción de entropía. De nuevo vale el ejemplo de las células de Bénard, donde un gradiente intensificado da lugar a un flujo de energía incrementado a través del sistema y una producción de entropía aumentada, que aquí equivale al flujo de calor disipado.

7.º Los sistemas abiertos fuera de equilibrio residen a cierta distancia del equilibrio, producen entropía que el sistema exporta al entorno y mantienen una entropía baja dentro del sistema a expensas del desorden fuera del sistema. La importación de energía y materia en una estructura rebajará la entropía interna del sistema si la entropía importada es menor que la exportada. Esto no es tan complicado como parece. Una ameba, por ejemplo, tiene un nivel de organización más elevado que el de su entorno. Para mantener este estado organizado, la ameba debe importar menos entropía de la que produce: su organización no surge de la nada, sino que es pagada por un incremento de la entropía del «universo» circundante. Los sistemas disipativos organizados existen a expensas de un desorden

aumentado fuera del sistema. Lejos de ser violada, la segunda ley impulsa la organización de la ameba.

8.º Si se impone un gradiente a un sistema, y las condiciones cinéticas lo permiten, surgen estructuras y procesos organizativos autocatalíticos y autorreforzantes. Estas organizaciones autocatalíticas reclutan materia y energía. Los ejemplos incluyen los huracanes y los sistemas vivos. Los procesos son organizados por gradientes cuya energía potencial se canaliza en sistemas cíclicos. Las organizaciones autocatalíticas son sistemas dinámicos no lineales atravesados por flujos de materia y energía. Estos sistemas muestran comportamientos cíclicos estables y propiedades dinámicas descritas matemáticamente mediante atractores, bifurcaciones y catástrofes. De nuevo, las células de Bénard constituyen un ejemplo de tales procesos. Cuando se supera un gradiente de temperatura umbral (el número de Marangoni), tiene lugar una bifurcación y surgen las células de Bénard como un sistema dinámico cíclico estacionario. Los vórtices de Taylor manifiestan transiciones catastróficas similares; y los cambios abruptos en las reacciones BZ representan bifurcaciones entre estados estacionarios.

Robert Ulanowicz amplía la autocatálisis a la escala ecosistémica, y considera que la autocatálisis es el principal proceso generador de complejidad en la naturaleza. Nosotros iríamos aún más lejos y diríamos que la segunda ley y el comportamiento de los sistemas disipativos es la principal fuerza creadora de organizaciones dinámicas complejas en la naturaleza, incluida la autocatálisis. Un aspecto clave de este postulado es que los sistemas disipativos pueden reclutar nuevos materiales y energías.

9.º Los sistemas biológicos optimizan la captación de energía y degradan los gradientes energéticos disponibles de la manera más completa posible. Aquí *optimizar* quiere decir lo más favorable para el desarrollo, el metabolismo y la reproducción. Los valores óptimos pueden aumentar o disminuir con las variaciones medioambientales. Los árboles son procesos disipativos enormes, pero ante una sequía cierran los estomas de sus hojas para no perder agua. De esta forma, el árbol controla de manera óptima su transpiración y su producción de entropía. Al mismo tiempo, las plantas poseen magníficas morfologías foliares, ramificaciones y movimientos fototrópicos (hacia la luz) para captar mejor la energía disponible. Cada especie vegetal tiene su propio nicho (su propio hábitat y modo de subsistencia) y su propia maquinaria genética para llevar a cabo sus procedimientos de obtención de energía. Que los sistemas biológicos degradan gradientes de la manera más completa posible resulta patente en las plantas, la mayor parte de cuya energía se degrada en calor latente, en la forma de vapor de agua. La biomasa producida por fotosíntesis es consu-

mida por herbívoros y detritívoros como los hongos y las bacterias, que la reconvierten en dióxido de carbono, agua y compuestos orgánicos simples.

10.º Los procesos biológicos demoran la disipación inmediata de la energía y dan lugar a almacenamiento de energía y materiales, reciclado y estructura. La captación y retención de fotones, y la transducción de energía lumínica (fotones) en energía química (los enlaces carbono-hidrógeno y carbono-carbono de la materia orgánica) mediante la fotosíntesis es la base termodinámica de la vida más moderna. Las estructuras autocatalíticas disipativas más exitosas degradan los gradientes disponibles a fin de mantener su capacidad degradadora de gradientes. Los sistemas biológicos tienden a incrementar la captación de energía, almacenar biomasa y demorar la disipación inmediata de la energía produciendo gradientes *internos* que les confieren independencia respecto a las inestabilidades energéticas del entorno.

11.º La vida y otros sistemas complejos no sólo no contradicen la segunda ley, sino que existen en virtud de ella. Es más, la vida y otros sistemas complejos reducen gradientes preexistentes de manera más efectiva que en ausencia de aquéllos.

En su reciente libro *Investigaciones*, ganador del Premio MacArthur, Stuart Kauffman escribe:

«Esa aparición de ecosistemas autoconstructivos ha de tener, de algún modo, un origen físico, aunque actualmente ninguna teoría física se ocupe de ello [...]. En el núcleo del misterio yace una familia de conceptos. Esos conceptos se refieren a la emergencia progresiva de organización en la evolución del universo físico y de la biosfera [...]. Creo que en la actualidad no disponemos de teoría alguna sobre esta materia, ni siquiera un concepto claro de lo que constituiría el sujeto de tal teoría [...]. Lo enunciaremos de nuevo. El universo está lleno de fuentes de energía. Surgen procesos fuera del equilibrio y estructuras de diversidad y complejidad crecientes que, respectivamente, se convierten en fuentes de energía y miden, detectan y capturan dicha energía y elaboran nuevas estructuras que constituyen restricciones a su liberación, impulsando procesos no espontáneos que crean nuevos y diversificados procesos, estructuras y fuentes de energía [...]. Resulta llamativo lo escasamente provistos de conceptos que nos hallamos para abordar estos temas; con toda seguridad, no disponemos aún de teoría coherente alguna capaz de explicar esta explosión de procesos y estructuras».¹

No quisiéramos privar a Kauffman de la fuente de su goce intelectual, pero pensamos que los once postulados anteriores representan los comienzos de una teoría termodinámica coherente de la vida. Si la evolución muestra que toda la vida está relacionada por descendencia, y la ecología que toda la vida está interconectada, la termodinámica basada en gradientes nos muestra que la vida en la segunda ley se mueve por los mismos imperativos termodinámicos que organizan los sistemas complejos no vivos.

Notas

Prefacio

1. Kant, 1790, 64, pág. 249.
2. Wächtershäuser, 1992.
3. Morowitz, 1992.
4. Dyson, 1999.
5. Wicken, 1987.
6. Vernadsky, 1929.
7. Schrödinger, 1944, págs. 20-21.
8. Schneider, E.D., 1995.
9. Lovelock, 2003, pág. 769.
10. Pigliucci, 2001.
11. Murphy y O'Neil, 1995, pág. 3.
12. Weber, 2003.
13. Koschmieder, 1993.
14. Cairns-Smith, 1985.
15. Russell et al., 1998.
16. Woese, 1987.
17. *Física*, 2.8 (McKeon, 2001, pág. 251).
18. Alvarez et al., 1980; Olsen et al., 2002.

Introducción. Problemas en la Agencia de Protección Medioambiental

1. Schneider y Kay, 1989; Sagan y Schneider, 2000.
2. Snow, 1969.

Primera parte: Lo energético

1. La paradoja de Schrödinger

1. Moore, 1992, pág. 395.
2. Schrödinger, 1944, pág. 3.
3. *Ibíd.*, págs. 19-21.

4. *Ibíd.*, pág. 70.
5. *Ibíd.*, págs. 71-72. [La traducción española de las citas de Schrödinger han sido extraídas de E. Schrödinger, *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores, col. Metatemáticas 1, Barcelona, 2006, págs. 19, 40-42, 109-110, 111.]
6. Thompson, D.W., 1917, págs. 8-9.
7. Shannon y Weaver, 1949.
8. Tribus y McIrvine, 1971, pág. 180.
9. Blum, 1968, pág. 207.
10. Atkins, 1984, pág. viii.
11. Jaynes, 1957.
12. Yockey, 1992 y 1995.
13. Pigliucci, 2000.
14. Morowitz, 2002, pág. 73.
15. Marschall, 1994, págs. 45-46.

2. *Simplicidad*

1. Einstein, 1956.
2. Eric Chaisson, 2001.
3. Rössler, 2002.
4. Solé y Goodwin, 2001.
5. Williams, 1997, pág. 6.
6. Wolfram, 2002; Morowitz, 2002.
7. Smolin, 1997; Kauffman, 2000.

3. *Ojos de fuego: la energética clásica*

1. Guillen, 1995, pág. 179.
2. Gamow, 1961.
3. *Ibíd.*, pág. 98.
4. Guillen, 1995, pág. 191.
5. Von Baeyer, 1998.
6. Clausius, 1987, pág. 741.
7. Atkins, 1984, pág. 25.

4. *El casino cósmico: la mecánica estadística*

1. Coveney y Highfield, 1991, pág. 173.
2. Price, 1996.
3. Bristol, 2003.
4. Kauffman, 2000.

5. Bristol, 2003.
6. Kauffman, 2000.
7. Smolin, 1997.
8. Citado en Popper, 1976, pág. 160.
9. Citado en Prigogine y Stengers, 1984, pág. 300.
10. Smolin, 1997.
11. Boltzmann, 1886.
12. Wang et al., 2002; Evans, Cohen y Morris, 1993.
13. Hawking, 1990.
14. Gerstner, 2002.
15. Goldman, 1983, pág. 123.
16. Leff y Rex, 1990, pág. 5.
17. *Ibíd.*, pág. 43.
18. *Ibíd.*, pág. 11.
19. Rössler, 2002.
20. Nørretranders, 1991, págs. 20-21.
21. Coveney y Highfield, 1991, pág. 175.
22. Lewis y Randall, 1923.
23. Boltzmann, 1886, pág. 15.

5. La naturaleza aborrece los gradientes

1. Carathéodory, 1976.
2. Mikulecky, 1993, págs. 19-22, 327-331.
3. Kestin, 1979.
4. Hatsopoulos y Keenan, 1965, págs. 29, 198-199.
5. Kestin, 1979, pág. 2.
6. Lotka, 1956, pág. 281.
7. Fermi, 1956.
8. Mikulecky, 1993.
9. *Ibíd.*, págs. 52-53.

6. El río debe fluir: sistemas abiertos

1. Onsager, 1931a, 1931b.
2. Prigogine y Stengers, 1984, pág. 139.
3. Prigogine, 1955.
4. Nicolis y Prigogine, 1977.
5. Prigogine, 1981.
6. Balescu, 2003, pág. 30.
7. Lambert, 1998, pág. 3.
8. Morowitz, 1997, pág. 121.

9. Peacocke, 1983, págs. 24-25.
10. Merkle, 2001.
11. Drexler, 1992.
12. Musgrave et al., 1992.
13. Feynman, 1960.
14. Eddington, 1928, pág. 74.
15. Kauffman, 2000.
16. Kauffman, 1993.

7. *Demasiado, demasiado poco: ciclos*

1. Morowitz, 1979, pág. 33.
2. Teller, 1938.
3. Halicke, 1993.
4. Nicolis y Prigogine, 1989; Peacocke, 1983, págs. 40-41.
5. Nicolis y Prigogine, 1989, págs. 17-26.
6. Eigen, 1971; Eigen y Schuster, 1979.
7. Adaptado de Ulanowicz, 1986.
8. Ulanowicz, 1995, pág. 258.
9. *Ibíd.*, pág. 256.
10. Popper, 1990, pág. 43.
11. Günther y Folke, 1993.
12. Jantsch, 1980.
13. Bertalanffy, 1968, pág. 32.
14. Wicken, 1987.
15. *Ibíd.*, pág. 121.
16. *Ibíd.*, pág. 5.
17. *Ibíd.*, pág. 72.
18. Szent-Györgyi, 1961, pág. 7.

Segunda parte: Lo complejo

8. *El mundo de los remolinos*

1. Bénard, 1900.
2. Koschmieder, 1993.
3. Adaptado de Schneider y Kay, 1994b.
4. Sagan y Whiteside, 2004.
5. Behe, 1996.
6. Johnson, 1991. Además, véase el último capítulo de nuestro libro.
7. Block, 1956.
8. Koschmieder, 1993.
9. Assenheimer y Steinberg, 1994.

9. Los «organismos» propios de la física

1. Taylor, 1993.
2. Coles, 1965.
3. *Ibíd.*, pág. 416.

10. Remolinos y tiempo atmosférico

1. Wipple, 1982.
2. Rosen, 1991.
3. Wicken, 1987.

Tercera parte: Lo vivo

11. Termodinámica y vida

1. Smil, 2002.
2. Kant, 1790, 75, 282.
3. Mayr, 1982, pág. 131.
4. Grinevald, 1986.
5. Vernadsky, 1929.
6. Lovelock, 1979 y 1988.
7. Schneider, Boston y Crist, 2004.
8. Margulis y Sagan, 2002.
9. Bergson, 1911, págs. 272, 407.
10. *Ibíd.*, pág. 253.
11. *Ibíd.*, pág. 13.
12. Murphy y O'Neil, 1995, pág. 3.
13. Lotka, 1922.
14. *Ibíd.*, pág. 149.
15. *Ibíd.*, pág. 149.
16. Lotka, 1956, pág. 358.
17. Lotka, 1922.
18. Lotka, 1945, pág. 194.
19. *Ibíd.*, pág. 194.
20. Gould, 2002, pág. 1226. [Trad. esp.: *La estructura de la teoría de la evolución*, Tusquets Editores, col. Metatemas 82, Barcelona, 2004, pág. 1256.]
21. *Ibíd.*, pág. 1225. [Trad. cit., pág. 1255.]
22. *Ibíd.*, págs. 1228-1229. [Trad. cit., pág. 1259.]
23. Vernadsky, 1929.
24. Trewavas, 2002, pág. 841.
25. Wicken, 1987, pág. 31.
26. Kant, 1790, 65.

12. Comienzos sulfurosos

1. Dyson, 1999, pág. 11.
2. Oster et al., 1974, pág. ix.
3. *Ibíd.*, pág. x.
4. *Ibíd.*, pág. x.
5. Crick, 1981, pág. 15.
6. Popper, 1974, pág. 270.
7. Ho, 1998, págs. 37-38.
8. Corning y Kline, 1998.
9. Williams y Da Silva, 2002.
10. *Ibíd.*, pág. 689.
11. *Ibíd.*, pág. 694.
12. *Ibíd.*, pág. 695.
13. *Ibíd.*, pág. 695.
14. Cairns-Smith, 1982.
15. Wächtershäuser, 1992.
16. Fry, 2000, pág. 8.
17. Eigen et al., 1981, pág. 91.
18. Dyson, 1999, págs. 4-5.
19. *Ibíd.*, pág. 6.
20. Morowitz, 1992.
21. Cairns-Smith, 1985.
22. Wächtershäuser, 1992.
23. Cech, 1993.
24. Dyson, 1999, págs. 38-39.
25. De Duve, 1991, pág. 187.
26. Fry, 2000, pág. 110.
27. Wicken, 1987, pág. 104.
28. Dyson, 1999, pág. 83.
29. Dyson, 1999.
30. Fry, 2000, págs. 178, 190-193; 1995.
31. Niesert, Harnasch y Bresch, 1981.
32. Von Neumann, 1948.
33. Dyson, 1999, pág. 7.
34. Oparin, 1964, pág. 29.
35. Oparin, 1964; Haldane, 1967.
36. Miller y Orgel, 1974.
37. Matthews, 2000.
38. Dyson, 1999, pág. 37.
39. Gribbin y Gribbin, 2000.
40. Harder, 2002.
41. Mojzsis et al., 1996.
42. Hoyle y Wickramasinghe, 1984.

43. Kauffman, 1993, pág. 344.
44. Kauffman, 1993 y 1995.
45. Monod, 1974, pág. 96.
46. Fry, 2000, pág. 212.
47. Goldsmith, 1997, pág. 226.
48. Corliss y Ballard, 1977.
49. Dyson, 1999, pág. 37.
50. Gold, 1999.
51. Russell et al., 1994.
52. Dyson, 1999, pág. 26.
53. Morowitz, 1992.
54. Nisbet y Sleep, 2001.
55. Woese, 1987.
56. Wächtershäuser, 1992, pág. 88.
57. Wächtershäuser, 1992, pág. 121; Morowitz, 1992.
58. Fry, 2000, pág. 165.
59. Wächtershäuser, 1992, pág. 91.
60. Heinen y Lauwers, 1996.
61. De Duve y Miller, 1991.
62. Cairns-Smith, Hall y Russell, 1992; Kaschke et al., 1994; Fry, 2000, pág. 172.
63. Dyson, 1999, págs. 85-86, 89.
64. Kant, 1790, 65.
65. Matthews, 2000, pág. 62.
66. *Ibíd.*

13. *Blues para un planeta azul*

1. Citado en Kellert y Franham, 2001, pág. 123.
2. Wilson, 2002 y 1992; Brown et al., 1994.
3. Lovelock, 2003.
4. Swenson, 1989.
5. Rifkin, 1980.
6. Tipler, 1995.
7. Brooks y Wiley, 1986.
8. Kauffman, 2000.
9. Dyson, 1994; Tipler, 1995; Kauffman, 2000.
10. Twain, 1883, pág. 156.
11. Worster, 1979.
12. Cowles, 1899.
13. Clements, 1936, pág. 261.
14. Gleason, 1926.
15. Hutchinson, 1978.
16. Lindeman, 1942, págs. 417-418.

17. Elton, 1930.
18. MacArthur, 1958.
19. Margalef, 1968, pág. vi.
20. *Ibíd.*, pág. 36.
21. Odum, 1969, pág. 269.
22. *Ibíd.*, págs. 264-270.
23. Leontief, 1936.
24. Ulanowicz, 1986 y fig. 7.2 de este libro.
25. Odum, H.T., 1971.
26. Homer, Kemp y McKellar, 1976.
27. Matsuno, 1978.
28. Schneider y Kay, 1994b.
29. Ulanowicz, 1997.
30. Kauffman, 1995, pág. 56.
31. Holling, 1986.
32. Ulanowicz, 1997.

14. Regresión bajo tensión

1. Sherman et al., 1981.
2. Zotin, 1972.
3. Hammond y Diamond, 1997.
4. Woodwell, 1970.
5. *Ibíd.*, pág. 20.
6. Oviatt, Walker y Pilson, 1980.
7. Likens et al., 1970.
8. Homer, Kemp y McKellar, 1976.

15. El secreto de los árboles

1. Pollan, 1998; Margulis y Sagan, 1997a.
2. Grant, 1985, pág. 93.
3. Ben-Shem, Frolow y Nelson, 2003, pág. 360.
4. Gates, 1962, págs. 4-5.
5. Rauner, 1976, pág. 262.
6. Hetherington y Woodward, 2003.
7. Wullschlegel, Meinzer y Vertessy, 1998.

16. Del calor al frío

1. Schneider y Kay, 1994b, pág. 40.

2. *Ibíd.*
3. Sellers y Mintz, 1986.
4. Luvall y Holbo, 1989.
5. *Ibíd.*
6. Luvall y Holbo, 1991.
7. Taha, Akbari y Sailor, 1992.

17. Tendencias evolutivas

1. Margalef, 1968, pág. 81.
2. Depew y Weber, 1994, pág. 9.
3. Fisher, 1930, pág. 36.
4. Wicken, 1987, pág. 89.
5. *Ibíd.*, pág. 136.
6. Westbroek, 2000.
7. Stamets, comunicación personal, 2002. Además, véanse los capítulos 14-16, en que hemos presentado datos sobre la pérdida de la capacidad reductora de gradientes en áreas deforestadas.
8. Scott McMillion, comunicación personal, 2003.
9. Flannery, 2001, pág. 314.
10. Gaston, 2000, pág. 226.
11. Stehli y Wells, 1971.
12. Brown, 1981, pág. 884.
13. *Ibíd.*
14. Wright, 1983.
15. Currie, 1991.
16. *Ibíd.*
17. Wilson, 1992.
18. Saunders, 1968.
19. Bonner, 1988.
20. Whitfield, 2001, pág. 343.
21. Enquist, Brown y West, 1998.
22. Whitfield, 2001, pág. 343.
23. Enquist y Niklas, 2001.
24. *Ibíd.*, pág. 659.
25. Willis y Whittaker, 2002, pág. 1245.
26. Gaston, 2000, pág. 226.
27. Rohde, 1992, pág. 514.
28. Mayr, 2001, tabla 10.1.
29. *Ibíd.*, pág. 212.
30. *Ibíd.*, pág. 216.
31. Citado en Schwartzman, 1999, pág. 180.
32. Gould, 1989. Citado en Schwartzman, 1999, pág. 180.

33. Schwartzman, 1999.
34. Morris, 2003, pág. xv.

Cuarta parte: Lo humano

18. Salud, vigor y longevidad

1. Squires, 2002.
2. Bortz, 2001.
3. Bortz, 1997, 1986, 1985, 1984.
4. Bortz y Bortz, 1996.
5. *Ibíd.*, M225.
6. Lovett, 2002, pág. 32.
7. Lovett, 2002.
8. Rosen, 1991.
9. Yates, 1987.
10. Yates y Benton, 1995, pág. 108.
11. *Ibíd.*, pág. 110.
12. *Ibíd.*, págs. 108-109.
13. Yates y Benton, 1995.
14. Bortz, comunicación personal, 2000.
15. Groussard et al., 2000.
16. Selye, 1936.
17. Selye, 1976.
18. Toussaint et al., 2003, pág. 269.
19. Toussaint et al., 2002.
20. Toussaint et al., 2003.
21. Victoroff, 2002.

19. Economía

1. Ulanowicz, 1986.
2. Soros, 1997.
3. Butler, 1863. Citado en Dyson, 1997, pág. 33.
4. Keynes, 1987.
5. Von Mises, 1997.
6. Dyke, 1988, págs. 356, 359.
7. Jacobs, 1984.
8. Dyke, 1988, pág. 359.
9. *Ibíd.*, pág. 365.
10. Benyus, 2002.
11. Dyke, 1988, pág. 365.
12. New School, 2004.

13. *Ibíd.*
14. *Ibíd.*
15. *Ibíd.*
16. Georgescu-Roegen, 1971, pág. 281.
17. Kurz y Salvadori, 1995.
18. Comunicación personal, 2002. Véase Bloom, 1997.
19. Thorpe, 1966.
20. Bennet, 1998.
21. Schneider y Kay, 1994a.

20. *El designio de la vida*

1. Smolin, 1997.
2. Gardner, 2003.
3. Swenson y Turvey, 1991.
4. McKeon, 2001, pág. 251.
5. O'Grady y Brooks, 1988, pág. 285.
6. *Ibíd.*
7. Marshall y Mapplethorpe, 1986.
8. McKeon, 2001, pág. 251.
9. Mayr, 1961; O'Grady y Brooks, 1988.
10. Watts, 1989, pág. 4.
11. Conrad y Nealsen, 2001.
12. Stapledon, 1947.
13. Maturana y Varela, 1981.
14. Gould, 2002.
15. Ulanowicz, 1997, pág. 12, tabla 2.1.
16. Gould, 2002, pág. 626.
17. *Ibíd.*, pág. 85.
18. Edis, 1998.
19. Numbers, 1998.
20. Teilhard de Chardin, 1976; Grinevald, 1986.
21. Peacocke, 1986.
22. Véase, por ejemplo, Gould, 1997.
23. Nitecki, 1988; Ruse, 2003.
24. Morris, 1993.
25. Morowitz, 2002.
26. Edis, 2001.
27. Johnson, 1991 y 1995.
28. Ruse, 2003.
29. Lovelock, 1988.
30. Ayala y Dobzhansky, 1974, pág. 335.
31. Dawkins, 1982.

32. Jantsch, 1980.
33. Komoriya et al., 1999; Young et al., 1999.
34. Montalenti, 1974, pág. 16.
35. Edis, 2001.
36. Dembski, 1998, 1999 y 2000.
37. Pagels, 1989, págs. 155-156.
38. Elsberry, 1999.
39. Edis, 2001.
40. Margulis y Sagan, 2002.
41. Williamson, 2003.
42. Citado en Tanford y Reynolds, 1995, pág. 673.
43. Hawking, 1990.
44. Dyson, 1994.
45. Schrödinger, 1944, pág. 87. [Trad. esp.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores, col. Metatemas 1, Barcelona, 2006, pág. 133.]
46. *Ibíd.*, pág. 88. [Trad. cit., pág. 134.]

Postfacio

1. Kauffman, 2000, pág. 82. [Trad. esp.: *Investigaciones*, Tusquets Editores, col. Metatemas 76, Barcelona, 2003, págs. 120 y sigs.]

Bibliografía

- Álvarez, L.W., W. Álvarez, F. Asaro y H.V. Michel (1980), «Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction», *Science* 208, págs. 1095-1108.
- Assenheimer, M. y V. Steinberg (1994), «Transition between spiral and target states in Rayleigh-Bénard convection», *Nature* 367, págs. 345-347.
- Atkins, P.W. (1984), *The second law: Energy, chaos, and form*, W.H. Freeman & Co., San Francisco.
- Ayala, F. y T. Dobzhansky (1974), *Studies in the philosophy of biology: Reduction and related problems*, University of California Press, Berkeley.
- Balescu, R. (2003), «Obituary of Ilya Prigogine», 1917-2003, *Nature* 424, pág. 30.
- Behe, M.J. (1996), *Darwin's black box: The biochemical challenge to evolution*, Free Press, Nueva York. [Trad. esp.: *La caja negra de Darwin*, Andrés Bello, Barcelona, 1999.]
- Bénard, H. (1900), «Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquid», *Revue Générale des Sciences Pures et Appliqués* 11, págs. 1309-1328.
- Bennet, P. (1998), «Imprint: Random thoughts and working papers», *Global Business Network* 2, págs. 1-11.
- Ben-Shem, A., F. Frolow y N. Nelson (2003), «Crystal structure of plant photosystem 1», *Nature* 426, págs. 630-635.
- Benyus, J.M. (2002), *Biomimicry: Innovation inspired by nature*, Perennial, Nueva York.
- Bergson, H. (1911), *Creative evolution*, trad. inglesa de A. Mitchell, Henry Holt & Co., Nueva York. [Trad. esp.: *La evolución creadora*, Espasa-Calpe, Madrid, 1973.]
- Bernal, J.D. (1965), «Discussion», en *The origin of prebiological systems and their molecular matrices* (ed. S.W. Fox), Academic Press, Nueva York.
- Bertalanffy, L. von (1968), *General systems theory*, George Braziller, Nueva York. [Trad. esp.: *Teoría general de los sistemas*, Fondo de Cultura Económica, México, 1976.]
- Block, H. (1956), «Surface tension as the cause of Bénard cells and surface deformation in a liquid fluid», *Nature* 178, págs. 650-651.
- Bloom, H.K. (1997), *The Lucifer principle: A scientific expedition into the forces of history*, Atlantic Monthly Press, Nueva York.

- Blum, H.F. (1968), *Time's arrow and evolution* (3ª ed.), Princeton University Press, Princeton (Nueva Jersey).
- Bohm, D. (1980), *Wholeness and the implicate order*, Routledge and Kegan Paul, Londres.
- (1988), *On creativity* (ed. Lee Nichol), Routledge, Londres.
- Boltzmann, L. (1886), *The second law of thermodynamics*, en *Ludwig Boltzmann: Theoretical physics and philosophical problems: Selected writings* (ed. B. McGinnes), D. Reidel, Dordrecht, 1974.
- Bonner, J.T. (1988), *The evolution of complexity by means of natural selection*, Princeton University Press, Princeton (Nueva Jersey).
- Bortz, W.M. (1984), «The disuse syndrome», *Western Journal of Medicine* 141, págs. 69-98.
- (1985), «Physical exercise as an evolutionary force», *Journal of Human Evolution* 14, págs. 145-156.
- (1986), «Aging as entropy», *Experimental Gerontology* 21, págs. 321-328.
- (1997), «Geriatrics: The effect of time in medicine», *Western Journal of Medicine* 166, págs. 313-318.
- (2001), *Living longer for dummies*, Hungry Mind, Nueva York.
- Bortz, W.M. y W.M. Bortz (1996), «How fast do we age? Exercise performance over time as a biomarker», *Journal of the American Geriatrics Society* 15A, págs. M223-M225.
- Bristol, T. (2003), «Cosmology from an engineering perspective», ponencia presentada en la Conferencia Internacional de Portland sobre Gestión de la Ingeniería y la Tecnología, Portland State University, 23 de julio.
- Brooks, D.R. y E.O. Wiley (1986), *Evolution as entropy: Toward a unified theory of biology*, University of Chicago Press, Chicago.
- Brown, J.H. (1981), «Two decades of homage to Santa Rosalia: Towards a general theory of diversity», *American Zoologist* 21, págs. 877-888.
- Brown, J.H., P.A. Marquet y M.L. Taper (1993), «Evolution of body size: Consequences of an energetic definition of fitness», *American Naturalist* 142, págs. 573-584.
- Brown, L.H., S. Postel, A.T. Durning, P. Weber, C. Flavin, N. Lenssen, M.D. Lowe, J.E. Young, A. Misch, M. Renner y H.F. French (1994), *The state of the world*, W.W. Norton & Co., Nueva York.
- Butler, S. (1863), «From our mad correspondent», *Canterbury Press*, 15 de septiembre, reimpresso en J. Jones (1959), *The cradle of Erewhon: Samuel Butler in New Zealand*, University of Texas Press, Austin, págs. 196-197.
- Cairns-Smith, A.G. (1982), *Genetic take-over and the mineral origins of life*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (1985), *Seven clues to the origin of life*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Cairns-Smith, A.G., A.J. Hall y M.J. Russell (1992), «Mineral theories of the origin of life and an iron sulfide example», *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 22, págs. 161-180.

- Carathéodory, C. (1976), «Investigations into the foundations of thermodynamics», en *The second law of thermodynamics* (ed. J. Kestin), Benchmark Papers on Energy 5, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg (Pensilvania), págs. 229-256.
- Cech, T.R. (1993), «The efficiency and versatility of catalytic RNA: Implications for an RNA world», *Gene* 135, págs. 33-36.
- Chaisson, E. (2001), *Cosmic evolution: The rise of complexity in nature*, Harvard University Press, Cambridge.
- Clausius, R. (1987), «The second law of thermodynamics», en *The world of physics* (ed. J.H. Weaver), vol. 1, Simon & Schuster, Nueva York.
- Clements, F.E. (1936), «Nature and structure of the climax», *Journal of Ecology* 24, págs. 252-425.
- Coles, D. (1965), «Transitions in circular Couette flow», *Journal of Fluid Mechanics* 21, págs. 385-425.
- Colinvaux, P. (1978), «Why big fierce animals are rare», reimpresso en *The nature of life: Readings in biology*, Great Books Foundation, Chicago, 2001, págs. 221-236. [Trad. esp.: *Por qué son escasas las fieras*, Hermann Blume, Barcelona, 1983.]
- Conrad, P.G. y K.H. Nealson (2001), «A non-Earthcentric approach to life detection», *Astrobiology* 1, págs. 15-24.
- Corliss, J.B. y R.D. Ballard (1997), «Oases of life in the cold abyss», *National Geographic* 152, págs. 441-453.
- Corning, P.A. y S.J. Kline (1998), «Thermodynamics, information, and life revisited. Part 2, “Thermoeconomics” and “control information”», *Systems Research and Behavioral Science* 15, págs. 453-482.
- Coveney, P. y R. Highfield (1991), *The arrow of time: The quest to solve science's greatest mystery*, HarperCollins, Londres.
- Cowles H.C. (1899), «The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan», *Botanical Gazette* 27, págs. 95-391.
- Crick, F. (1981), *Life itself: Its origin and nature*, Touchstone, Nueva York.
- Currie, D.J. (1991), «Energy and large-scale patterns of animal-and-plant species-richness», *American Naturalist* 137, págs. 27-48.
- Dawkins, R. (1982), *The extended phenotype*, Freeman, San Francisco.
- De Duve, C. (1991), *Blueprint for a cell*, Neil Patterson Publishers, Burlington (Carolina del Norte).
- De Duve, C. y S.L. Miller (1991), «Two-dimensional life?», *Proceedings of the National Academy of Science USA* 88, págs. 10014-10017.
- Dembski, W.A. (1998), *Design inference: Eliminating chance through small probabilities*, Cambridge University Press, Nueva York.
- (1999), *Intelligent design: The bridge between science and theology*, InterVarsity Press, Downers Grove (IL).
- (2000), *Science and evidence for design in the universe*, ponencias de un encuentro patrocinada por el Instituto Wethersfield, Nueva York, 25 de septiembre de 1999, Ignatius Press, San Francisco.

- Depew, D. y B. Weber (1994), *Darwinism evolving: Systems dynamics and the genealogy of natural selection*, MIT Press, Cambridge.
- Dierick, J.F., C. Fripiat, M. Salmon, F. Chainiaux y O. Toussaint (2003), «Stress, cells, and tissue aging», en *Modulating aging and longevity* (ed. S.I.S. Rattan), Kluwer Academic, Londres, págs. 101-125.
- Dobzhansky, T. (1973), «Nothing in biology makes sense except in the light of evolution», *American Biology Teacher* 35, págs. 125-129.
- Drexler, K.E. (1992), *Nanosystems: Molecular machinery, manufacturing, and computation*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- Dyson, F. (1994), «The universe as a home for life», conferencia para NTT Data New Paradigm Session, Hibiya Hall, Tokio, 18 de junio.
- (1999), *Origins of life*, edición revisada, Cambridge University Press, Cambridge.
- Dyson, G. (1997), *Darwin among the machines*, Addison Wesley Publishing Co., Reading (Massachusetts).
- Dyke, C. (1988), «Cities as dissipative structures», en *Entropy, information, and evolution: New perspectives on physical and biological evolution* (eds. B.H. Weber, D.J. Depew y J.D. Smith), MIT Press, Cambridge, págs. 355-367.
- Eddington, A. (1928), *The nature of the physical world*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Edis, T. (1998), «Taking creationism seriously», *Skeptic* 6(2), pág. 56.
- (2001), «Darwin in mind: Intelligent design meets artificial intelligence», *Skeptical Inquirer*, marzo/abril.
- Eigen, M. (1971), «Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules», *Naturwissenschaften* 58, págs. 465-523.
- Eigen, M., W. Gardiner, P. Schuster y R. Winkler-Oswatitsch (1981), «The origin of genetic information», *Scientific American*, abril, págs. 78-118.
- Eigen, M. y P. Schuster (1979), *The hypercycle: A principle of natural self-organization*, Springer-Verlag, Nueva York.
- Einstein, A.E. (1956), *Investigations on the theory of Brownian movement, 1906-1908*, Dover, Nueva York.
- Elsberry, W.R. (1999), reseña de *The design inference* de W.A. Dembski, *Reports of the National Center for Science Education* 19(2), pág. 32.
- Elton, C.S. (1930), *Animal ecology and evolution*, Oxford University Press, Nueva York.
- Enquist, B., J. Brown y G.B. West (1998), «Allometric scaling of plant diversity energetics and population density», *Nature* 395, págs. 163-167.
- Enquist, B. y K. Niklas (2001), «Invariant scaling relations across tree-dominated communities», *Nature* 410, págs. 655-660.
- Evans, D.J., E.G.D. Cohen y G.P. Morris (1993), «Probability of second law violations in shearing steady states», *Physical Review Letters* 71, págs. 2401-2404.
- Fermi, E. (1956), *Thermodynamics*, Dover, Nueva York.
- Feynman, R.P. (1960), «There's plenty of room at the bottom: An invitation to enter a new field of physics», *Engineering and Science* (Caltech), febrero.

- Fisher, R. (1930), *The genetical theory of natural selection*, Oxford University Press, Oxford.
- Flannery, T. (2001), *The eternal frontier*, Atlantic Monthly Press, Nueva York.
- Fry, I. (1995), «Are the different hypotheses on the emergence of life as different as they seem?», *Biology and Philosophy* 10, págs. 389-417.
- (2000), *The emergence of life on Earth: A historical and scientific overview*, Rutgers University Press, New Brunswick (Nueva Jersey).
- Gamow, G. (1961), *The great physicists: From Galileo to Einstein*, Dover, Nueva York.
- Gardner, J.N. (2003), *Biocosm: The new scientific theory of evolution: Intelligent life is the architect of the universe*, Inner Ocean Publishing, Maui (Hawai).
- Gaston, K.J. (2000), «Global patterns in biodiversity», *Nature* 405, págs. 220-227.
- Gates, D. (1962), *Energy exchange in the biosphere*, Harper Row, Nueva York.
- Gell-Mann, M. (1994), *The quark and the jaguar*, W.H. Freeman, San Francisco. [Trad. esp.: *El quark y el jaguar*, Tusquets Editores, col. Metatemas 38, Barcelona, 1995.]
- Georgescu-Roegen, N. (1971), *The entropy law and the economic process*, Harvard University Press, Cambridge.
- Gerstner, E. (2002), «Second law broken: Small-scale fluctuations could limit miniaturization», *Nature Science Update*, <http://www.nature.com/nsu/020722/020722-2.html>.
- Gibbs, J.W. (1902), *Elementary principles in a statistical mechanics: The rational field of thermodynamics*, Scribner and Sons, Nueva York.
- Gleason, H.A. (1926), «The individualistic concept of the plant association», *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 53, págs. 7-26.
- Gold, T. (1999), *The deep hot biosphere*, Copernicus Books, Nueva York.
- Goldman, M. (1983), *The demon in the aether: The story of James Clerk Maxwell*, Paul Harris, Edimburgo.
- Goldsmith, D. (1997), *The hunt for life on Mars*, Dutton, Nueva York.
- Gould, S.J. (1989), *Wonderful life: The Burgess Shale and the nature of history*, W.W. Norton & Co., Nueva York. [Trad. esp.: *La vida maravillosa*, Crítica, Barcelona, 1991.]
- (1992), *The panda's thumb: More reflections in natural history*, W.W. Norton & Co., Nueva York. [Trad. esp.: *El pulgar del panda*, Hermann Blume, Barcelona, 1993.]
- (1997), *Full house: The spread of excellence from Plato to Darwin*, Random House, Nueva York. [Trad. esp.: *La grandeza de la vida*, Crítica, Barcelona, 1997.]
- (2002), *The structure of evolutionary theory*, Harvard University Press, Cambridge. [Trad. esp.: *La estructura de la teoría de la evolución*, Tusquets Editores, col. Metatemas 82, Barcelona, 2004.]
- Grant, V. (1985), *The evolutionary process*, Columbia University Press, Nueva York.

- Gribbin, J. y M. Gribbin (2000), *Stardust: Supernovae and life: The cosmic connection*, Yale University Press, New Haven.
- Grinevald, J. (1986), «Sketch for a history of the idea of the biosphere», en *Gaia: The thesis, the mechanisms, and the implications* (eds. P. Bunyard y E. Goldsmith), Wadebridge Ecological Center, Camelford, Cornwall (Reino Unido), págs. 1-25.
- Groussard, C., I. Morel, M. Chevanne, M. Monnier, J. Cillard y A. Delamarche (2000), «Free radical scavenging and antioxidant effects of lactate ion: An in vitro study», *Journal of Applied Physiology* 89, págs. 169-175.
- Guillen, M. (1995), *Five equations that changed the world: The power and poetry of mathematics*, Hyperion, Nueva York.
- Günther, F. y C. Folke (1993), «Characteristics of nested living systems», *Journal of Biological Systems* 1, págs. 257-273.
- Haldane, J.B.S. (1967), «The origin of life», en *The origin of life* (ed. J.D. Bernal), Weidenfeld and Nicolson, Londres, págs. 242-249. [Publicado originalmente en *Rationalist Annual* (1929), págs. 3-10.]
- Halicke, P.V. (1993), *The first origin of the central nervous system and the meaning of REM sleep*, autopublicado.
- Hammond, K.A. y J. Diamond (1997), «Maximal sustained energy budgets in humans and animals», *Nature* 386, págs. 457-462.
- Harder, B. (2002), «Water for the rock: Did Earth's oceans come from the heavens?», *Science News* 161, págs. 184-186.
- Harold, F.M. (2001), *The way of the cell*, Oxford University Press, Oxford.
- Hatsopoulos, G. y J. Keenan (1965), *Principles of general thermodynamics*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- Hawking, S. (1990), *A brief history of time: from the big bang to black holes*, Bantam, Nueva York. [Trad. esp.: *Historia del tiempo*, Alianza, Madrid, 1997.]
- Hayflick, L. (1965), «The limited in vitro lifetime of human diploid cell strain», *Experimental Cell Research* 32, págs. 614-636.
- Heinen, W. y A.M. Lauwers (1996), «Organic sulfur compounds resulting from the interaction of iron sulfide, hydrogen sulfide, and carbon dioxide in an anaerobic aqueous environment», *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere* 26, págs. 131-150.
- Hetherington, A. y I. Woodward (2003), «The role of stomata in sensing and driving environmental change», *Nature* 424, págs. 203-208.
- Ho, M.-W. (1998), *The rainbow and the worm: The physics of organism* (2.ª edición), World Scientific, Singapur.
- Holbo, H.R. y J.C. Luvall (1989), «Modeling surface temperature distributions in forest landscapes», *Remote Sensing of Environment* 27, págs. 11-24.
- Holling, C.S. (1986), «The resilience of terrestrial ecosystems: Local surprise and global change», en *Sustainable development in the biosphere* (eds. W.M. Clark y R.E. Munn), Oxford University Press, Londres, págs. 292-320.
- Homer, M. W.M. Kemp y H. McKellar (1976), «Trophic analysis of an estuarine ecosystem: Salt marsh-tidal creek system near Crystal River, Florida», De-

- partamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Florida, Gainesville, manuscrito.
- Hoyle, F. y C. Wickramasinghe (1984), *Evolution from space: A theory of cosmic creationism*, Simon & Schuster, Nueva York.
- Hutchinson, G.E. (1965), *The ecological theater and the evolutionary play*, Yale University Press, New Haven. [Trad. esp.: *El teatro ecológico y el drama evolutivo*, Blume, Barcelona, 1979.]
- (1978), *An introduction to population ecology*, Yale University Press, New Haven.
- Jacobs, J. (1984), *Cities and the wealth of nations: Principles of economic life*, Random House, Nueva York.
- Jantsch, E. (1980), *The self-organizing universe: Scientific and human implications of the emerging paradigm of evolution*, Pergamon Press, Nueva York.
- Jaynes, E.T. (1957), «Information theory in statistical mechanics», *Physical Review* 106, págs. 620-630.
- Johnson, P. (1991), *Darwin on trial*, Regnery Gateway, Washington DC.
- (1995), *Reason in the balance: The case against naturalism in science, law, and education*, InterVarsity Press, Downers Grove (Illinois).
- Kant, I. (1790), *Critique of judgment*, Part 2, *Critique of teleological judgment*, trad. inglesa de W.S. Pluhar, Hackett Publishing Co., Indianapolis. [Trad. esp.: *Crítica del juicio*, Tecnos, Madrid, 2007.]
- Kaschke, M., M.J. Russell y W.J. Cole (1994), «[FeS/FeS₂]: A redox system for the origin of life», *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere* 24, págs. 43-56.
- Kauffman, S. (1993), *Origins of order: Self-organization and selection in evolution*, Oxford University Press, Nueva York.
- (1995), *At home in the universe*, Oxford University Press, Nueva York.
- (2000), *Investigations*, Oxford University Press, Oxford. [Trad. esp.: *Investigaciones*, Tusquets Editores, col. Metatemas 76, Barcelona, 2003.]
- Kellert, S.R. y T.J. Franham, eds. (2001), *The good in nature and humanity: Connecting science, religion, and spirituality with the natural world*, Island Press, New Haven.
- Kestin, J.A. (1979), *Course in thermodynamics*, McGraw-Hill, Nueva York.
- Keynes, J.M. (1997), *The general theory of employment, interest, and money*, Great Minds Series, Prometheus Books, Nueva York.
- Komoriya, K., N. Shibano, T. Higano, N. Azuma, S. Yamaguchi y S.I. Aizawa (1999), «Flagellar proteins and type III-exported virulence factors are the predominant proteins secreted into the culture media of *Salmonella typhimurium*», *Molecular Microbiology* 34, págs. 767-779.
- Koschmieder, E.L. (1993), *Bénard cells and Taylor vortices*, Harvard University Press, Cambridge.
- Koschmieder, E.L. y M.I. Biggerstaff (1986), «Onset of surface-tension-driven Bénard convection», *Journal of Fluid Mechanics* 167, págs. 49-64.
- Kurz, H.D. y N. Salvadori (1995), *Theory of production: a long-period analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Lambert, F.L. (1998), «Chemical kinetics: As important as the second law of thermodynamics?», *Chemical Educator* 3, <http://journals.springer-ny.com/chedr>.
- Leff, H.S. y A.F. Rex (1990), *Maxwell's demon*, Princeton University Press, Princeton (Nueva Jersey).
- Leontief, W.W. (1936), «Quantitative input-output relations in the economic system of the United States», *Review of Economics and Statistics* 18, págs. 105-125.
- Lewis, G.N. y M. Randall (1923), *Thermodynamics and the free energy of substances*, McGraw-Hill, Nueva York.
- Likens, G.E., F.H. Bormann, N.M. Johnson, D.W. Fisher y R.S. Pierce (1970), «Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem», *Ecological Monographs* 40, págs. 23-47.
- Lindeman, R.L. (1942), «The trophic-dynamic aspect of ecology», *Ecology* 23, págs. 399-418.
- Lotka, A.J. (1922), «Contribution to the energetics of evolution», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 8, págs. 148-154.
- (1945), «The law of evolution as a maximal principle», *Human Biology* 17, págs. 167-194.
- (1956), *Elements of mathematical biology*, Dover, Nueva York.
- Lovelock, J.E. (1979), *Gaia: A new look at life on Earth*, Oxford University Press, Oxford. [Trad. esp.: *Gaia: Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, Hermann Blume, Barcelona, 1983.]
- (1988), *The ages of Gaia: A biography of our living Earth*, W.W. Norton, Nueva York. [Trad. esp.: *Las edades de Gaia*, Tusquets Editores, col. 29, Barcelona, 1993.]
- (2003), «The living Earth», *Nature* 426, págs. 769-770.
- Lovett, R. (2002), «Beat the clock», *American Scientist* 174, págs. 30-33.
- Luvall, J.C. y H.R. Holbo (1989), «Measurements of short term thermal responses of coniferous forest canopies using thermal scanner data», *Remote Sensing of Environment* 27, págs. 1-10.
- (1991), «Thermal remote sensing methods in landscape ecology», en *Quantitative methods in landscape ecology* (eds. M. Turner y R.H. Gardner), cap. 6, Springer-Verlag, Nueva York.
- MacArthur, R.H. (1958), «Population ecology of some warblers of northeastern coniferous forests», *Ecology* 39, págs. 599-619.
- MacArthur, R.H. y E.O. Wilson (1963), «An equilibrium theory of insular zoogeography», *Evolution* 17, págs. 373-387.
- Margalef, R. (1968), *Perspectives in ecological theory*, Chicago University Press, Chicago. [Trad. esp.: *Perspectivas de la teoría ecológica*, Hermann Blume, Barcelona, 1971.]
- Margulis, L. y D. Sagan (1990), *Origins of sex: Four billion years of genetic recombination*, Yale University Press, New Haven.

- (1997a), *Microcosmos: Four billion years of microbial evolution*, University of California Press, Berkeley. [Trad. esp.: *Microcosmos*, Tusquets Editores, col. Metatemas 39, Barcelona, 1995.]
- (1997b), *What is sex?*, Simon & Schuster, Nueva York. [Trad. esp.: *¿Qué es el sexo?*, Tusquets Editores, col. Metatemas 55, Barcelona, 1998.]
- (2002), *Acquiring genomes: A theory of the origins of species*, Basic Books, Nueva York.
- Marschall, L. (1994), «A world that slipped away», *Sciences* 34, págs. 45-56.
- Marshall, R. y R. Mapplethorpe (1986), *Fifty New York artists*, Chronicle Books, San Francisco.
- Matsuno, K. (1978), «Evolution of dissipative systems: A theoretical basis of Margalef's principle on ecosystems», *Journal of Theoretical Biology* 70, págs. 23-31.
- Matthews, C. (2000), «Chemical evolution in a hydrogen cyanide world», en *Environmental evolution: Effects of the origin and evolution of life on planet Earth* (eds. L. Margulis, C. Matthews y A. Haselton), 2.^a ed., MIT Press, Cambridge, págs. 48-64.
- Maturana, H.R. y F.J. Varela (1981), *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*, Boston Studies in the Philosophy of Science 42, D. Reidel, Boston.
- Maxwell, J.C. (1878), *The scientific papers of James Clerk Maxwell* (ed. W.D. Nivens), Cambridge University Press, Cambridge.
- Mayr, E. (1961), «Cause and effect in biology», *Science* 134, págs. 1501-1506.
- (1982), *The growth of biological thought*, Harvard University Press, Cambridge.
- (2001), *What evolution is*, Basic Books, Nueva York.
- McKeon, R. (2001), *The basic works of Aristotle*, Princeton University Press, Princeton (Nueva Jersey).
- Merkle, R.C. (2001), «That's impossible! How good scientists reach bad conclusions», <http://www.zyvex.com/nanotech/impossible.html>.
- Mikulecky, D. (1993), *Applications of network thermodynamics to problems in biomedical engineering*, Nueva York University Press, Nueva York.
- Miller, S.M. y L.E. Orgel (1974), *The origins of life on the Earth*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (Nueva Jersey).
- Mojzsis, S.J., G. Arrhenius, K.D. McKeegan, T.M. Harrison, A.P. Nutman y C.R.L. Friend (1996), «Evidence for life on Earth before 3800 million years ago», *Nature* 384, págs. 55-59.
- Monod, J. (1974), *Chance and necessity*, Fontana Books, Glasgow. [Trad. esp.: *El azar y la necesidad*, Tusquets Editores, col. Metatemas 6, Barcelona, 1981.]
- Montalenti, G. (1974), «From Aristotle to Democritus via Darwin: A short survey of a long historical and logical journey», en *Studies in the philosophy of biology: Reduction and related problems* (eds. F. Ayala y T. Dobzhansky), University of California Press, Berkeley.

- Moore, W. (1992), *Schrödinger: Life and thought*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Morowitz, H.J. (1979), *Energy flow in biology: Biological organization as a problem in thermal physics*, Ox Bow Press, Woodbridge (Connecticut).
- (1992), *The beginnings of cellular life: Metabolism recapitulates biogenesis*, Yale University Press, New Haven.
- (1997), *The kindly Dr. Guillotin, and other essays on science and life*, Counterpoint, Washington DC. [Trad. esp.: *El filantrópico doctor Guillotin*, Tusquets Editores, col. Metatemas 88, Barcelona, 2005.]
- (2002), *The emergence of everything: How the world became complex*, Oxford University Press, Nueva York.
- Morris, H.M. (1993), *Biblical creationism: What each book of the Bible teaches about creation and the flood*, Baker, Grand Rapids.
- Morris, S.C. (2003), *Life's solution*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Murphy, M.P. y L.A.J. O'Neil, eds. (1995), *What is life? The next fifty years: Speculations on the future of biology*, Cambridge University Press, Cambridge. [Trad. esp.: *La biología del futuro*, Tusquets Editores, col. Metatemas 58, Barcelona, 1999.]
- Musgrave, C.B., J.K. Perry, R.C. Merkle y W.A. Goddard (1992), «Theoretical studies of a hydrogen abstraction tool for nanotechnology», *Nanotechnology* 2, págs. 87-195.
- New School (2004), «Nicholas Georgescu-Roegen, 1906-1994», <http://cepa.newschool.edu/het/profiles/georgescu.htm>.
- Nicolis, G. y I. Prigogine (1977), *Self-organization in nonequilibrium systems*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- (1989), *Exploring complexity*, W.H. Freeman, San Francisco.
- Niesert, U., D. Harnasch y C. Bresch (1981), «Origin of life between Scylla and Charybdis», *Journal of Molecular Evolution* 17, págs. 348-353.
- Nisbet, E.G. y N.H. Sleep (2001), «The habitat and nature of early life», *Nature* 409, págs. 1083-1091.
- Nitecki, M.H., ed. (1988), *Evolutionary progress*, Chicago University Press, Chicago.
- Nørretranders, T. (1991), *The user illusion: Cutting consciousness down to size*, trad. inglesa de J. Sydenham, Viking, Nueva York.
- Numbers, S.L. (1998), *Darwinism comes to America*, Harvard University Press, Cambridge.
- Odum, E.P. (1969), «The strategy of ecosystem development», *Science* 164, págs. 262-270.
- (1971), *Fundamentals of ecology*, W.B. Saunders Co., Philadelphia.
- Odum, H.T. (1971), *Environment, power, and society*, Wiley Interscience, Nueva York. [Trad. esp.: *Ambiente, energía y sociedad*, Blume, Barcelona, 1980.]
- Odum, H.T. y R.C. Pinkerton (1995), «Time's speed regulation: The optimum efficiency for maximum output in physical and biological systems», *American Scientist* 43, págs. 331-343.

- O'Grady, R.T. y D.R. Brooks (1988), «Teleology and biology», en *Entropy, information, and evolution: New perspectives on physical and biological evolution* (eds. B.H. Weber, D.J. Depew y J.D. Smith), MIT Press, Cambridge, págs. 285-316.
- Olsen, P.E., D.V. Kent, H.D. Sues, C. Koeberl, H. Huber, A. Montanari, E.C. Rainforth, S.J. Fowell, M.J. Szajna y B.W. Hartline (2002), «Ascent of dinosaurs linked to Ir anomaly at Triassic-Jurassic boundary», *Science* 296, págs. 1305-1307.
- Onsager, L. (1931a), «Reciprocal relations in irreversible processes. Part 1», *Physical Review* 37, pág. 405.
- (1931b), «Reciprocal relations in irreversible processes. Part 2», *Physical Review* 38, pág. 2268.
- Oparin, A. (1964), *The chemical origins of life*, trad. inglesa de A. Synge, C.C. Thomas, Springfield (Illinois).
- Oster, G.F., I.L. Silver y C.A. Tobias, eds. (1974), *Irreversible thermodynamics and the origin of life*, Gordon and Breach Science Publishers, Nueva York.
- Oviatt, C.A., H. Walker y M.E.Q. Pilon (1980), «An exploratory analysis of microcosm and ecosystem behavior using multivariate techniques», *Marine Ecology Progress Series* 2, págs. 179-191.
- Pagels, H.R. (1989), *The dreams of reason*, Bantam, Nueva York.
- Peacocke, A.R. (1983), *The physical chemistry of biological processes*, Oxford University Press, Oxford.
- (1986), *God and the new biology*, Dent, Londres.
- Pearson, J.R.A. (1958), «On convection cells induced by surface tension», *Journal of Fluid Mechanics* 4, págs. 489-500.
- Peebles, P.J.E. (1993), *Principles of physical cosmology*, Princeton University Press, Princeton (Nueva Jersey).
- Pigliucci, M. (2000), «Chance, necessity, and the new holy war against science: A review of W.A. Dembski's *The design inference*», *BioScience* 50, págs. 79-81.
- (2001), «Chaos, fractals, complexity and the limits of science», *Skeptic* 8, págs. 62-70.
- Pollan, M. (1998), «Playing God in the garden», *New York Times Sunday Magazine*, 25 de octubre.
- Popper, K. (1974), «Reduction and the incompleteness of science», en *Studies in the philosophy of biology: Reduction and related problems* (eds. F. Ayala y T. Dobzhansky), University of California Press, Berkeley, págs. 259-284.
- (1976), *Unended quest*, Open Court Publishing, Chicago.
- (1990), *A world of propensities*, Thoemmes, Bristol.
- Price, H. (1996), *Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of time*, Oxford University Press, Nueva York.
- Prigogine, I. (1955), *Thermodynamics of irreversible processes*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- (1981), *From being to becoming: Time and complexity in the physical sciences*, W.H. Freeman & Co., Nueva York.

- Prigogine, I. e I. Stengers (1984), *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*, Bantam, Nueva York. [Trad. esp.: *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Alianza Editorial, Madrid, 2002.]
- Raleigh, Lord (1916), «On convection currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the underside», *Philosophical Magazine* 32, págs. 529-546.
- Rauner, J. (1976), «Deciduous forests», en *Vegetation and the atmosphere* (ed. J. Montheith), vol. 2, Academic Press, Londres, págs. 241-265.
- Rifkin, J. (1980), *Entropy: A new world view*, Viking, Nueva York.
- Rohde, K. (1992), «Latitudinal gradients in species diversity: The search for the primary cause», *Oikos* 65, págs. 514-527.
- Rosen, R. (1991), *Life itself: A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*, Columbia University Press, Nueva York.
- Rössler, O.E. (2002), «The world as interface», ponencia presentada en el Segundo Ciclo de Invierno de Ciencia y Tecnología: Dinámica de Fluidos: Sistemas Complejos y Autoorganización, Centro Cultural Conde Duque, Madrid, 12 de marzo.
- Ruse, M. (2003), *Does evolution have a purpose?*, Harvard University Press, Cambridge.
- Russell, M.J., R.M. Daniel, A.J. Hall y J. Sherringham (1994), «A hydrothermally precipitated catalytic iron sulphide membrane as a first step toward life», *Journal of Molecular Evolution* 39, págs. 231-243.
- Russell, M.J., A.J. Hall, A.G. Cairns-Smith y P.S. Braterman (1998), «Submarine hot springs and the origins of life», *Nature* 336, pág. 117.
- Sagan, D. y L. Margulis (1993), *Garden of microbial delights: A practical guide to the subvisible world*, Kendall/Hunt Publishing Co., Dubuque (Iowa).
- Sagan, D. y E.D. Schneider (2000), «The pleasures of change», en *The forces of change: A new view of nature*, National Geographic, Washington DC, págs. 115-126.
- Sagan, D. y J. Witheside (2004), «Gradient-reduction theory: Thermodynamics and the purpose of life», en *Scientists debate Gaia: A new century*, MIT Press, Cambridge.
- Saunders, H.L. (1968), «Marine benthic diversity: A comparative study», *American Naturalist* 102, págs. 243-282.
- Schneider, E.D. (1988), «Thermodynamics, information, and evolution: New perspectives on physical and biological evolution», en *Entropy, information, and evolution: New perspectives on physical and biological evolution* (eds. B.H. Weber, D.J. Depew y J.D. Smith), MIT Press, Cambridge, págs. 108-138.
- (1995), «Order from disorder: The thermodynamics of complexity in biology», en *What is life? The next fifty years* (eds. M.P. Murphy y L.A.J. O'Neil), Cambridge University Press, Cambridge, págs. 161-173.
- Schneider, E.D. y J.J. Kay (1989), «Nature abhors a gradient», en *Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the International Society for the Systems*

- Sciences (ed. P.W.J. Ledington), vol. 3, International Society for the Systems Sciences, Edinburgh, págs. 19-23.
- (1994a), «Complexity and thermodynamics: Towards a new ecology», *Futures* 24, págs. 626-647. Archivado en <http://www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs/futures/tex.html>.
- (1994b), «Life as a manifestation of the second law of thermodynamics», *Mathematical and Computer Modeling* 19, págs. 25-48.
- Schneider, S., P. Boston y E. Crist, eds. (2004), *Scientists debate Gaia: A new century*, MIT Press, Cambridge.
- Schrödinger, E. (1944), *What is life? The physical aspect of the living cell*, Cambridge University Press, Cambridge. [Trad. esp.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores, col. Metatemas 1, Barcelona, 1983.]
- Schumpeter, J.A. (1939), *Business cycles*, McGraw-Hill, Nueva York.
- (1942), *Capitalism, socialism, and democracy*, Harper, Nueva York.
- Schwartzman, D. (1999), *Life, temperature, and the Earth*, Columbia University Press, Nueva York.
- Sellers, P.J. y Y.A. Mintz (1986), «Simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models», *Journal of Atmospheric Science* 43, págs. 505-531.
- Selye, H. (1936), «A syndrome produced by diverse noxious agents», *Nature* 138, pág. 32.
- (1976), *Stress in health and disease*, Butterworth, Boston.
- Shannon, C.E. y W. Weaver (1949), *On the mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, Urbana.
- Sherman, K., C. Jones, L. Sullivan, W. Smith, P. Berrien y L. Ejsymont (1981), «Congruent shifts in sand eel abundance in western and eastern North Atlantic ecosystems», *Nature* 291, págs. 486-489.
- Smil, V. (2002), *The Earth's biosphere: Evolution, dynamics, and change*, MIT Press, Cambridge.
- Smith, A. (1991), *The wealth of nations*, Prometheus Books, Nueva York.
- Smolin, L. (1997), *The life of the cosmos*, Oxford University Press, Oxford.
- Snow, C.P. (1969), *The two cultures and a second look*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Solé, R.V. y B. Goodwin (2001), *Signs of life: How complexity pervades biology*, Basic Books, Nueva York.
- Soros, G. (1997), «The capitalist threat», *Atlantic Monthly* 279, págs. 45-58.
- Sperandeo, V. (1993), *Trader Vic: Methods of a Wall Street master*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- Squires, S. (2002), «In it for the long run: Exercise is key to the prescription for healthy aging, no matter how old you are», *Washington Post*, 23 de abril.
- Stapledon, O. (1947), «The flames: A fantasy», en *An Olaf Stapledon reader* (ed. R. Crossley), Syracuse University Press, Siracusa.
- Stehli, F.G. y J.W. Wells (1971), «Diversity and age patterns in hermatypic corals», *Systematic Zoology* 20, págs. 115-126.

- Swenson, R. (1989), «Emergent attractors and the law of maximum entropy production: Foundations to a theory of general evolution», *Systems Research* 6, págs. 187-197.
- Swenson, R. y M.T. Turvey (1991), «Thermodynamic reasons for perception-action cycles», *Ecological Psychology* 3, págs. 317-348.
- Szent-Györgyi, A. (1961), introducción a *Light and life* (eds. W.D. McElroy y B. Glass), Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Taha, H., H. Akbari y D. Sailor (1992), «On the simulation of urban climates: Sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating», nota técnica, Lawrence Berkeley Library, Berkeley.
- Tanford, C. y J. Reynolds (1995), «What price philosophy? A review of *Ludwig Boltzmann: His later life and philosophy, 1900-1908*, ed. John Blackmore», *Nature* 378, pág. 673.
- Taylor, G.I. (1923), «Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders», *Philosophical Transactions of the Royal Society London A* 223, págs. 289-343.
- Teilhard de Chardin, P. (1976), *The phenomenon of man*, Perennial, Nueva York. [Trad. esp.: *El fenómeno humano*, Taurus, Madrid, 1963.]
- Teller, W. (1938), *The atheism of astronomy: A refutation of the theory that the universe is governed by intelligence*, Truth Weeker Co., Nueva York. También disponible en http://www.infidels.org/library/historical/woolsey_teller/index.html.
- Thompson, D.W. (1917), *On growth and form*, Cambridge University Press, Cambridge. [Trad. esp.: *Sobre el crecimiento y la forma*, Hermann Blume, Barcelona, 1980.]
- Thompson, M. (1999), *Teach yourself Eastern philosophy*, Hodder and Stoughton Educational, Londres.
- Thorpe, E.O. (1966), *Beat the dealer: The book that made Las Vegas change the rules*, Random House, Nueva York.
- Tipler, F.J. (1995), *The physics of immortality: Modern cosmology, God, and the resurrection of the dead*, Anchor Books, Nueva York. [Trad. esp.: *La física de la inmortalidad*, Alianza, Madrid, 1996.]
- Toussaint, O., J. Remacle, J.F. Dierick, P. Pascal, C. Fripiat, V. Royer y F. Chainiaux (2002), «Approach of evolutionary theories of aging, stress, senescence-like phenotypes, calorie restriction, and hormesis from the viewpoint of far-from-equilibrium thermodynamics», *Mechanism of Ageing and Development* 123, págs. 937-946.
- Toussaint, O., M. Salmon, V. Royer, J.F. Dierick, J.P. de Magalhaes, F. Wenders, S. Zdanov, A. Chrétien, C. Borlon, P. Pascal y F. Chainiaux (2003), «Role of subcytotoxic stress in tissue ageing: Biomarkers of senescence, signal transduction, and proteomics in stress-induced premature senescence», en *Topics in Current Genetics* (eds. T. Nyström y H.D. Osiewacz), vol. 3, Springer-Verlag, Berlín, págs. 269-294.
- Trewavas, A. (2002), «Mindless mastery», *Nature* 415, pág. 841.

- Tribus, M. y E.C. McIrvine (1971), «Energy and information», *Scientific American* 225, pág. 180.
- Twain, M. (1883), *Life on the Mississippi*, J.R. Osgood, Boston.
- Ulanowicz, R.E. (1985), «Community measures of marine food networks and their possible applications», en *Flows of energy and materials in marine ecosystems* (ed. M.J.R. Fasham), Plenum, Londres, págs. 23-47.
- (1986), *Growth and development: Ecosystems phenomenology*, Springer-Verlag, Nueva York.
- (1995), «Occam's razor is a double-edged blade», *Zygon* 30, págs. 249-266.
- (1997), *Ecology: The ascendant perspective*, Columbia University Press, Nueva York.
- Ulanowicz, R.E. y B.M. Hannon (1987), «Life and the production of entropy», *Proceedings of the Royal Society London B* 232, págs. 181-192.
- Valentine, J.W., A.G. Collins y C.P. Meyer (1994), «Morphological complexity increase in metazoans», *Paleobiology* 20, págs. 131-142.
- Van Fraassen, B.C. (1985), *An introduction to the philosophy of time and space*, Columbia University Press, Nueva York.
- Vernadsky, V.I. (1929), *The biosphere*, trad. inglesa de D.B. Langmuir, Copernicus Books, Nueva York, 1998.
- Victoroff, J. (2002), *Saving your brain: The revolutionary plan to boost brain power, improve memory, and protect yourself against aging and Alzheimer's*, Bantam Books, Nueva York.
- Vincent, W.F. y C. Howard-Williams (2000), «Life on snowball Earth», *Science* 287, pág. 2421.
- Von Baeyer, H.C. (1998), *Maxwell's demon: Why warmth disperses and time passes*, Random House, Nueva York.
- Von Mises, L. (1997), *Human action: A treatise on economics*, Fox & Wilkes, San Francisco.
- Von Neumann, J. (1948), «The general and logical theory of automata», en *Cerebral mechanisms in behavior: The Hixon Symposium* (ed. L.A. Jeffress), John Wiley, Nueva York, 1951, págs. 1-41.
- Wächtershäuser, G. (1992), «Groundworks for an evolutionary biochemistry: The iron-sulphur world», *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 58, págs. 85-201.
- Wang, G.M., E.M. Sevick, E. Mittag, D.J. Searles y D.J. Evans (2002), «Experimental demonstration of violations of the second law of thermodynamics for small systems and short time scales», *Physical Review Letters* 89, pág. 050601.
- Watts, A.W. (1970), *Does it matter? Essays on man's relation to materiality*, Pantheon Books, Nueva York.
- (1989), *The book: On the taboo against knowing who you are*, Vintage, Nueva York.
- Weber, B.H. (2003), «Life», *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/life/#oth>.

- Westbroek, P. (2000), «Strengthening Gaia: A new category», Abstracts guide 14, Second Chapman Conference on the Gaia Hypothesis, American Geophysical Union, Valencia, España.
- Whitfield, J. (2001), «All creatures great and small», *Nature* 413, págs. 342-344.
- Wicken, J. (1987), *Evolution, thermodynamics, and information: Extending the Darwinian program*, Oxford University Press, Nueva York.
- Williams, G. (1997), *Chaos theory tamed*, Joseph Henry Press, Washington DC.
- Williams, R.J.P. y J.J.R. Fraústo da Silva (2002), «The systems approach to evolution», *Biochemical and Biophysical Research Communications* 297, págs. 689-699.
- Williamson, D. (2003), *Origins of larvae*, Kluwer Academic, Dordrecht (Holanda).
- Willis, K.J. y R.J. Whittaker (2002), «Species diversity: Scale matters», *Science* 295, págs. 1245-1248.
- Wilson, E.O. (1992), *The diversity of life*, Harvard University Press, Cambridge. [Trad. esp.: *La diversidad de la vida*, Crítica, Barcelona, 2001.]
- (1998), *Cosilience*, Knopf, Nueva York. [Trad. esp.: *Cosilience: La unidad del conocimiento*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 1999.]
- (2002), *The future of life*, Knopf, Nueva York. [Trad. esp.: *Cosilience: El futuro de la vida*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 2002.]
- Wipple, A.B.C. (1982), *Storm*, Time Life Books, Nueva York.
- Woese, C.R. (1987), «Bacterial evolution», *Microbiology Review* 51, págs. 221-271.
- Wolfram, S. (2002), *A new kind of science*, Wolfram Media, Champaign (Illinois).
- Woodwell, G. (1970), «The energy cycle of the biosphere», en *The Biosphere* (eds. de Scientific American), W.H. Freeman & Co., San Francisco.
- Worster, D. (1979), *Nature's economy: The roots of ecology*, Doubleday, Nueva York.
- Wright, D.H. (1983), «Species energy theory: An extension of species area theory», *Oikos* 41, págs. 496-506.
- Wright, R. (2000), *Nonzero: The logic of human destiny*, Pantheon, Nueva York. [Trad. esp.: *Nadie pierde: La teoría de juegos y la lógica del destino humano*, Tusquets Editores, col. Metatemas 89, Barcelona, 2005.]
- Wullschleger, S., F. Meinzer y R. Vertessy (1998), «A review of whole-plant water use studies in trees», *Tree Physiology* 18, págs. 499-512.
- Yates, F.E. (1987), *Self-organizing systems: The emergence of order*, Plenum, Nueva York.
- Yates, F.E. y L.A. Benton (1995), «Biological senescence: Loss of integration and resilience», *Canadian Journal of Aging* 14, págs. 106-120.
- Yockey, H.P. (1992), *Information theory and molecular biology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (1995), «Information in bits and bytes: Reply to Lifson's review of *Information theory and molecular biology*», *BioEssays* 17, págs. 85-88.

- Young, G.M., D.H. Schmiel y V.L. Miller (1999), «A new pathway for the secretion of virulence factors by bacteria: The flagellar export apparatus functions as a protein-secretion system», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 96, págs. 6456-6461.
- Zotin, A.I. (1972), *Thermodynamic aspects of developmental biology, Monographs in Developmental Biology*, vol. 5, S. Karger, Basilea.
- (1984), «Bioenergetic trends of evolutionary progress of organisms, en *Thermodynamics and regulation of biological processes* (eds. I. Lamprecht y A.I. Zotin), Walter de Gruyter, Berlín, págs. 451-458.

Índice onomástico

- Abraham, Ralph, 143, 323
Agustín de Hipona, 79
Amontons, Guillaume, 64, 72
Anaxágoras, 58, 98
Anderson, Philip, 323
Aristóteles, 22, 46, 232, 363, 370, 371, 377, 378
Armstrong, Neil, 83
Arrhenius, Svante August, 207
Assenheimer, Michel, 161
Atkins, P.W., 50
Audubon, John James, 298, 299
- Bak, 143
Bankhead, Tallulah, 20
Barabasi, 143
Barghoon, Elso, 206
Beckett, Samuel, 30
Beethoven, Ludwig van, 195
Behe, Michael, 51, 162, 380, 383
Belousov, B.P., 135
Bénard, Henri, 21, 113, 152, 154, 156-160, 162, 163, 165, 166, 175, 179, 232, 272, 308, 345
Bennet, Peter, 354
Bergson, Henri, 188, 189
Bernarl, J.D., 205
Bernstein, Max, 221
Berry, Wendell, 235
Bertalanffy, Ludwig von, 143
- Besso, Michele, 91
Biggerstaff, Mike, 161
Black, Joseph, 65, 70
Blake, William, 11, 37, 74, 75, 319
Block, H., 159-160
Bloom, Howard, 348
Blum, Harold F., 48-49, 185
Bohm, David, 114
Bohr, Niels, 38, 87
Boltzmann, Ludwig, 27, 29, 78, 79, 81, 85-87, 89, 90, 92, 93, 101-105, 107, 165, 188, 189, 197, 293, 389, 391
Booner, John Tyler, 304
Borges, Jorge Luis, 11
Bormann, F. Herbert, 265
Born, Max, 38, 102
Bortz, Walter M., 319, 320, 324, 325, 327, 331, 333
Boyle, Robert, 72, 85
Braun, Karl Ferdinand, 111
Bresch, 215
Brillouin, 45
Bristol, T., 84
Brodsky, Joseph, 15, 362
Brooks, Daniel, 238, 370, 371
Brown, James, 143, 305, 306
Byrne David, 29
Buchanan, John, 216
Buckland, William, 30
Butler, Samuel, 338

Cairns-Smith, A.G., 210, 223, 224, 228, 230
 Calmet, Jeanne, 319
 Carathéodory, Constantin, 107-109
 Carlson, Rachel, 241
 Cech, Thomas, 213
 Celsius, Anders, 65
 Cézanne, Paul, 125
 Chaisson, Eric, 58
 Chandrasekhar, Subrahmanyan, 159
 Charles, Jacques Alexandre César, 72, 85
 Clarke, Arthur, 126
 Clausius, Rudolf Julius Emanuel, 29, 73-76, 207, 127
 Clements, Frederic, 240, 255
 Clinton, Bill, 380
 Coles, Donald, 169, 170
 Colinvaux, 242
 Copérnico, 365, 374
 Corliss, Jack, 224-226, 228, 229
 Cowles, Henry Chandler, 239, 240, 245, 255
 Crick, Francis, 19, 39, 207
 Curie, Marie, 258
 Currie, David, 302, 303

 Dalton, John, 66
 Darwin, Charles, 40, 45, 77, 79, 84, 92, 105, 187, 193-195, 206, 207, 216, 223, 292, 307, 365, 372, 374, 377
 Davis, Miles, 315
 Dawkins, Richard, 213, 216, 231, 382
 De Duve, Christian, 213, 222
 De Kooning, Willem, 370
 De Moivre, Abraham, 48
 Delbrück, Max, 211, 212
 Demar, Clarence, 326
 Dembski, William, 50, 51, 395, 396
 Demócrito, 66, 363
 Depew, David, 292
 Descartes, René, 363, 364
 Diamond, Jared, 262
 Dick Philip K., 11, 332
 Dickinson, Emily, 107
 Dobzhansky, Theodosius, 46, 382
 Dostoyevski, Fiódor, 195
 Drexler, K.E., 125
 Dyke, C., 340, 341, 343, 345
 Dyson, Freeman, 205, 211-215, 218, 221, 228, 231, 339, 390

 Early, Bill, 131, 135
 Eddington, Sir Arthur, 127, 133
 Edis, Taner, 379, 385
 Eigen, Manfred, 136, 140, 211-213, 215, 216, 229
 Einstein, Albert, 29, 38, 54, 87, 89-92, 98, 102, 197, 356
 Eliot, T.S., 29, 180
 Elton, Charles, 242
 Enquist, Brian, 305
 Enquist, Bruce, 305
 Epicuro, 66

 Fahrenheit, Daniel Gabriel, 65
 Feinstein, David, 98, 99
 Feigenbaum, 143
 Fermi, Enrico, 111
 Feynman, Richard, 97-98, 126
 Fischer, Ronald, 293
 Fraústo da Silva, J.J.R. 209
 Freud, Sigmund, 369
 Fry, Iris, 210, 213, 222, 233
 Frost, Robert, 352

 Galeno, 65
 Galilei, Galileo, 64
 Galois, Evariste, 49
 Gandhi, 255
 Gaston, Kevin, 300, 307
 Gates, David, 274
 Gay-Lussac, Joseph-Louis, 72, 85, 86, 127

Gell-Mann, Murray, 52
 Georgescu-Roegen, Nicholas, 238, 345-347
 Gibbs, Josiah Willard, 29, 80, 93, 102, 103, 107, 111
 Glansdorff, P., 117
 Gleason, Henry Allen, 143, 240
 Gödel, Kurt, 90
 Gold, Thomas, 228, 391
 Goodwin, Brian, 323
 Gould, Stephen Jay, 194-197, 216, 292-295, 314, 323, 378

 Haeckel, Ernst, 195, 216
 Haken, 143
 Haldane, John Burdon Sanderson, 206, 207, 217, 293
 Hammond, Kimberly, 262
 Harnasch, 215
 Harold, Franklin M., 278
 Hatsopoulos, George, 30, 109, 110, 112
 Hawking, Stephen, 94, 328, 390, 391
 Hayflick, Leonard, 320, 331
 Helmholtz, Hermann von, 74
 Heisenberg, Werner, 38
 Heráclito, 64, 84, 141
 Herschel, John, 65
 Hipócrates, 65
 Hitler, Adolf, 37
 Ho, Mae-Wan, 151, 207, 208
 Hoffmann, Roald, 141
 Holbo, H.R., 283, 284
 Homer, Mark, 252, 266
 Hovel, David, 214n
 Hoyle, Sir Frederick, 221
 Hume, David, 341
 Hutchinson, G. Evelyn, 27, 28, 240, 241, 243, 245, 247, 289, 302
 Huxley, T.H., 216, 217

 Jacobs, Janet, 341
 Jantsch, Erich, 141, 142

 Jaynes, E.T., 50
 Johnson, Phillip, 380
 Johnstone, J., 192
 Joule, James Prescott, 71, 107, 108

 Kant, Immanuel, 17, 186, 202, 207, 231
 Katchalsky, Aharon, 143, 206, 207, 210
 Kauffman, Stuart, 87, 88, 128, 129, 132, 143, 222, 238, 255, 398
 Kay, James, 62, 238, 280
 Keenan, Joseph Henry, 30, 109, 110, 112
 Kelvin (Lord). *Véase* Thomson, William
 Kemp, Mike, 252, 266
 Kestin, Joseph, 30, 110, 111
 Kierkegaard, Søren, 388
 Kilmer, Joyce, 269
 Koschmieder, Lothar, 160, 161
 Kundera, Milan, 88
 Kurz, Heinz, 347

 Lamarck, Jean-Baptiste, 195, 238
 Lambert, Frank L., 120, 125
 Laplace, Pierre Simon, 197
 Laszlo, 143
 Lavoiser, Antoine, 86
 Le Châtelier, Henri-Louis, 110, 111
 Leonardo da Vinci, 54
 Leontief, Wassily, 249, 334
 Leucipo, 66
 Lewis, Gilbert Newton, 103
 Likens, Gene, 265
 Lindeman, Raymond, 241, 242
 Lorenz, Edward, 59, 143
 Loschmidt, Johan Josef, 78, 88-91
 Lotka, Alfred, 30, 115, 118, 131, 133-135, 144, 189, 190-194, 238, 295, 311
 Lovelock, James, 142, 187, 380
 Lovett, R., 321

Lowenstam, Heinz, 218
 Lucrecio, 66
 Luvall, Jeffrey, 283-286

 MacArthur, Robert, 243, 244, 303
 Mach, Ernst, 101
 Mandelbrot, Benoit, 59
 Margalef, Ramón, 238, 244-247, 252, 289, 311
 Margulis, Lynn, 142
 Marquet, Pablo, 305
 Marx, Karl, 346
 Matthews, Clifford, 232, 233
 Maxwell, James Clerk, 29, 79, 94-100, 103, 127, 293
 Mayer, Robert Julius, 71, 73, 74
 Mayr, Ernst, 186, 187, 311, 314, 371, 372, 390
 McKellar, Hugh, 252, 266
 McLuhan, Marshall, 338, 351
 McShea, Jack, 82
 Meierhenrich, Uwe, 221
 Mendel, Gregor, 189
 Merkle, Ralph C., 125
 Mikulecky, Don, 30, 107, 108, 112, 143
 Millay, Edna St. Vincent, 131
 Miller, Stanley, 206-208, 217, 218, 227, 232
 Mintz, Yale, 282
 Mises, Ludwig von, 334, 339
 Monet, Claude 125
 Monod, Jacques, 222
 Montalenti, G., 384
 Morowitz, Harold, 51, 122, 132, 206, 210, 229, 323, 343
 Morris, Simon Conway, 315
 Murphy, Michael P., 189

 Neelson, Kenneth, 127
 Nernst, Walther, 128
 Neumann, John von, 48, 215

 Newton, Sir Isaac, 32, 38, 66, 67, 77, 83, 86, 87, 91, 186, 197, 207, 292
 Nicolis, Gregorie, 117, 143
 Nietzsche, Friedrich, 78, 87, 88, 287, 378
 Niesert, U., 215
 Niklas, Karl, 305

 Odum, Eugene, 238, 247, 248, 252, 253, 279
 Odum, Howard T., 191, 238, 251, 252
 O'Grady, Richard, 370, 371
 O'Neil, Luke A.J., 189
 Onsager, Lars, 30, 115-117, 123, 124, 127, 167, 252
 Oparin, Alexander Ivanovich, 206, 213, 216, 217
 Oppenheimer, Robert, 50
 Orgel, Leslie, 206, 207
 Oster, G.F., 143
 Ostwald, Friedrich Wilhelm, 101

 Pagels, Heinz, 385
 Paley, William, 380
 Parménides, 84
 Pasteur, Louis, 206
 Pattee, 143
 Peacocke, Arthur, 124, 130
 Pearson, R.A., 160
 Pinter, Harold, 30
 Pitágoras, 67
 Planck, Max, 29, 89, 101
 Platón, 67, 91, 363
 Poincaré, Jules-Henri, 78, 88-90
 Popper, Karl, 141, 207, 336, 347, 382
 Prigogine, Ilya, 30, 91, 111, 115, 117, 118, 123, 124, 141-143, 160, 206, 238, 378

 Rafael, 39, 44
 Randall, Merle, 103

Rashevsky, 143
 Ray, Tom, 205
 Rayleigh. *Véase* Strutt, John William
 (Lord Rayleigh)
 Redi, Francesco, 206
 Rifkin, Jeremy, 238, 346
 Rohde, K., 308, 309
 Rosen, Robert, 143, 181
 Rössler, Otto, 98
 Rothschild, (familia), 351
 Ruelle, 143
 Ruse, Michael, 380
 Russel, Michel, 231
 Rutherford (Lord), 101

Sadi Carnot, Nicolas-Léonard, 29,
 68-71, 73-75, 107, 108, 127, 165,
 189
 Salthe, 143
 Salvadori, Neri, 347
 Saunders, Howard, 304
 Schrödinger, Erwin, 19, 21, 30, 32,
 37-45, 47, 52, 53, 105, 144, 158,
 207, 211, 212, 215, 238, 391-
 393
 Schumpeter, Joseph, 345
 Schwartzman, David, 314
 Sellers, Pierre, 282
 Selye, Hans, 329, 331
 Shakespeare, William, 33, 172
 Shannon, Claude, 48
 Shelley, Mary, 207
 Sherman, Kenneth, 258
 Smale, 143
 Smil, Vaclav, 186, 205
 Smith, Adam, 355
 Smolin, Lee, 87, 91, 367
 Smoluchowski, Marian von, 97
 Snow, C.P., 33
 Sócrates, 67
 Soros, George, 336, 347
 Spallanzani, Lazzaro, 206
 Spencer, Herbert, 238

Spinoza, Baruch, 51, 371
 Stamets, Paul, 298
 Stehli, Frank, 300
 Steinberg, Victor, 161
 Stengers, Isabelle, 117, 118
 Strutt, John William (Lord Rayleigh),
 156, 157, 159, 163, 165, 169
 Swenson, Rod, 238
 Szent-Györgyi, Albert von Nagyrapolt,
 146
 Szilard, Leo, 97, 100

Tait, Peter Guthrie, 94, 95
 Taper, Mark, 305
 Taylor, G.I., 113, 166, 167, 169, 171,
 175, 179, 258, 368
 Tennyson (Lord), 180
 Teilhard de Chardin, Pierre, 379
 Thom, René, 143
 Thompson, D'Arcy W., 46
 Thomson, William (Lord Kelvin), 71,
 89, 127
 Thomson, Sir J.J., 101
 Thoreau, Henry David, 239, 263
 Thorpe, Edward O., 353
 Tipler, Frank J., 238
 Tolstói, Leon, 195
 Tomás de Aquino (santo), 363
 Toussaint, Oliver, 328, 330, 331
 Trewavas, Anthony, 200
 Turing, Alan, 143
 Turner, J. Scott, 151, 191
 Twain, Mark, 181, 238
 Tzu, Chuang, 11

Ulanowicz, Robert, 138-140, 143, 238,
 255, 311, 377, 378

Vernardsky, Vladimir, 187, 197, 246,
 342, 349, 324, 332
 Victoroff, Jeff, 324, 332

Wächtershäuser, Günter, 229, 230, 231, 347
 Wagensberg, Jorge, 121
 Watson, James, 19, 39
 Watts, Alan, 166, 269, 374
 Weaver, Warren, 48
 Weber, Bruce, 292
 Weinberg, Steven, 54
 West, Geoffrey, 143, 305
 Westbroek, Peter, 295
 Whittaker, Robert J., 306
 Wicken, Jeffrey, 30, 43, 143-146, 202, 203, 210, 213, 238, 293-295, 311
 Wickramasinghe, Chandra, 221
 Wiener, Norbert, 143, 391
 Wilde, Oscar, 334
 Wiley, E.O., 238
 Williams, Garnett, 60
 Williams, R.J.P., 209
 Williamson, Donald, 387
 Willis, Katherine, 306
 Wilson, E.O., 234, 243, 244, 299, 302, 303
 Woese, Carl, 229
 Wolfram, S., 143
 Woodwell, George, 263
 Wright, David, 303
 Wright, Robert, 380
 Wright, Sewall, 293
 Yates, Eugene, 123, 124, 130, 322-324, 372, 378
 Yockey, Hubert, 50
 Zenón de Elea, 144
 Zermelo, Ernst, 87, 101
 Zhabotinsky, Anatol, 135
 Zotin, Alexander, 261, 262, 311, 312