ritmo correcto. El solitón como equilibrio entre la difusión energética interna y externa es uno de los grandes trucos de magia de la naturaleza.

SOLITONES BIOLÓGICOS

Los solitones de difusión también son importantes en los sistemas biológicos. Hasta el desarrollo de las teorías acerca del solitón, el problema de comprender cómo se transportan paquetes de energía por moléculas muy largas se llamaba "la crisis de la bioenergía". En el mundo de las moléculas *lineales,* la energía tiende a difundirse de tal modo que la concentración correcta nunca llegaría al sitio exacto. El científico ruso A. S. Davidov preguntaba si las interacciones no lineales contribuirían a transportar energía a lo largo de la espiral helicoide de una molécula de proteínas.

Davidov sugería que debajo de cierto umbral la energía es transportada por las vibraciones normales del espinazo helicoide y tiende a disiparse en toda la molécula. Pero cuando se alcanza ese umbral, la no linealidad equilibra las fuerzas de difusión y permite que un paquete de energía viaje a través de la hélice a más de mil metros por segundo. De este modo, la energía que llega a una parte de la molécula se puede transportar a algún otro sitio, donde se usa en los procesos biológicos de la célula.

Los solitones también se emplean en los procesos biológicos para el desplazamiento de las señales a lo largo de los nervios. Si uno sale del mar y pisa arena muy caliente, la sensación de dolor debe recorrer una senda nerviosa de un metro y medio para llegar al cerebro. La información de que hay dolor en la planta del pie no sólo debe recorrer una larga distancia sino que necesita llegar intacta; un mensaje de dolor no sirve de nada si comienza en el pie y termina en el cerebro como información acerca de un cosquilleo.

Los primeros especialistas en conducción nerviosa sabían que las señales involucraban alguna forma de actividad eléctrica. Elaboraron pues un modelo basado en el intercambio telegráfico o telefónico, en el cual los mensajes circulan por cables. El único problema de esta teoría era que una pulsación eléctrica recorre un cable casi a la velocidad de la luz, pero los impulsos nerviosos son mucho más lentos, pues se desplazan a 10 metros por segundo.

Durante la Segunda Guerra Mundial se realizaron grandes avances en electrónica y en la capacidad para efectuar mediciones eléctricas rápidas y delicadas. Alan Hodgkin investigó el radar durante la guerra, pero en 1945 regresó a su laboratorio de Cambridge. Con la ayuda de su alumno Andrew Huxley, hermanastro del famoso novelista, Hodgkin comenzó a estudiar los cambios eléctricos que se producen en el gigantesco nervio axón del calamar. Sus investigaciones aclararon que la transmisión nerviosa no se parece a los mensajes de una línea telefónica, sino que involucra una pulsación localizada que viaja por el nervio a velocidad constante y sin cambiar de forma. Además, cada pulsación es generada sólo cuando se alcanza determinado umbral crítico de energía.

Gracias a esta investigación, Hodgkin, Huxley y John Eccles ganaron el premio Nobel. Demostraron que los impulsos nerviosos viajan tan deprisa como lo

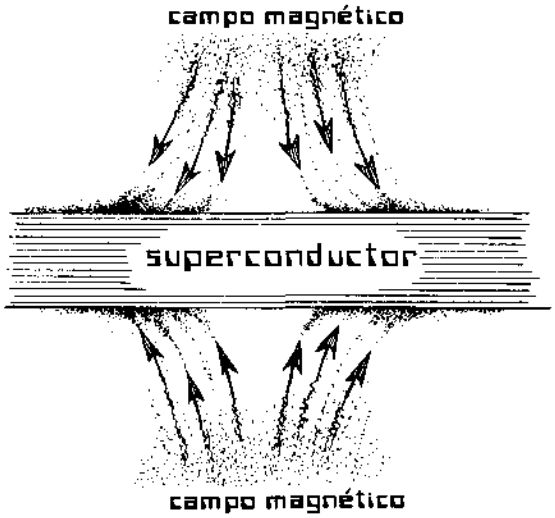
que ahora llamamos solitones, a una velocidad constante y sin disipación. La matemática de la teoría Hodgkin-Huxley reveló que los nervios, después de activarse en su umbral, tienen un período latente antes de generar otro solitón. La propagación y la interacción de los solitones neurales también involucra una "memoria". La neurona retiene una sensibilidad a los mensajes que ha transmitido antes. De este modo, una red nerviosa tiene una memoria holística de su patrón de mensajes, un dato que puede ser decisivo para desarrollar una teoría general de la memoria cerebral. Ahora se ha desarrollado un nuevo campo de estudios para investigar cómo los solitones chocan, pasan por encima de las irregularidades de la fibra nerviosa e interactúan en las intersecciones. Algunos teóricos han llamado al solitón nervioso la "partícula elemental del pensamiento".

TÚNELES DE SOLITONES

Aun un campo magnético puede comportarse como un solitón y aquí los solitones revelan otro rasgo notable: la capacidad para formar "túneles".

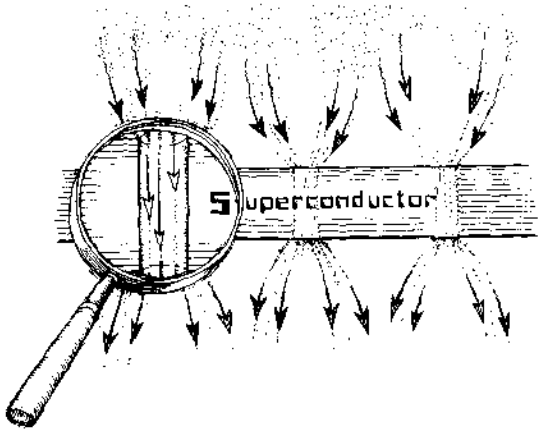
Comúnmente un campo magnético atraviesa fácilmente una pieza de metal. Por eso es posible colgar un clavo del polo de un imán y luego usarlo para recoger otro clavo. Pero en un metal superconductor, la "transparencia" magnética se desconecta de golpe. En la temperatura crítica, el punto en el cual el metal se convierte en superconductor (él mismo un solitón), el campo magnético de pronto es incapaz de entrar.

***Figura* 4.5**



Sin embargo, si este campo magnético se vuelve más fuerte y más grande, en un punto del campo se crean vórtices magnéticos semejantes a solitones que penetran por el superconductor como si cavaran un túnel. En efecto, un solitón pasa a través del otro.

***Figura* 4.6**



Los vórtices solitones también se encuentran en los superfluidos, fluidos que pueden circular sin crear turbulencia. En este caso no se forman vórtices de flujo magnético sino largos

y delgados cilindros o secuencias de superfluido rotativo que crean una curiosa textura en el estado superfluido. Algunos científicos creen que se formaron vórtices solitones o "secuencias" varios segundos después del *big bang, y* que actuaron como objetos cuánticos alrededor de los cuales la materia se aglomeró en galaxias *y* cúmulos estelares.

Otro tipo de penetración entre solitones, llamada "transparencia autoinducida", muestra lo que puede ocurrir cuando la luz *y* la materia se enlazan en interacciones no lineales.

Mientras los cristales como el diamante, el cuarzo *y* la sal de roca son transparentes a la luz, otros sólidos reflejan *y* absorben toda la luz que cae sobre ellos. En estos sistemas absorbentes, toda energía lumínica que logre penetrar en el sólido es inmediatamente absorbida por sus átomos. Esta energía absorbida luego escapa en forma de vibraciones atómicas, es decir, calor. Así que el único efecto de proyectar luz a través de una sustancia opaca es que se calienta la superficie.

Sin embargo, si la luz que cae en el sólido se vuelve muy intensa, como en el estallido de alta energía de un láser, el sólido se vuelve transparente y la pulsación de luz lo atraviesa sin ser absorbida.

¿Cómo ocurre este truco de galera? Con un brusco estallido láser, todos los átomos de la rejilla se excitan. Estos átomos excitados interactúan no linealmente con la luz, de modo que los dos se fusionan momentáneamente para formar un sistema que opera colectivamente a lo largo del frente de la onda. El solitón que atraviesa el sistema antes opaco no es en rigor luz, y tampoco es excitación atómica. Se trata de una compleja y no lineal combinación de ambos, una nueva forma de ser que los teóricos denominan "polaritón".

Estos túneles también cumplen una función en el dominio de la energía termonuclear. Nuestra forma actual de energía nuclear, la fisión, utiliza la energía que se libera cuando se desintegra el núcleo del uranio. En el proceso de fusión, en cambio, los núcleos se tienen que amalgamar en vez de fragmentarse.

En un reactor de fusión, se calientan núcleos de hidrógeno, o uno de sus isótopos, llevándolos a una temperatura tan alta que sus velocidades bastan para eslabonarlos cuando chocan. La colisión produce helio y libera un fuerte borbotón de energía. Para alcanzar la fusión nuclear se requiere una combinación de plasmas de altísima temperatura —un plasma es un "mar" de núcleos moviéndose libremente— y algún método para contener el plasma cuando alcance una temperatura de varios millones de grados.

Aunque los científicos dedican considerables esfuerzos e ingenio a la resolución del problema del confinamiento del plasma, también les interesa llevar el plasma de hidrógeno a la temperatura necesaria. Un enfoque consiste en dirigir ondas de radio hacia el interior del plasma. El inconveniente es que estas ondas pueden calentar las regiones exteriores del plasma pero no pueden penetrar hasta el centro, donde se necesitan las temperaturas altas. Aquí es donde participan los túneles de solitones.

En cálculos realizados por ordenador, los científicos han descubierto que los solitones se pueden portar de manera extraña cuando se topan con una barrera. Las ondas lineales normales como las ondas de radio se reflejan en una

barrera de plasma y sólo un pequeño porcentaje atraviesa los átomos de la barrera. Con una barrera que requiere gran cantidad de energía para pasar, la mayor parte de la radiación lineal rebota por reflejo y muy poca se transmite. Pero cuando hay presentes efectos no lineales, se pueden generar solitones que cavan un túnel en la barrera y salen del otro lado sin ninguna pérdida. Algunos científicos creen que podrán crear solitones de frecuencia radial que abrirán un túnel capaz de llegar hasta el interior del plasma para calentarlo.

HIRVIENDO EL UNIVERSO También existen solitones en los niveles más pequeños de la naturaleza. Los investigadores han advertido que los resultados de experimentos por computación donde los solitones chocan e interactúan se parecen sospechosamente a los resultados de los experimentos realizados con aceleradores de partículas elementales. Por ejemplo, la solución de una ecuación de solitones implica la participación de los llamados kinks ("caprichos") y antikinks. Cuando chocan dos solitones kink, se repelen entre sí, y lo mismo hacen dos antikinks. Sin embargo, un kink y un antikink se atraen. Los kinks y antikinks son, en este sentido, idénticos a las partículas elementales de carga opuesta.

Los solitones están de moda en la física de partículas elementales. Los teóricos que aplican la idea del solitón a la teoría cuántica también han tropezado con lo que denominan el "instantón de la burbuja de vacío". Tal vez sea *el* objeto más exótico y letal del universo.

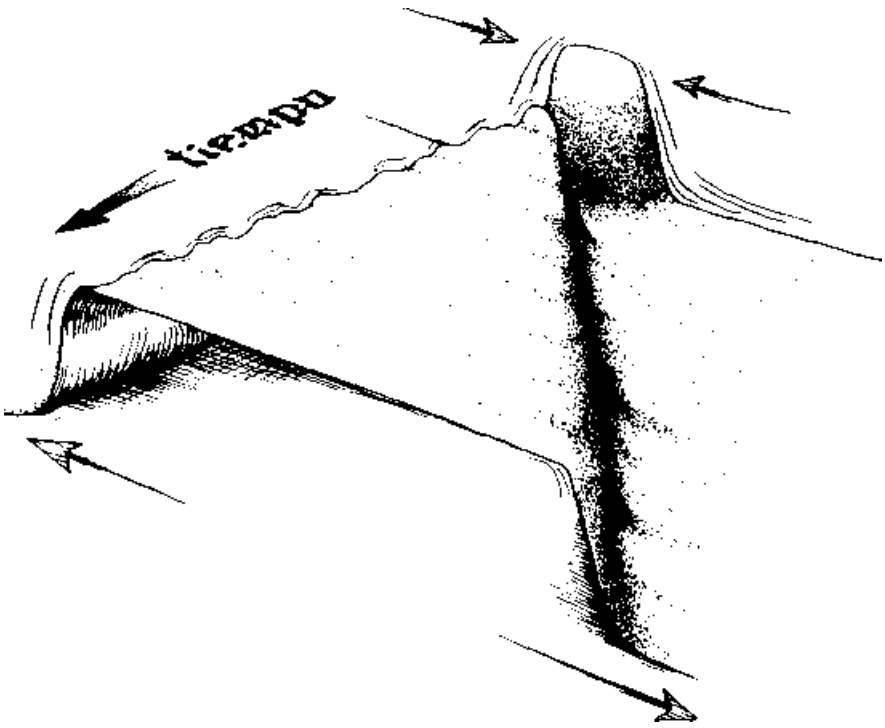


Figura 4.7. **Un kink y un antikink chocando a alta energía. La colisión es una atracción semejante a la atracción de dos partículas de carga opuesta.**

Este objeto cuántico y no lineal no sólo desafía la imaginación, sino que tiene pavorosas implicaciones. Como el instantón proviene de la fusión de solitones con un aspecto particularmente abstracto de la teoría de campo cuántico, su historia se debe contar en una serie de imágenes y ejemplos.

Imagine que usted es un cuanto de energía caminando por las montañas y al cabo de un largo día decide bajar al valle. En el fondo del valle no queda ningún sitio adonde ir, y todos los demás lugares están *arriba.* La energía potencial de usted está reducida al mínimo y no hay modo de reducirla más. El valle donde usted se encuentra es el estado mínimo, el estado de más bajo nivel de energía.

Pero ahora supongamos que usted se entera de que en el otro lado de la montaña hay un valle más profundo. De pronto usted advierte que su energía potencial no está en el nivel mínimo, pues ese otro valle está más bajo.

Desde luego, el único modo de llegar a ese valle consiste en escalar: en otras palabras, el único modo de ir más *abajo* consiste en ir primero *arriba.* Pero usted es un cuanto cansado al final del día y no tiene energías para ascender más.

Ahora imagine que usted es el universo. La teoría del campo cuántico pinta las partículas elementales como excitaciones que surgen a partir de un estado de energía mínima de ese campo, también llamado el estado al vacío del universo. Cuando se añade un poco de energía a este estado al vacío, se crean partículas elementales; cuando esa energía se va, sólo queda el estado al vacío. Desde el estado al vacío no se puede ir a ninguna parte adonde perder más energía. Es el fondo del valle.

¿Pero qué ocurriría si en el otro lado de las montañas de energía que rodean el universo hubiera *otro* estado al vacío, un universo potencial con energía más baja? Desde luego, desde donde está usted no hay manera de llegar a ese estado al vacío más bajo. Las montañas de energía son demasiado altas. En un sentido, pues, su universo sería totalmente estable, pues no puede cruzar las montañas para descender al estado al vacío más profundo que hay de otro lado. Pero, en un sentido absoluto, su universo sería inestable porque su energía sigue siendo alta en relación con ese otro estado mínimo. Aún tiene donde caer.

Ahora bien, ya hemos visto varias situaciones donde los solitones son capaces de ir de un sistema al otro cavando túneles a través de una barrera energética. La teoría cuántica también tiene en cuenta estos túneles. Los solitones pueden pasar del exterior al interior de un plasma. ¿Es posible que los solitones formados a partir del estado al vacío caven un túnel que vaya de un vacío al otro? El modelo teorice propuesto requiere otra imagen.

Si usted calienta agua, cuando llega a los 100° C aparecen pequeñas burbujas en el fondo de la olla y se expanden hacia arriba. El agua ha empezado a hervir. Las primeras burbujas que aparecen se forman alrededor de diminutas partículas de polvo que hay en el agua o en fisuras o imperfecciones de la superficie de la olla. Pero si el agua es absolutamente pura y está libre de polvo, y el recipiente es totalmente liso, tenemos "agua supercalentada", agua con demasiada energía.

Aunque supere los 100° C por varios grados, el agua supercalentada

luce normal; ninguna burbuja sube a la superficie. Pero es inestable. La adición de motas de polvo de pronto suministrará núcleos para la formación de burbujas, y de ello resultará un hervor violento.

Para completar la analogía, ¿es posible que el estado al vacío de nuestro universo sea como agua supercalentada? Es decir, aunque parece bastante estable, ¿es posible que una sola nucleación bastara para desencadenar un violento "hervor" de partículas elementales? La teoría de lo que los físicos denominan "instantones de burbuja de vacío" es que una burbuja solitón podría cavar un túnel desde un estado aparentemente estable o un universo para llegar a otro. Esta burbuja hipotética es una entidad estrafalaria, porque aunque su superficie pertenece a nuestro universo, su interior es un alienígena: contiene el vacío inferior de otro universo.

La teoría sugiere que si tal burbuja surgiera en nuestro universo aparecería como una perturbación violenta que se expandiría hacia afuera a la velocidad de la luz, causando una espumosa explosión de energía.

P. H. Frampton, de la Universidad de California, piensa que se podría diseñar una máquina destructiva para producir un solo instantón a partir de la intersección de pulsaciones láser de altísima energía. El instantón, creado con el tamaño de una partícula elemental, se expandiría 300.000 kilómetros en un segundo y contendría en sí un "vapor" de partículas elementales. El resultado sería como arrojar una mota de polvo en agua super-calentada. Nuestro universo empezaría a hervir.

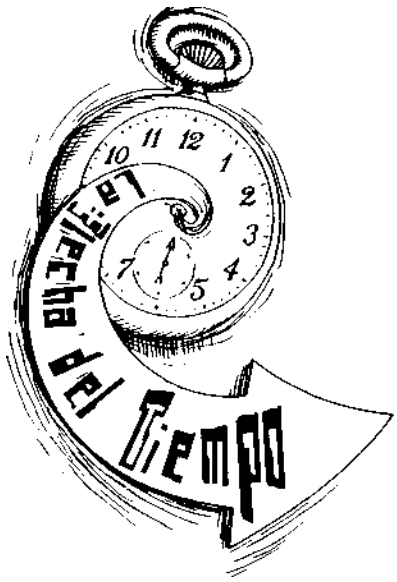
Esperemos que el instantón solitón sea meramente hipotético, pero otros solitones por cierto son reales. A estas alturas el lector se preguntará qué ocurre con los solitones del mundo real. ¿Adonde van?

La respuesta es que eventualmente mueren. Aunque surgen casi mágicamente y como por arte de magia resisten las fuerzas de la dispersión, con el tiempo su energía se disipa. El agua, por ejemplo, tiene una fricción o viscosidad interna que actúa lentamente para erosionar su forma. Con el tiempo los solitones regresan al caos del cual surgieron. Podríamos decir que el tiempo es el solvente máximo.

Y en los misterios del tiempo buscaremos ahora las claves del enigma de fenómenos tales como los solitones.

Figura 4.8. **Fotografía satelital de olas solitones paralelas separadas por 150 km de distancia. ¿Adonde van estos solitones?**

Capítulo 3



El Emperador Amarillo dijo: "No-Hagas-Nada-Ni-Digas-Nada es el único que tiene razón, porque no sabe. Salvaje-y-Tonto parece tener razón, porque olvida. Pero tú y yo no tenemos idea, porque sabemos." Salvaje-y-Tonto oyó hablar de este episodio y llegó a la conclusión de que el Emperador Amarillo sabia de qué hablaba.

CHUANG TZU

CONOCEDOR DEL CAOS

La conducta de los solitones parece asombrosa, pero a juicio de Ilya Prigogine la repentina aparición del orden a partir del caos es la regla antes que la excepción. La causa de este asombro, insiste, nos rodea por todas partes.

Por todo el campus de la Universidad de Texas en Austin nuevos edificios cobran forma. Las excavadoras escarban la piedra caliza color moca que se asentó hace 100 millones de años, cuando esta parte de Texas era el terraplén del continente. En los bloques que forman las paredes de los modernos edificios que rodean el campus se encuentran las huellas de antiguas conchas marinas. Cerca de una de las obras en construcción, frente al Texas Memorial Museum, una losa de piedra caliza ha registrado las huellas y los coletazos de un dinosaurio saurópodo.

Rodeado por estas imágenes del cambio y el tiempo se eleva un edificio que alberga el departamento de física. En una oficina del séptimo piso, el premio Nobel de química 1977 medita acerca de su teoría, según la cual el tiempo es el sostén de la creación.

Otros han descubierto recientemente cierto orden en el modo en que los sistemas se desmoronan en el caos, pero hace treinta años que Prigogine, como un antiguo argonauta, busca el secreto por el cual el caos genera el orden. Junto

con Poincaré, es quizá el prototípico conocedor del caos.

Cuando le preguntamos qué lo indujo a seguir este camino revolucionario, Prigogine responde: "Creo en el papel del azar y el desorden aun en la vida. Por tanto, no hay manera lógica de seguir un camino u otro". Prigogine nació en 1917, en un momento turbulento de la historia rusa, y tenía cuatro años cuando su familia se unió a la marea de refugiados que emigró de Rusia después de la revolución. La familia vagabundeó por Europa hasta instalarse en Bélgica en 1929.

Declara que sus primeras pasiones como estudiante fueron la historia, la arqueología y el arte, "las ciencias humanas más que las ciencias duras". Pero por azar, "a causa de la situación de la preguerra en Bélgica, decidí estudiar ciencias en la universidad". Prigogine recuerda que su interés en las humanidades significaba que "para mí fue muy natural interesarme en la cuestión del tiempo" y que le sorprendió que las ciencias tuvieran tan poco que decir sobre el asunto. Pero, una vez más, por azar o destino, caos u orden, sus padres lo habían llevado a una ciudad que era un centro de la investigación en termodinámica, el único campo científico que ha intentado explorar el verdadero significado del tiempo.

EL TIEMPO DEL OPTIMISTA Y EL TIEMPO DEL PESIMISTA

La termodinámica, el estudio de la transferencia térmica y los intercambios de energía y trabajo, es una ciencia extremadamente útil para los ingenieros pero también es extremadamente compleja. La gente suele estar familiarizada con la termodinámica porque ha oído hablar de la famosa segunda ley, que predice el agotamiento del universo y su eventual extinción por muerte térmica o entropía.

La segunda ley, formulada inicialmente por el científico alemán Rudolf Clausius, introdujo el tiempo y la historia en un universo que Newton y la física clásica habían pintado como eterno. Como las ecuaciones de la mecánica newtoniana son "reversibles", los físicos llegaron a la convicción de que en el nivel básico de la materia el tiempo no tiene dirección. La ilustración popular moderna de esta idea se relaciona con una película. Si proyectáramos un filme de colisiones atómicas hacia adelante o hacia atrás, no distinguiríamos la diferencia. En el mundo atómico, el tiempo no tiene una dirección predilecta. La reversibilidad del tiempo también aparece en las ecuaciones de la mecánica cuántica, al menos en su interpretación convencional. De hecho, el principio de la reversibilidad ha sobrevivido a varias revoluciones de la física y es un concepto tan arraigado que Einstein le escribió a la viuda de un amigo íntimo, el físico Michele Besso:

> Michele ha dejado este extraño mundo antes que yo. Esto no tiene importancia. Para nosotros, los físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro es una ilusión, aunque persistente.

Sin embargo, la ciencia de la termodinámica descubrió un mundo cautivo del tiempo. Termodinámicamente, las cosas van en una sola dirección. El tiempo es irreversible y tiene una flecha. Besso, el amigo de Einstein, nació, envejeció y murió. Su vida no podría detenerse ni

retroceder en el tiempo. Un automóvil se desintegra convirtiéndose en una pila de herrumbre; una pila de herrumbre no se reconstituye convirtiéndose de nuevo en automóvil. Con el descubrimiento de la termodinámica, los físicos se concentraron en lo que podríamos llamar un tiempo pesimista, el tiempo de la decadencia y la disolución.

Este aspecto del tiempo resultaba fascinante para el joven Prigogine, pero también lo atraía el tiempo en su forma más optimista, la evolución. Recuerda: "En esos años recibí una gran influencia del bello libro de Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* Al final del libro Schrödinger preguntaba de dónde venía la organización de la vida. ¿Cómo era posible que la vida se reprodujera, que tuviera estabilidad? Schrödinger respondía: 'Bien, yo no lo sabía. Tal vez la vida funcione como un péndulo sin fricción'. Pero hace cuarenta años yo tuve otra idea. Mi idea era precisamente la contraria. Pensé que tal vez la estructura surgía porque hay fricción e intercambios de energía con el mundo exterior".

Espoleado por esta intuición, Prigogine estudió en la Universidad de Bruselas bajo Théophile de Donder, uno de los pocos científicos que investigaba lo que se denomina termodinámica del no equilibrio. El equilibrio es el estado de entropía máxima, donde las moléculas están paralizadas o se mueven al azar. Según Rudolf Clausius, el universo se dirigía hacia esa sopa sin cosas. El aprendizaje de las leyes de los estados de no equilibrio fue un descubrimiento decisivo.

Si uno toma dos cajas conectadas por una abertura y pone nitrógeno en un lado e hidrógeno en el otro, eventualmente los dos se mezclan tan inextricablemente que esencialmente no hay diferencia en la concentración de cada gas dentro de las dos cajas. Los científicos dicen que el sistema ha alcanzado el equilibrio y la entropía máxima. Sin embargo, si uno calienta ambas cajas a temperaturas ligeramente diferentes, los gases se mezclan, pero no de manera uniforme. Hay más hidrógeno en un lado y más nitrógeno en el otro. El flujo térmico ha producido cierto orden, es decir, ha producido un sistema cercano al equilibrio.

El estado cercano al equilibrio se puede comparar con un pozo de energía donde el sistema pierde calor tan rápidamente como lo gana. El pozo actúa como un punto atractor. Prigogine pronto advirtió que ni siquiera los sistemas cercanos al equilibrio tienen verdadero sentido del tiempo, pues continúan retornando al atractor. Compara dichos sistemas con sonámbulos o personas hipnotizadas que no tienen pasado. El secreto del tiempo no estaba allí.

Por tanto, tras estudiar los sistemas cercanos al equilibrio, Prigogine comenzó a investigar qué ocurre en situaciones alejadas del equilibrio, situaciones que sufren un gran bombardeo de energía desde el exterior. Aquí fue donde Prigogine descubrió el "orden surgiendo del caos" y el corazón del tiempo.

Prigogine usa la palabra *caos* de dos modos bien diferenciados, aunque a veces intercambiables. Está el caos pasivo del equilibrio y la entropía máxima, donde los elementos están tan íntimamente mezclados que no existe ninguna organización. Este es el "caos térmico del equilibrio", propio del eventual universo tibio que predice Clausius. Pero en la segunda

acepción el caos es activo, caliente y energético, un "caos turbulento alejado del equilibrio". Este es el caos que llamó la atención de Feigenbaum, Lorenz, May, Ford y otros que hemos mencionado en el otro lado del espejo. Prigogine fue uno de los primeros científicos contemporáneos que advirtió que pueden ocurrir cosas extrañas en este caos alejado del equilibrio. Descubrió que en los sistemas alejados del equilibrio no sólo se desintegran los sistemas, sino que emergen sistemas nuevos.

Imaginemos un oleoducto que derrama petróleo en un gran receptáculo en una planta industrial. El petróleo fluye regularmente, formando un hoyuelo al caer en la superficie del petróleo del receptáculo. Supongamos que alguien abre el grifo para que más petróleo circule por el oleoducto. El primer efecto del nuevo chorro de petróleo consiste en una turbulencia mayor, en fluctuaciones. Estas fluctuaciones aumentan aleatoriamente, enfilando aparentemente hacia el caos total hasta que llegan a un punto de bifurcación. Allí, en una intersección crítica, una de las muchas fluctuaciones se amplifica y se propaga, influyendo sobre el sistema y dominándolo. Se forma un patrón de remolinos. El orden ha surgido del caos. Estos remolinos permanecen estables mientras el flujo del oleoducto se mantiene. Aunque el flujo aumente o disminuya un poco, la estabilidad del patrón de remolinos se conserva. Sin embargo, si hay un cambio excesivo en una u otra dirección, se crea una nueva situación caótica y surgen nuevas configuraciones del orden.

Uno de los ejemplos favoritos de Prigogine para ilustrar este orden nacido del caos es la inestabilidad de Bénard, que vimos en el Capítulo 2 (sección "Dimensiones turbulentas"). En ese lado, examinamos la ruta por la cual las celdas de convección se disuelven en el caos. De este lado, en cambio, examinaremos cómo las celdas de Bénard convierten el caos en orden.

Si calentamos una olla con líquido de modo que la superficie inferior se caliente más que la superficie superior, el calor viaja al principio de arriba abajo por conducción. El flujo del líquido es regular. Esta es una situación cercana al equilibrio. Sin embargo, al continuar el calentamiento, la diferencia de temperatura entre las dos capas crece, se alcanza un estado alejado del equilibrio y la gravedad empieza a influir con mayor fuerza sobre la capa superior, que está más fría y por tanto es más densa. Aparecen vórtices y remolinos en el líquido, que se vuelven cada vez más turbulentos hasta que el sistema bordea el desorden total. El punto crítico de bifurcación se alcanza cuando el calor no se puede dispersar con suficiente rapidez sin ayuda de vastas corrientes de convección. En este punto el sistema abandona el estado caótico, y los vórtices antes desordenados se transforman en una rejilla de corrientes hexagonales, las celdas de Bénard.

Si elevamos más la temperatura, las celdas de Bénard se disuelven en caos.

En su libro *Orden a partir del caos,* escrito en colaboración con Isabelle Stengers, Prigogine dice que "en química la relación entre el orden y el caos se manifiesta como altamente compleja: regímenes sucesivos de situaciones ordenadas (oscilatorias)

siguen a regímenes de conducta caótica". Señala que las celdas de Bénard constituyen un "fenómeno espectacular" producido por millones y millones de moléculas que de pronto se mueven con coherencia.

Una obvia propiedad del caos alejado del equilibrio es que contiene la posibilidad de autoorganización. Se ha hallado otro asombroso ejemplo de autoorganización en un grupo de reacciones químicas. Si la concentración de uno de los reactivos se incrementa hasta un punto crítico, la reacción sufre una transformación en la cual las concentraciones químicas comienzan a fluctuar regularmente como un reloj químico. Prigogine y Stengers comentan en su libro:

> Detengámonos un instante para enfatizar cuan inesperado resulta este fenómeno. Supongamos que tenemos dos clases de moléculas, "rojas" y "azules". Dado el movimiento caótico de las moléculas, en cierto momento esperaríamos tener más moléculas rojas, por ejemplo, en la parte izquierda de un recipiente. Un poco más tarde aparecerían más moléculas azules, y así sucesivamente. El recipiente nos parecería "violeta", con ocasionales e irregulares pantallazos de rojo o azul. Sin embargo, esto *no* es lo que ocurre con un reloj químico; aquí el sistema es todo azul, luego cambia abruptamente de color para volverse rojo, después pasa de nuevo al azul. Como estos cambios acontecen en intervalos *regulares,* tenemos un proceso coherente.
>
> Semejante grado de orden surgiendo de la actividad de miles de millones de moléculas parece increíble y, en verdad, si no se hubieran observado relojes químicos, nadie creería que semejante proceso fuera posible. Para cambiar de color todas al mismo tiempo, las moléculas deben

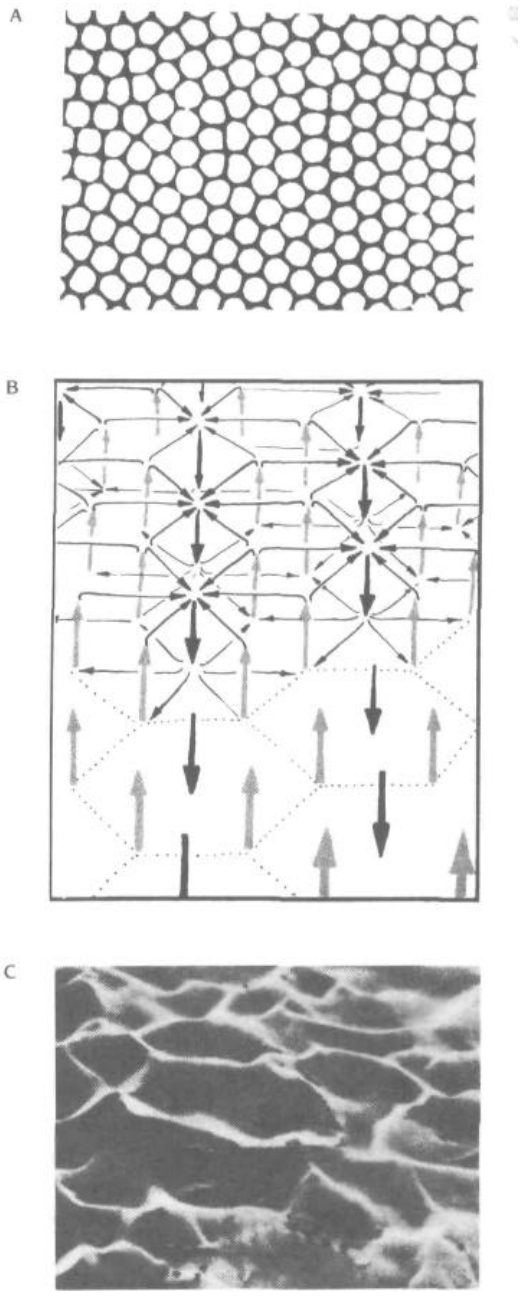


Figura 3.1. **(A) El patrón hexagonal de las células de Bénard en el fondo de una olla de agua caliente. (B) Los científicos creen que el caparazón esférico de la atmósfera, posiblemente toda la atmósfera, es un mar de hirvientes células de Bénard. (C) Una fotografía aérea del desierto del Sahara muestra huellas dejadas por este mar atmosférico de Bénard. Estas huellas de los vórtices de convección de la atmósfera también aparecen en los campos de nieve y los témpanos.**

tener un modo de "comunicarse". El sistema tiene que actuar como una totalidad.

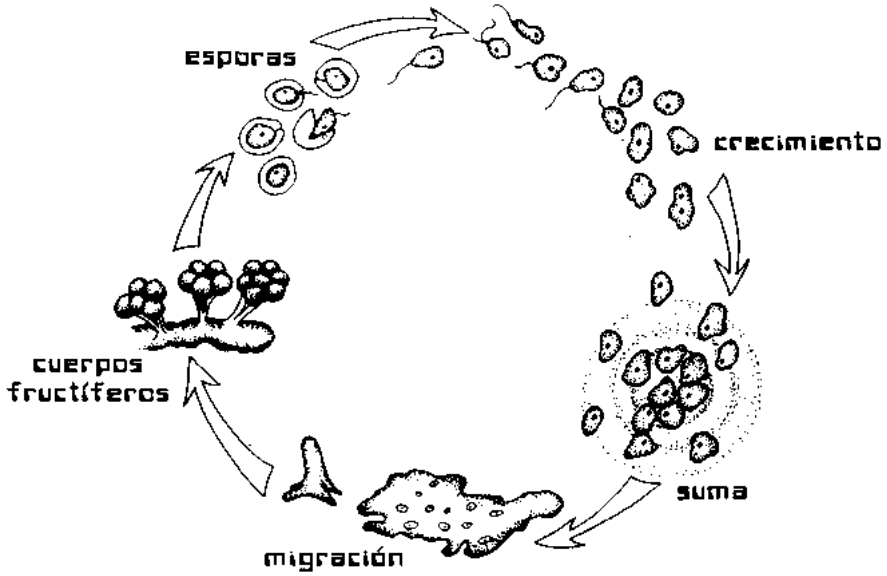
Según los autores, es como si cada molécula estuviera "informada" acerca del estado general del sistema. Prigogine no incurre en antropomorfismo al hablar de esta manera. Para él la idea de comunicación e información está íntimamente ligada con el modo en que la conducta aleatoria conduce a un complejo acoplamiento de la realimentación y el orden espontáneo. Tomemos como ejemplo el modo en que las termitas construyen nidos.

Ninguna burocracia central dirige el trabajo de las termitas. Al principio las termitas van de aquí para allá al azar recogiendo terrones y transportándolos de un lugar al otro. Mientras lo hacen, impregnan su carga con una gota de un agente químico que atrae a otras termitas. Aleatoriamente se forman concentraciones más elevadas en una zona, la cual luego se convierte en foco de atracción para otras termitas y sus terrones. Surgen columnas y la actividad de las termitas se correlaciona hasta que el nido está construido.

Todos hemos tenido la experiencia de formar parte de estas correlaciones. Mientras conducimos por la autopista en horas relativamente tranquilas, los demás vehículos apenas nos afectan. Pero al llegar la hora pico, el tráfico se pone más pesado y comenzamos a reaccionar e interactuar con los demás conductores. En cierto punto crítico el patrón total del tráfico empieza a "conducirnos" a nosotros. El tráfico se ha convertido en un sistema autoorganizativo.

Otra autoorganización que emerge de la fluctuación caótica se relaciona con ciertas amebas llamadas moho del légamo. Los integrantes del moho del légamo *(Figura* 3.2) pasan parte de sus vidas como células simples, pero cuando quedan privados de alimento envían una pulsación química que llama a otras amebas. Miles de estas amebas se suman aleatoriamente hasta que sus fluctuaciones alcanzan

Figura 3.2



un punto crítico, momento en el cual se autoorganizan para formar una entidad cohesiva capaz de desplazarse por el suelo del bosque. Al fin, en un nuevo lugar, el moho desarrolla un tallo y un cuerpo fructífero del que brotan esporas de las cuales nacen nuevas amebas. El moho del légamo encarna tanto una conducta individual como colectiva, y cada aspecto está implícito en el otro.

Como indican estos ejemplos, Prigogine y sus colegas ven estructuras autoorganizativas por todas partes: en biología, en los vórtices, en el crecimiento de las ciudades, en los movimientos políticos, en la evolución de las estrellas. Prigogine denomina "estructuras disipativas" a los ejemplos de desequilibrio y autoorganización.

El nombre deriva del hecho de que para evolucionar y mantener su forma, las ciudades, los vórtices y el moho del légamo consumen energía y materia. Son sistemas abiertos que absorben energía externa y producen entropía (desechos, energía aleatoria) que ellos disipan en el ámbito circundante. Desde luego, la entropía de un sistema puede ser el alimento de otro; pensemos en el escarabajo estercolero, por ejemplo, o en los mitocondrios de nuestras células, que transforman las moléculas de alimentos fermentados en ATP, una molécula que almacena energía. La segunda ley (según la cual la entropía general siempre crece) no es violada por la aparición de estos sistemas, así como la gravedad no es violada por una luna orbital. Así como la luna aprovecha la gravedad para permanecer en órbita, las estructuras disipativas aprovechan la entropía.

El nombre estructura disipativa expresa una paradoja central de la visión de Prigogine. La disipación sugiere caos y disolución; la estructura es su opuesto. Las estructuras disipativas son sistemas capaces de mantener su identidad sólo si permanecen continuamente abiertos a los flujos del medio ambiente. Pensemos en los solitones que descubrimos en el capítulo anterior. Los solitones, como la onda de traslación y la llama de la vela, son también estructuras disipativas que surgen de un flujo alejado del equilibrio y cabalgan sobre él.

PROPIEDADES RADICALMENTE NUEVAS

Prigogine tardó mucho tiempo en hacer descubrimientos decisivos para comprender las estructuras disipativas, alejadas del equilibrio. "En cierto modo yo era cautivo de la teoría *lineal* del no equilibrio", declara, pues los sistemas cercanos al equilibrio que él estudió con Théophile de Donder respondían a modelos matemáticos diseñados por enfoques lineales. Las estructuras disipativas son criaturas de un mundo no lineal y en la época en que él las estudiaba no había mucho interés científico en la no linealidad.

"Hoy esto parece ser muy simple, casi trivial. Ahora es ley que en la gama no lineal lo que está lejos del equilibrio permite que surjan estructuras, produce orden a partir del caos. En un estado alejado del equilibrio, la materia tiene propiedades radicalmente nuevas."

¿Qué son estas propiedades radicalmente nuevas que permiten la autoorganización?

¿Cómo se construyen las estructuras disipativas a partir de un trasfondo caótico, organizando el

espacio, dando al tiempo una dirección inexorable?

En una reacción común, las moléculas de dos sustancias químicas se desplazan al azar. En algunas colisiones las moléculas coinciden en tener la energía y la orientación correctas y así se unen para formar una molécula nueva, el "producto" de la reacción. Las colisiones continúan hasta que todas las moléculas iniciales se combinan formando parte del producto. El sistema termina con mezclas homogéneas, no estructuradas, de agentes químicos.

Pero en algunas reacciones no se puede hacer un tipo de molécula a menos que ella se encuentre en presencia de otra molécula del mismo tipo. Dicho agente químico se transforma en su propio catalizador. Actúa por iteración. Los químicos hablan de "autocatálisis", "catálisis cruzada" y "autoinhibición" para denominar estas reacciones, pues ellas involucran procesos donde el producto de algunas etapas se realimenta para contribuir a su propia producción o inhibición. Dichas iteraciones químicas conducen a sistemas químicos que exhiben una variedad de procesos que van desde el equilibrio y el ciclo límite hasta la duplicación de períodos, el caos, la intermitencia y la autoorganización. Los sistemas estructuran el espacio agrupando las moléculas en patrones ordenados de cierto tamaño, y marcan el tiempo mediante una evolución y cambio constantes. Nunca son iguales aunque conserven la misma organización básica.

Una de las más coloridas de estas reacciones es una criatura puramente química llamada Belousov-Zhabotinsky *(Figuras* 3.3, 3.4).

Recientemente los científicos han podido reproducir el crecimiento de la estructura de Belousov-Zhabotinsky en el ordenador, usando ecuaciones iterativas no lineales. En la vida real la reacción se produce al mezclar

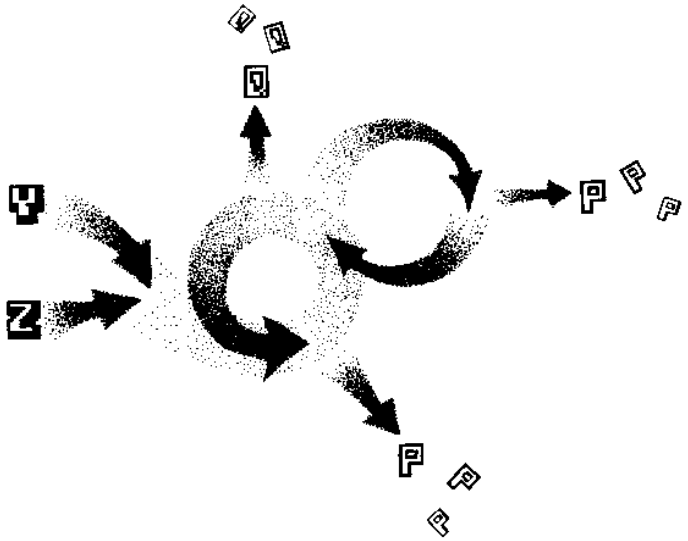


Figura 33. **La reacción Belousov-Zhabotinsky. X e Y son los agentes químicos iniciales, P y Q son productos terminales de la reacción. En el medio está la iteración de realimentación autocatalítica que sostiene la reacción.**

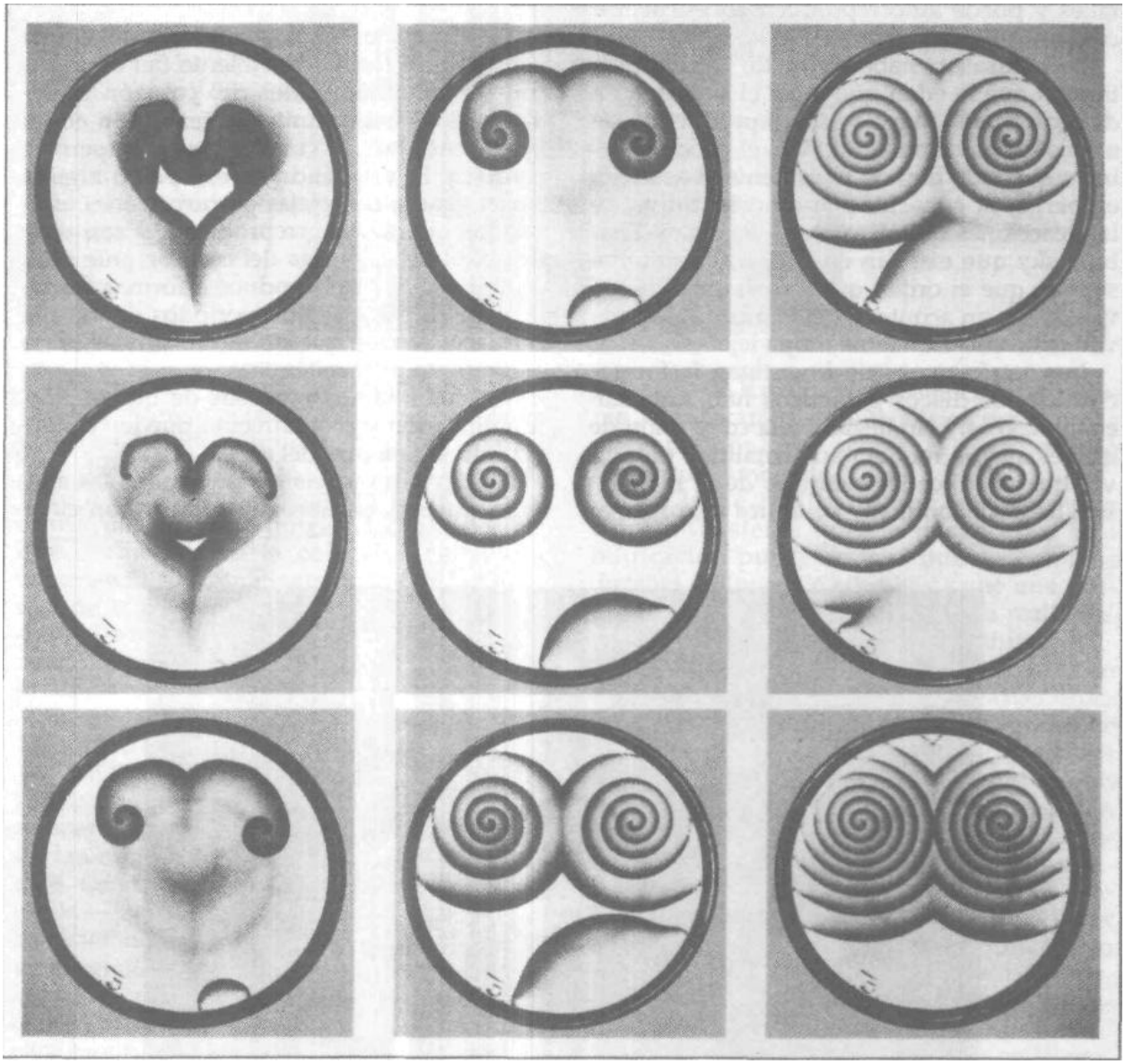


Figura 3.4. **Vista de una bandeja donde se desarrolla la reacción Belousov-Zhabotinsky. La iteración no lineal de esta reacción significa que los movimientos inicialmente aleatorios o caóticos de las moléculas de la solución generan espontáneamente estructuras en el espacio y el tiempo. La más pequeña fluctuación de una parte de la solución se puede magnificar. Hablando metafóricamente, si hay una concentración casual de moléculas "rojas" en una región, estas moléculas "rojas" catalizan o estimulan la producción de más moléculas "rojas". Así el agente químico rojo crece en una región, mientras que los agentes químicos azules prevalecen en otra. De esta manera se produce la estructuración en gran escala de las diversas sustancias químicas. El orden emerge del caos gracias a la energía constantemente suministrada por la reacción química.**

ácido malónico, brómate e iones de cerio en una bandeja chata de ácido sulfúrico. Se necesitan las concentraciones correctas y la temperatura correcta para que surjan las espirales, y la reacción atraviesa inicialmente un período de caos. La forma emergente tiene complejos detalles y puede autorreproducir su estructura como si estuviera viva.

La naturaleza habría tardado mucho más tiempo que la edad que tiene el universo en dar con una secuencia autorreproductora de aminoácidos como el ADN si el proceso hubiera quedado librado puramente al azar. Sin embargo, la capacidad autoorganizativa de las reacciones químicas como Belousov-Zhabotinsky que existían en la Tierra primitiva sugiere que el orden que llamamos vida, en vez de ser un acontecimiento azaroso, es una variación sobre un tema muy viejo.

Los astrónomos que investigan la formación de los discos galácticos han sugerido cuan viejo es. Han llegado a la conclusión de que el mismo modelo autocatalítico (iterativo) que produce las espirales de la reacción Belousov-Zhabotinsky se aplica a la formación de espirales en esas antiguas estructuras que tienen un tamaño de millones de años-luz.

Pero el nacimiento espiralado del orden tiene su otra faz: el crecimiento del caos. Las contracciones normales del corazón se expanden desde un punto de activación en un frente ondulatorio circular por la superficie cardiaca. Si esta onda se rompe en alguna parte, genera complejas perturbaciones espiraladas que se autorreproducen y son muy flexibles. La respuesta del corazón ante estas espirales eléctricas conduce a formas fractales y la duplicación de períodos de la falla cardiaca. Se cree que un efecto similar causa algunos ataques epilépticos.

Así los mismos procesos de bifurcación, amplificación y acoplamiento pueden conducir a un lado u otro del espejo.

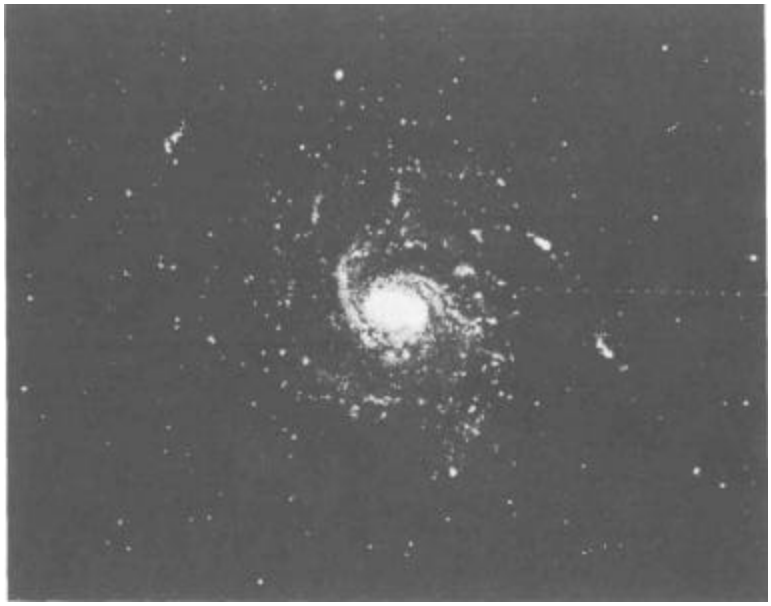


Figura 3.5. **¿Una versión astronómica de la reacción Belousov-Zhabotinsky?**

Figura 3.6. **Una tumba de la Edad de Piedra adornada con espirales (Irlanda).**

Entre cuatro y seis mil años atrás los antiguos pueblos de Europa construyeron círculos de piedra y los decoraron con rizos espiralados interconectados. Motivos similares aparecen en todo el mundo. El psicólogo Carl Jung declaró que dichas imágenes son arquetipos o estructuras universales en el inconsciente colectivo de la humanidad. ¿Es posible que dicha sabiduría colectiva estuviera expresando sus intuiciones acerca de la totalidad de la naturaleza, el orden y la simplicidad, el azar y la previsibilidad que se encuentran en la interconexión y el despliegue de las cosas?

LA VENTANA DE LOS SENDEROS QUE SE BIFURCAN

Como una ventana que nos permite atisbar momentáneamente el todo, la amplificación de las bifurcaciones conduce al orden, o al caos. En la perspectiva de Prigogine, la *bifurcación* —la encrucijada donde se producen ramificaciones— es un concepto esencial. En un sistema, la bifurcación es un instante vital cuando algo tan pequeño como un fotón de energía, una leve fluctuación en la temperatura externa, un cambio de densidad o el aleteo de una mariposa en Hong Kong se magnifica por iteración hasta alcanzar tal tamaño que se crea una ramificación y el sistema adopta un nuevo rumbo. En el curso del tiempo, las cascadas de puntos de bifurcación hacen que un sistema se fragmente (duplicación de períodos) cayendo en el caos, o que se estabilice en una nueva conducta mediante una serie de rizos de realimentación (tales como la autocatálisis, la catálisis cruzada y la autoinhibición) para acoplar el nuevo cambio a su medio ambiente.

Una vez estabilizado por la realimentación, un sistema que ha pasado por una bifurcación puede resistir nuevos cambios durante millones de años hasta que una nueva perturbación crítica amplifica la realimentación y crea un nuevo punto de bifurcación.

En sus puntos de bifurcación, el sistema en flujo recibe una "opción" entre varias órdenes. La realimentación interna de algunas de estas opciones es tan compleja que los grados de libertad son virtualmente infinitos. En otras palabras, el orden de la opción es tan elevado que es un caos. Otros puntos de bifurcación ofrecen puntos donde la realimentación de acoplamiento produce menos grados de libertad. Estas opciones pueden hacer que el sistema parezca simple y regular, pero esto es engañoso, pues

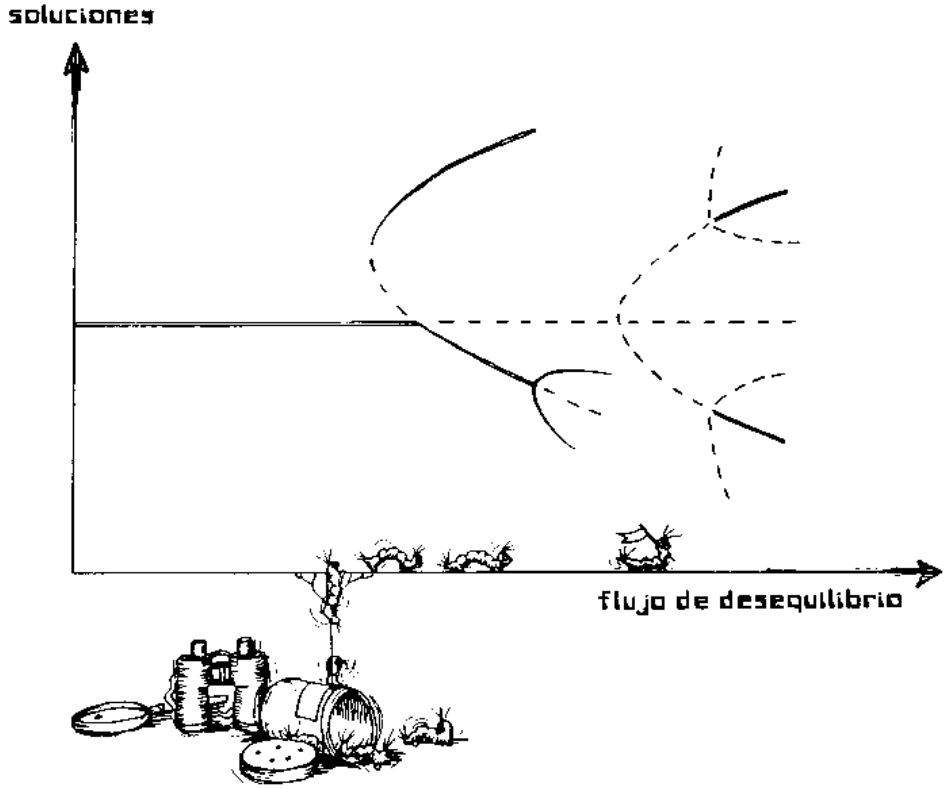


Figura 3.7. **Las líneas punteadas de este diagrama indican estados inestables (caos). Las líneas llenas son soluciones estables que el sistema puede mantener en el flujo. El diagrama podría representar muchos tipos de sistemas químicos o biológicos. Como muestran las líneas punteadas, cuando se aumenta el flujo el sistema atraviesa inestabilidades donde enfrenta opciones. La mayoría de ellas llevan al caos, algunas al orden. Las que llevan al orden están estabilizadas por iteraciones de acoplamiento, creando una red interconectada de realimentación.**

en órdenes de apariencia simple, como el solitón, la realimentación es abrumadoramente compleja.

El resultado de las bifurcaciones en la evolución de las células vivientes ha consistido en la creación de reacciones químicas orgánicas que están intrincada y establemente entretejidas con el medio ambiente de la célula. Prigogine se refiere a esta trama de rizos de realimentación cuando habla de "comunicación". A través de dicha comunicación, el sistema se mantiene intacto.

Los puntos de bifurcación son los hitos de la evolución del sistema: cristalizan la historia del sistema. El registro histórico de nuestras propias bifurcaciones está tallado en la forma de nuestros pulmones con sus variaciones de escala Fibonacci/fractal (véase la sección "Fractales por doquier" del Capítulo 4). Un documento de nuestras bifurcaciones pasadas aparece en nuestros embriones cuando atravesamos etapas en que parecemos peces, luego anfibios y reptiles.

En todas las formas y procesos que nos vuelven singulares —en las reacciones químicas de nuestras células y en la forma de nuestras redes nerviosas— están implícitos

miles y miles de puntos de bifurcación que constituyen una cronología viviente de las opciones por medio de las cuales evolucionamos como un sistema, desde la célula primordial hasta nuestra forma presente.

En cada punto de bifurcación del pasado de nuestro sistema surgió un flujo en el cual existían muchos futuros. A través de la iteración y amplificación del sistema, se escogió un futuro y las demás posibilidades se esfumaron para siempre. Así nuestros puntos de bifurcación constituyen un mapa de la irreversibilidad del tiempo.

El tiempo es inexorable, pero en las bifurcaciones el pasado es reciclado continuamente, y en cierto modo se vuelve atemporal, pues al estabilizar por realimentación la senda de bifurcación que adopta, un sistema encarna las condiciones exactas del medio ambiente en el momento en que ocurrió la bifurcación. Un vestigio del mar primordial permanece en las reacciones químicas que enlazan los mitocondrios de nuestras células con el citoplasma que las rodea, el paisaje de la era de los reptiles acecha en la estructura del sistema reticular activador de nuestro cerebro, que rige nuestro nivel de atención.

Así la dinámica de las bifurcaciones revela que el tiempo es irreversible pero capaz de recapitulaciones. También revela que el movimiento del tiempo es inconmensurable. Cada decisión tomada en un punto de ramificación implica la amplificación de algo pequeño. Aunque la causalidad opera en cada instante, las ramificaciones acontecen imprevisiblemente.

Prigogine observa: "Esta mezcla de necesidad y azar constituye la historia del sistema". También constituye la creatividad del sistema. La aptitud de un sistema para amplificar un cambio pequeño es una palanca creativa.

Los sistemas biológicos permanecen estables porque frustran la mayoría de los efectos pequeños excepto en aquellas zonas de conducta donde se requiere un alto grado de flexibilidad y creatividad. Aquí el sistema permanece muy sensible al flujo que recibe, próximo a un estado de caos. Una sola abeja que ingresa en una colmena de miles de colegas interactuantes puede, mediante una pequeña danza que indique dónde hay flores ricas en polen, lanzar la colmena entera al aire.

Los sistemas también son muy sensibles cerca de esos lugares que constituyen la "memoria" cristalizada de bifurcaciones pasadas. Las naciones habitualmente evolucionan a través de bifurcaciones que implican intensos conflictos. En consecuencia, son muy sensibles a ciertas clases de información que recrean dichas bifurcaciones. Un mero titular en un periódico puede movilizar una nación entera llevándola a la guerra.

La idea de sensibilidad a las bifurcaciones también se utiliza para explicar el curioso fenómeno de la quiralidad.

Quiralidad (del griego *kheiro,* "mano") alude a la lateralidad, la existencia de dos "manos", el hecho de vivir en un mundo asimétrico. Las espirales de las caracolas giran más hacia un lado que hacia el otro. La mayoría de las moléculas importantes de la vida son zurdas. En el laboratorio es posible producir moléculas con iguales probabilidades de ser zurdas o diestras; de hecho, es difícil conseguir que las reacciones químicas de laboratorio tengan

simetría a menos que sembremos cierta lateralidad desde el exterior. Pero no ocurre así en la naturaleza. Louis Pasteur, uno de los primeros en estudiar el problema, llegó a la conclusión de que debía de haber una asimetría básica en la naturaleza, pero nunca pudo hallar el origen de dicha asimetría. Varias teorías han tratado de explicar la quiralidad después de Pasteur, pero ninguna de ellas es del todo satisfactoria.

Recientemente miembros del grupo de Prigogine descubrieron una solución y la publicaron en la revista *Nature.* En la década de 1970 los físicos se sorprendieron al descubrir que el mundo de las partículas atómicas no es del todo simétrico. Cuando los electrones se separan del átomo, giran en una u otra dirección. Los físicos ahora dicen que Dios es zurdo. Sin embargo, las energías involucradas en la opción de la lateralidad de una partícula elemental son minúsculas cuando se las compara con la energía involucrada en las moléculas de la vida. Los científicos estaban convencidos de que la lateralidad izquierda, en el nivel *de* las partículas elementales, no podía tener nada que ver con la lateralidad izquierda de las moléculas biológicas.

Pero, como hemos visto, en los estados alejados del equilibrio los efectos muy pequeños se magnifican. Por ejemplo, la ínfima diferencia de gravedad de unos centímetros de líquido normalmente sería de escasa importancia. Sin embargo, en la inestabilidad de Bénard, la turbulencia alejada del equilibrio magnifica este efecto gravitatorio y deriva en el patrón hexagonal de Bénard.

D. K. Koriepudi, colega de Prigogine, cree que algo similar ocurre con la rotación preferencial de los electrones. En el caos de desequilibrio que da nacimiento a moléculas nuevas, un sistema disipativo puede amplificar rápidamente la ínfima diferencia energética en la rotación, proyectando la lateralidad subatómica izquierda de Dios al nivel de la molécula orgánica.

¿QUE DIRECCIÓN TIENE EL TIEMPO?

A pesar de la conexión hipotética entre la rotación de las partículas subatómicas y la formación de lateralidad en las moléculas de gran escala, la mayoría de los científicos siguen creyendo que existe una división esencial entre el reino cuántico de la pequeñez y el reino newtoniano "clásico" de la vastedad. El descubrimiento del tiempo irreversible en sus formas optimista y pesimista —entropía y evolución—, realizado en el siglo diecinueve, no logró disuadir a los físicos de su convicción de que en los niveles más básicos de la materia el tiempo es reversible y que la irreversibilidad que vemos alrededor es —como le dijo Einstein a la viuda de Besso— una suerte de ilusión. Esta convicción surge de la reversibilidad temporal de las ecuaciones lineales que describen el movimiento de los átomos y las partículas elementales. En la década de 1870 Boltzmann había superado la aparente paradoja entre las escalas atómica y clásica argumentando que la respuesta se encuentra en el modo en que los átomos se barajan a sí mismos, volviendo cada vez más improbable la restauración de un orden inicial. Argumentó que la irreversibilidad entra en el mundo porque las colisiones reversibles que sufren los sistemas son tan complejas que, como sonámbulos,

los átomos "olvidan su condición inicial" y se desordenan. La brillante solución de Boltzmann, que vinculaba la clásica ciencia newtoniana de la gravedad con la ciencia termodinámica del cambio, condujo a la invención del campo científico de la mecánica estadística.

Como resultado de los esfuerzos de Boltzmann, la termodinámica hizo furor a fines del siglo diecinueve. Dio gran impulso a la forma positivista lógica del reduccionismo. Los positivistas creían que todos los fenómenos se podían reducir a una descripción que involucrara la dinámica mecánica, es decir, cuerpos en movimiento. Se daba por sentado que la termodinámica y la transformación involucraban esta clase de dinámica mecánica.

Aun Freud sufrió la profunda influencia del enfoque reduccionista positivista, y las ideas freudianas se desarrollaron originalmente en términos termodinámicos. Freud hablaba del psicoanálisis como de "una concepción dinámica que reduce la vida mental al interjuego de fuerzas que se impulsan y se contienen recíprocamente".

Sin embargo, no todo eran rosas para el reduccionismo termodinámico. Poincaré argumentó que la solución de Boltzmann al dilema reversibilidad-irreversibilidad era un truco de magia que no solucionaba el problema de modo fundamental. Boltzmann tal vez le dio la razón; desesperado por lo que consideró el fracaso de su explicación, se suicidó.

Prigogine declara que al principio aceptó la solución de Boltzmann y la creencia de que las leyes fundamentales de la física son reversibles temporalmente. "Creía, como todos los demás, que hay irreversibilidad, pero que debe venir de aproximaciones que luego se imponen sobre las reglas básicas, temporalmente reversibles; viene de la ignorancia, de nuestras aproximaciones." Sin embargo, "los estudios sobre los estados alejados del equilibrio me llevaron a la convicción de que esto no puede ser correcto. La irreversibilidad tiene un papel *constructivo.* Constituye la forma. Constituye a los seres humanos. ¿Cómo podría ser nuestra ignorancia acerca de las condiciones iniciales la razón de esto? Nuestra ignorancia no puede ser la razón de que existamos".

No es posible concebir, insiste, que si tan sólo pudiéramos aumentar nuestro conocimiento, crear un ordenador tan potente que nos permitiera escribir ecuaciones para el movimiento de todas las moléculas reversibles y probabilísticas que constituyen un sistema, nuestra ignorancia desaparecería, se expondría la ilusión de irreversibilidad, y con ella se esfumarían la vida, la evolución, la muerte y el tiempo. "Eso es paradójico."

La teoría del caos ahora respalda esta posición, pues, como hemos visto, jamás se podría hacer un ordenador tan grande como para rastrear un sistema irreversible. Nuestra ignorancia es una expresión del hecho holístico de que en el universo de las fuerzas dinámicas que crean galaxias y células todas las cosas están entrelazadas. Ese es el verdadero sentido de la irreversibilidad.

No obstante, hay ecuaciones lineales que indican a los físicos que, reducida a meras partículas atómicas, la reversibilidad debe

reinar. Prigogine recela de este "hecho" establecido. En los últimos años se ha afanado en montar un audaz asalto contra los cimientos de la física, precisamente en un período histórico en que algunos físicos eminentes entienden que las ecuaciones temporalmente reversibles están por explicar virtualmente todo lo que alguna vez quisimos saber sobre el funcionamiento de las cosas atómicas.

Ante esta autosuficiencia, Prigogine plantea una sensata y turbadora objeción que evoca a Poincaré. Aun en el nivel microscópico, declara, la reversibilidad es la ilusión. "Nunca se puede realizar un experimento donde el pasado y el futuro sean lo mismo para un sistema dinámico e inestable de partículas atómicas. Si comenzamos con partículas que tengan las mismas velocidades, y sufran colisiones, terminarán con velocidades aleatorias. Pero no podemos realizar el experimento inverso. No hay experimentos reversibles. Por tanto, nuestro mundo está organizado temporalmente." El tiempo siempre tiene una flecha. Prigogine también señala que la relatividad, que para Einstein constituía la formulación de la reversibilidad y la intercanjeabilidad del espacio y del tiempo, ha conducido a la formulación de la teoría de la gran explosión o *big bang,* que en realidad da al universo una historia irreversible. En la física cuántica actual, sostiene Prigogine, la irreversibilidad aparece en todas partes.

Si el primer desafío que presenta a sus contemporáneos es un reto a la reversibilidad, el segundo se refiere al concepto de simplicidad. Desde Demócrito y Aristóteles, los científicos creen que objetos y fuerzas simples deben subyacer a la complejidad de nuestro mundo. Al principio pensaban que estos ladrillos simples eran los átomos. Luego, cuando se descubrió que los átomos tenían partes, los ladrillos se transformaron en partículas simples como el protón y el electrón. Luego, cuando la mecánica cuántica condujo al imprevisto descubrimiento de un anonadante "zoológico de partículas" en el nivel subatómico, los físicos diseñaron la gran teoría unificada y comenzaron a buscar la fuerza simple y única —la "superfuerza"— que presuntamente generaba este laberinto de interacciones entre partículas pequeñas. Sin embargo, aún no se ha descubierto la superfuerza y, al menos hasta ahora, la investigación ha descubierto que por cada simplificación hay por lo menos dos nuevas complejidades. Prigogine dice: "La idea de simplicidad se está desmoronando. Adondequiera uno vaya, hay complejidad".

¿Entonces cómo funciona todo? Tratando de forjar una propuesta revolucionaria para unificar la dinámica y la termodinámica, el mundo microscópico y el mundo macroscópico, la reversibilidad y la irreversibilidad, el ser y el devenir, Prigogine arguye que el tiempo es una forma de "ruptura de la simetría".

Los científicos conciben el espacio vacío como rotativamente simétrico, en el sentido de que todas las direcciones son equivalentes. Sin embargo, si introducimos en ese espacio un imán como la Tierra, la simetría se rompe. El imán escoge el norte como una dirección especial y a partir de allí es posible orientar otros imanes en el espacio.

Análogamente, argumenta Prigo-

gine, los sistemas complejos rompen la simetría que permitiría al tiempo ir hacia atrás y hacia adelante. Los sistemas complejos imprimen al tiempo una dirección. ¿Cómo lo hacen?

Los sistemas complejos —tanto caóticos como ordenados— son imposibles de analizar en última instancia: no se pueden reducir a partes porque las partes constantemente se pliegan unas dentro de otras mediante la iteración y la realimentación. Por tanto, es ilusorio decir que se aísla una interacción entre dos partículas y afirmar que esta interacción puede retroceder en el tiempo. Toda interacción acontece en el sistema más grande y el sistema, en cuanto totalidad, constantemente cambia, se bifurca, efectúa iteraciones. Así que el sistema y todas sus "partes" tienen una dirección en el tiempo.

El tiempo se convierte así en expresión de la interacción holística del sistema, y esta interacción se extiende hacia afuera. Todo sistema complejo es una parte cambiante de una totalidad más vasta, y la acumulación de totalidades cada vez más vastas lleva eventualmente al sistema dinámico más complejo de todos, el sistema que en definitiva abarca todo aquello a que aludimos con orden y caos: el universo mismo.

Una vez que aparece un sistema complejo, dice Prigogine, se separa del tiempo reversible mediante lo que él denomina una "barrera de entropía infinita". Los procesos que circulan en la dirección inversa del tiempo no sólo se vuelven astronómicamente improbables, como había dicho Boltzmann, sino *infinitamente* improbables. Esto se puede ejemplificar con las ondas que se difunden cuando arrojamos una piedra a un estanque. Para revertir temporalmente esta situación se requeriría una coordinación precisa de todas las perturbaciones infinitesimales que se produjeron en el borde del estanque, para que se muevan hacia adentro, crezcan en amplitud y converjan al fin en un solo hoyuelo. Mientras que el acoplamiento de fuerzas no lineal necesario para producir un solitón es abrumador, la coordinación lineal de fuerzas aquí sería *infinitamente* abrumadora.

Toda coordinación última de hechos en el estanque queda imposibilitada porque todos los sistemas están abiertos al resto del universo. La naturaleza está bañada en un flujo constante de gravedad, electricidad y magnetismo, además de pequeñas fluctuaciones en la temperatura y otras fuerzas. Aun el movimiento de las estrellas distantes produce cambios minúsculos en el campo gravitatorio experimentado en la Tierra. Aunque estas fluctuaciones exceden toda esperanza de medición en la Tierra, siempre destruyen las correlaciones iniciales. Así que, aunque las condiciones iniciales correctas se pudieran organizar en el borde del estanque, serían pronto obliteradas por esas contingencias sutiles mucho antes que las ondas en contracción convergieran en el centro. El tiempo de sistemas ideales y aislados puede ser reversible, pero en los sistemas *reales* la simetría temporal siempre se rompe.

Prigogine cree que la ruptura de la simetría temporal acontece en todos los niveles de la naturaleza, desde el cuanto hasta el elefante y la galaxia. Hay tanto un tiempo como infinitos tiempos. El tiempo es la gran flecha que acopla todos los sistemas y una multitud de flechas que constituyen las bifurcaciones y cambios de cada sistema individual. Cada uno de

nosotros tiene su propia flecha reversible, pero esa flecha está entrelazada con la flecha irreversible del universo.

Usando esta lógica, Prigogine revisa la teoría del *big bang.* Dice: "El universo comienza con un estallido de entropía (caos) que deja la materia en un estado organizado. Después de esto, la materia se disipa lentamente y crea en esta disipación, como subproducto, estructuras cosmológicas, vida y finalmente a nosotros mismos. Hay tanta entropía disipada que se la puede usar para construir algo". Así la entropía que Clausius veía como una sopa aleatoria es para Prigogine una sopa infinitamente más nutritiva de la cual surgen las estructuras disipativas. Prigogine revisa el concepto clásico de entropía, o caos pasivo, volviéndolo activo. La entropía tiene "tanto poderes positivos como negativos. Los poderes positivos se usan para compensar los poderes negativos de tal manera que el total sigue siendo positivo".

Prigogine cree que la dinámica clásica y la cuántica, con su insistencia en la reversibilidad y la atemporalidad, constituyen una idealización de la naturaleza. Como descubrimos en el otro lado del espejo, un sistema nunca puede estar encerrado en una caja. El "exterior", el todo, siempre se filtra por una brecha en la cadena de decimales, la "información faltan te". Así la naturaleza real es siempre entrópica, turbulenta e irreversible.

Al ver la irreversibilidad en todo, hasta el fondo de las cosas, Prigogine quiere deshacerse de la tradicional separación científica entre el universo de gran escala y el de pequeña escala. "Si no está arraigado en el mundo microscópico, ¿de dónde viene nuestro mundo? ¿De dónde viene nuestro tiempo? ... Es un dato muy notable. Si tomamos a algunos de los más grandes hombres de los dos últimos siglos —Bergson, Heidegger, Einstein—, dirían que la irreversibilidad no se puede hallar a través de la física. Se tiene que hallar a través de la metafísica o es algo que añadimos a la naturaleza. Si adoptamos este punto de vista, el tiempo nos separa del universo. Pero si consideramos que la irreversibilidad es un fenómeno natural, el tiempo ya no nos separa de la naturaleza."

Un instante después añade reflexivamente, casi melancólicamente: "Si revierto los conceptos clásicos no es porque lo desee, sino porque trato de expresar lo que veo acerca del papel constructivo de los procesos irreversibles. ... No he comenzado mi trabajo diciendo que quiero introducir conceptos nuevos".

Es posible, pero la perspectiva de Prigogine no ha seducido a sus contemporáneos. Un reseñador de su último libro señalaba que "lo más parecido a un consenso acerca de la obra de Prigogine es que cae en alguna parte del espectro limitado por la ciencia responsable y la tecnología del campo unificado del Maharishi Mahesh Yogi". El difunto Heinz Pagels afirmaba: "Sólo Prigogine y unos pocos colaboradores se aferran a estas especulaciones que, a pesar de sus esfuerzos, continúan existiendo en las fronteras de la credibilidad científica".

Pagels, físico y célebre autor de *El código cósmico,* era un físico cuántico ortodoxo. Su crítica mordaz puede reflejar una actitud que los físicos tienen a veces ante la química, y la especialidad de Prigogine es la química. La física es la reina de las ciencias porque trata acerca de las

leyes más básicas de la naturaleza. La química estudia cuestiones derivadas, reza este razonamiento. Pero ésta es precisamente la actitud que Prigogine ataca en su tercer desafío al *establishment* científico. Tradicionalmente se ha abordado la naturaleza como una jerarquía que comienza con la estructura atómica y termina con organismos biológicos complejos. Se supone que cada nivel de la descripción científica está construido sobre el precedente, y las descripciones del nivel más fundamental —la física— tienen prioridad. Pero para Prigogine la naturaleza no está construida de abajo para arriba. Está construida mediante realimentación en todos los niveles. Así su idea de una descripción científica de la naturaleza "no supone ninguna modalidad fundamental de descripción; cada nivel de descripción está implícito en otro e implica otro. Necesitamos una multiplicidad de niveles interconectados, ninguno de los cuales puede aspirar a la preeminencia".

Este tipo de afirmación ha irritado, por cierto, a algunos físicos. Su afirmación complementaria es aun más provocativa. Prigogine cree que las leyes de la naturaleza, incluidas las leyes de la física, no están todas "dadas" desde el principio, ni siquiera implícitas lógicamente. Evolucionan tal como evolucionan las especies. A medida que las cosas se complican, acontecen bifurcaciones y amplificaciones y emergen nuevas leyes. "¿Cómo podemos hablar de leyes de biología si no hay sistemas vivientes? El movimiento planetario es algo que llega muy tarde."

Este aserto alude a la creatividad de la naturaleza. Cada nivel de organización produce algo fundamentalmente nuevo algo que no está presente en los elementos constitutivos o "partes" del nivel anterior. Por ejemplo, el agua no está presente en una mezcla de hidrógeno y oxígeno. Tiene una nueva unidad que de hecho sacrifica las "partes" hidrógeno y oxígeno. El único modo de recobrar estas partes es destruyendo el agua.

Como ninguna ley ni "parte" del universo es más fundamental que otra, Prigogine cree que la ciencia, en vez de proceder lineal y jerárquicamente, debe tratar de ordenar y describir la red de leyes y procesos que unen todos los niveles. Hay que encarar la naturaleza como una telaraña dinámica y cambiante, no como una pirámide mecánica y jerárquica.

Pagels era un entusiasta apologista y partícipe del proyecto de la gran unificación, destinado a descubrir la superfuerza que subyacía a toda la materia. No es sorprendente que el enfoque de Prigogine lo irritara. Prigogine tiene su propia crítica para el proyecto de la gran unificación. "La gran unificación quiere llegar a una descripción del universo que sea unificada, pero si está unificada no tenemos segunda ley de la termodinámica [la ley de la entropía creciente, el tiempo]. El universo no es una identidad, todas las partículas no se reducen a una. Si tenemos identidad, no tenemos flecha del tiempo, y sin embargo esa flecha existe."

CAOS CREATIVO

Detrás de los argumentos de Prigogine a favor del tiempo arde el alma de un visionario que cree que en las leyes de la imprevisibilidad, el caos

y el tiempo —no en las leyes mecánicas de la dinámica clásica— reside el secreto de la creatividad de la naturaleza. Prigogine cita como ejemplo de la creatividad del caos y la irreversibilidad el papel que desempeñaron en la emergencia de la vida.

Konepudi y otros científicos del grupo de investigadores de Prigogine están trabajando en experimentos que pueden mostrar cómo evolucionó el complejo código de! nucleótido ADN. El ADN es un polímero o cadena de moléculas con eslabones recurrentes. El problema, tal como lo plantea Prigogine, es: "¿Cómo se puede poner un texto en un polímero?" O, más propiamente, ¿cómo se puede transformar un polímero en texto? "Si uno acopla un polímero con una reacción de ciclo límite, el polímero se convierte en ABAB. No lograremos mucho con esto. Pero si lo acoplamos con una reacción caótica, obtenemos secuencias complicadas. Se obtiene una dinámica simbólica." En otras palabras, se obtiene un registro del nacimiento de diversas bifurcaciones de estructuras disipativas, el orden en el caos. "Este texto es rico en información. Y como este texto es debido a la irreversibilidad, hay un modo de leerlo, que es precisamente lo que hallamos en los verdaderos nucleótidos, los cuales hay que leer en una dirección." El nucleótido es pues un registro de la dinámica alejada del equilibrio (el ambiente) que actuó sobre él y puede reproducir esa dinámica al ser leído. "Por tanto, vemos que el caos no es en absoluto un elemento negativo", dice triunfalmente Prigogine.

Al enfatizar el papel del azar y el caos en la creación de la estructura, Prigogine evoca un universo donde los objetos están menos definidos que en la física clásica y aun la cuántica. En el cosmos de Prigogine el futuro no puede estar determinado porque está sometido al azar, la fluctuación, la amplificación. Prigogine dice que se trata de un nuevo "principio de incertidumbre".

El famoso principio de incertidumbre (o indeterminación) enunciado por Werner Heisenberg para la mecánica cuántica formulaba la imposibilidad de saber con total precisión tanto la posición como el impulso de cualquier partícula subatómica. El principio de incertidumbre introducía la necesidad de la probabilidad en la descripción de la conducta de las partículas. El nuevo principio de incertidumbre de Prigogine dice que más allá de cierto umbral de complejidad los sistemas siguen rumbos imprevisibles; pierden sus condiciones iniciales y no se pueden invertir ni recobrar. Esta incapacidad para retroceder en el tiempo es una "barrera en trópica". El descubrimiento de la barrera entrópica es similar al descubrimiento einsteiniano de que los seres humanos y los mensajes no pueden viajar a mayor velocidad que la luz, es decir, no pueden superar la "barrera lumínica".

Al igual que el principio de incertidumbre de Heisenberg, el de Prigogine es un golpe al reduccionismo. Pero para Prigogine este modo de mirar la naturaleza es menos una limitación que un reconocimiento de posibilidades creativas. Por ejemplo, al hablar acerca de las ideas de progreso, él y Stengers señalan que la mayoría de las definiciones de progreso dan "una tranquilizadora representación de la naturaleza como una calculadora todopoderosa y racional, y de una historia coherente caracterizada por el progreso global. Para restaurar tanto la inercia como

la posibilidad de acontecimientos no previstos —es decir, restaurar el carácter abierto de la historia— debemos aceptar su fundamental incertidumbre. Aquí podríamos usar como símbolo el carácter aparentemente accidental de la gran extinción cretácea que allanó el camino para el desarrollo de los mamíferos, un pequeño grupo de criaturas semejantes a ratas".

Al final del libro, describen su enfoque de la irreversibilidad —el enfoque del caos— como una tendencia que conduce a algo nuevo en las ciencias: "una suerte de 'opacidad' en comparación con la transparencia del pensamiento clásico". Uno recuerda la afirmación de John Keats, según la cual para ser un poeta hay que vivir entre "dudas e incertidumbres". Prigogine propone esto como un nuevo camino para la ciencia.

> ¿Constituye esto una derrota para la mente humana? Es una pregunta difícil. Como científicos, no tenemos opción; no podemos describir el mundo tal como nos gustaría verlo, sino sólo como podemos verlo a través del impacto combinado de los resultados experimentales y los nuevos conceptos teóricos. Creemos además que esta nueva situación refleja la situación que parecemos hallar en nuestra propia actividad mental. La psicología clásica se centraba en la actividad consciente, transparente; la psicología moderna otorga mucho peso al opaco funcionamiento del inconsciente. Tal vez esto sea una imagen de los rasgos básicos de la existencia humana. Recordemos a Edipo, recordemos su lucidez mental frente a la esfinge, y la opacidad y oscuridad de su mente al enfrentar sus propios orígenes. Tal vez la unión de nuestras intuiciones acerca del mundo que nos rodea y el mundo de nuestro interior es un rasgo satisfactorio de la reciente evolución científica que hemos intentado describir.

El biólogo reduccionista Jacques Monod comenta que la ciencia que se desarrolló a principios de este siglo, la ciencia de la mecánica cuántica, y su descendiente, la gran unificación, definen un universo donde la vida y los seres humanos son accidentes que no "derivan de las leyes de la física" pero "son compatibles con ellas". En consecuencia, la ciencia ha mostrado que el hombre está solo y aislado en el cosmos, que es un "gitano" que "vive en el linde de un mundo ajeno, un mundo que es sordo a su música, tan indiferente a sus esperanzas como a sus penurias y sus crímenes". El universo es una vasta máquina, un ordenador probabilístico donde la vida y la inteligencia tienen una probabilidad comparativamente baja.

Prigogine rechaza de plano la perspectiva reduccionista. Al concentrarse en la existencia del tiempo en todas las dimensiones de la realidad, en el papel omnipresente del caos en la creación de orden espontáneo, Prigogine tiende hacia lo que denomina el "reencantamiento de la naturaleza". Quiere mostrar que, siendo seres temporales y espontáneamente creados, formamos parte integral del movimiento temporal y espontáneamente organizado de la naturaleza en vez de ser un accidente poco probable. También quiere mostrar que nuestros actos tienen peso.

"La libertad y la ética no tienen lugar en un autómata. Sin embargo, una vez que se percibe que el

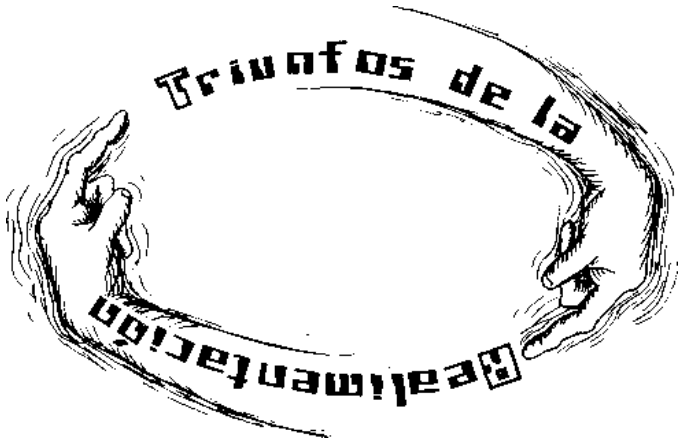
mundo es suficientemente complejo, el problema del valor se modifica ... Nuestros actos conducen a una de las ramas de la bifurcación. Nuestra acción construye el futuro." Cree que "como aun las fluctuaciones pequeñas pueden crecer, nuestra actividad individual no está pues condenada a la insignificancia. Por otra parte, esto también representa una amenaza, pues en nuestro universo la seguridad de las reglas estables y permanentes parece haber desaparecido. Vivimos en un mundo peligroso e incierto que no inspira confianza ciega."

Renée Weber, en su libro *Científicos y sabios,* sitúa a Prigogine junto a los místicos tradicionales y los nuevos místicos científicos como David Bohm. Pero esta autora demuestra que Prigogine no es un místico en un sentido fácilmente definible. Por cierto parece ser un místico al hablar del caos. Por ejemplo, aunque la palabra surge una y otra vez en sus conversaciones y sus escritos, rehúsa definirla. Pero no cree en la percepción mística y directa de lo Único.

Al definir esta rama del misticismo parece apropiado señalar que Prigogine es un coleccionista de arte precolombino, lleno de formas terrenas y nebulosas. Su misticismo parece emparentado con el arte, o con una antigua ciencia que trae noticias que el Emperador Amarillo recibiría con gusto. Anuncia que el hechizo del reduccionismo era un sueño, y que la realidad temporal en que hemos despertado es un sueño aun mejor.

Un proverbio de los indios americanos dice que el tiempo es atemporal, y que se trata de algo que los indios han sabido siempre pero que el hombre blanco aún tiene que aprender. Tal vez Prigogine sea uno de los primeros científicos occidentales en aprenderlo, o reaprenderlo. Y a la atemporalidad del tiempo ha añadido además otro viejo ingrediente: el caos como fuente de la estructura y la vida.

Capítulo 2



Cuando el Emperador Amarillo despertó, estaba encantado de haberse encontrado a sí mismo.

LIEH TZU

LO COLECTIVO AUTÓNOMO

Las apreciaciones de Prigogine acerca del caos enfatizan la diferencia entre una visión mecánica y una visión holística de la naturaleza. Otro modo de entender esta vasta diferencia consiste en examinar la realimentación.

Si una máquina funciona mal, encontrar el problema es relativamente fácil. Se ha roto un eslabón en la cadena de causa y efecto de las partes. Encontramos el eslabón y lo reparamos. Sin embargo, cuando el cuerpo humano funciona mal, un médico puede diagnosticar que el culpable es determinado elemento, pero en realidad la "causa" de toda perturbación de nuestra salud siempre es múltiple, pues un organismo viviente está constituido por una apabullante cantidad de rizos de realimentación. En los rizos de las estructuras vivientes están entretejidos la transmutación de los alimentos en energía, la contracción muscular, la regulación de la temperatura corporal, el movimiento de las hormonas y los neuro-transmisores, las acciones reflejas tales como la dilatación del iris del ojo en la oscuridad repentina, o la aceleración del corazón en presencia del peligro. Los rizos de realimentación negativa regulan, los rizos positivos amplifican. Miríadas de rizos están enlazados de tal modo que la organización interna de un organismo puede adaptarse continuamente a las exigencias ambientales. Podemos desarmar una máquina en partes y ensamblarla de nuevo para que funcione normalmente, pero esto no se puede hacer con una entidad viva. Si se pierde una pieza funcional, la máquina se detiene. En cambio, si un organismo pierde una parte funcional, puede compensar la parte faltante a través de sus rizos de realimentación y seguir andando. Por último, una máquina convierte el combustible en calor y movimiento, pero no convierte el combustible en sí misma, como lo hace un organismo a través de la realimentación.

Estas propiedades de la realimentación, sobre todo la de autorrenovación constante, confieren a los sistemas vivientes características singulares. La ciencia define estas características con el concepto de "autopoiesis".

Las estructuras autopoiéticas se encuentran en un complejísimo extremo del espectro natural de los "sistemas abiertos". El espectro abarca desde sistemas auto-organizativos simples (los remolinos, la Mancha Roja de Júpiter) hasta estructuras disipativas químicas más complicadas (la reacción Belousov-Zhabotinsky) y sistemas autopoiéticos de elevada complejidad (nosotros mismos). Los sistemas autopoiéticos son criaturas notables y paradójicas. Por ejemplo, las estructuras autopoiéticas, al tener capacidad de autorrenovación, son muy autónomas, y cada cual posee una identidad propia que mantiene continuamente. No obstante, al igual que otros sistemas abiertos, las estructuras autopoiéticas están inextricablemente encastradas en un ambiente, e inextricablemente fundidas con él. Dicho ambiente es por fuerza un ámbito alejado del equilibrio constituido por flujos de alta energía que involucran alimento, luz solar, agentes químicos disponibles y calor. Para expresar la paradoja de otro modo, cada estructura autopoiética tiene una historia singular, pero esta historia está ligada con la historia del ámbito más vasto y a otras estructuras autopoiéticas: un entrelazamiento de flechas de tiempo. Las estructuras autopoiéticas tienen límites definidos, tales como una membrana semipermeable, pero los límites son abiertos y conectan el sistema con el mundo circundante con una complejidad casi inimaginable.

Se han realizado filmes de acción rápida acerca de personas trabadas en conversación, y ellos ilustran la paradoja autopoiética. Los filmes revelan que una danza sutil se produce entre el que habla y el que escucha, una acción rítmica de ida y vuelta que parece respetar una coreografía precisa. El espectador del filme parece estar en presencia de los movimientos de un solo organismo. La conversación revela la sutil interconexión que subyace a todas las estructuras autónomas. Análogamente, nuestros más íntimos pensamientos y sentimientos surgen de una constante realimentación, y del flujo de los pensamientos y sentimientos de otras personas que han influido en nosotros. Nuestra individualidad es sin duda parte de un movimiento colectivo. Ese movimiento tiene la realimentación en sus raíces.

EL PLANETA NO LINEAL

La naturaleza de las estructuras autopoiéticas, basada en la realimentación, no debería sorprendernos, pues desde los comienzos la vida en la Tierra se ha construido mediante una interconexión basada en la realimentación. Esa interconexión tenía sus raíces en el caos, algo que tampoco debería sorprendernos.

Recordemos la asombrosa complejidad que hallábamos en los confines del conjunto de Mandelbrot. Ahora imaginemos las formas giratorias de esa iteración

puramente matemática como una visión metafórica de los procesos químicos que en un tiempo burbujearon y se coagularon en la Tierra primordial.

Según Sherwood Chang, del centro de investigación Ames de la NASA, las estructuras disipativas que condujeron a la vida en nuestro planeta tal vez comenzaron en el caótico contacto entre superficies sólidas, líquidas y gaseosas, donde hay un flujo de alta energía. Algunos científicos sugieren que en este nexo caótico las estructuras químicas autocatalíticas como la reacción Belousov-Zhabotinsky constituyeron una forma de protovida y que en la Tierra primitiva florecieron muchas variaciones de este tipo de reacción. Reaccionando ante este ámbito alejado del equilibrio, los descendientes de estas primeras estructuras autocatalíticas, autorreferenciales y autosimilares se eslabonaron para formar una estructura más vasta de rizos de realimentación llamada hiperciclo. El ARN era un hiperciclo.

La emergencia del ARN y su importante descendiente, el ADN, fueron pasos radicales para la autosimilitud surgida del caos. A través del ARN y el ADN, el hiperciclo incrementó en gran medida su capacidad para la iteración y la autorreplicación. Como el proceso de copia del ADN también creaba variaciones, las interacciones no sólo reprodujeron las mismas formas sino que produjeron gran cantidad de formas nuevas. Los microbios a los que dio nacimiento el hiperciclo del ARN eran tremendamente adaptables ante las crudas condiciones de la Tierra primitiva.

Los miles de variedades de microbios que inicialmente habitaron y todavía habitan nuestro planeta se adaptan pasando fragmentos de ADN. Una "raza" de bacterias se puede alterar mediante el simple expediente de barajar su código genético, absorbiendo nuevos fragmentos de ADN o cediendo fragmentos viejos. Mediante este método, las bacterias transformaron la Tierra. El método permitió que equipos integrados por diferentes "razas" bacterianas se acoplaran y los productos de desecho de una raza se convirtieran en recursos alimentarios de otra.

El teórico de sistemas Erich Jantsch señaló una vez que si la meta de la evolución fuera simplemente la adaptación, el cambio evolutivo habría cesado con las bacterias. El mecanismo de realimentación de ADN de las bacterias les permite mutar y adaptarse a toda clase de condiciones adversas con asombrosa celeridad. Pero la evolución parece tener otras metas, sugiere Jantsch, y una de ellas podría ser la mera "intensificación de la vida". En la próxima etapa de intensificación, la realimentación biológica evolucionó hacia una forma radicalmente nueva.

Entre los científicos existe un creciente respaldo hacia una revolucionaria teoría de la evolución por realimentación propuesta por la microbióloga Lynn Margulis, de la Universidad de Boston. Margulis cree que la "nueva clase de célula" que apareció hace 2.200.000 años para convertirse en la base de las células de todas las plantas y animales multicelulares que existen hoy no fue resultado de una mutación genética sino de una simbiosis. No fue

producto de una brutal competencia por la supervivencia del más apto, sino de la cooperación. En su libro *Microcosmos,* escrito con su hijo Dorion Sagan, esta científica afirma:

> La competencia en la cual el fuerte gana ha recibido mucha mejor prensa que la cooperación. Pero ciertos organismos superficialmente débiles han sobrevivido formando parte de entidades colectivas, mientras que los presuntamente fuertes, al no haber aprendido el truco de la cooperación, fueron arrojados a la pila de residuos de la extinción evolutiva.

Aunque al principio escépticos, la mayoría de los biólogos ahora concuerdan con Margulis y aceptan que la evolución dio un salto brusco cuando los microbios se acoplaron simbióticamente en reacción ante el "holocausto" resultante de la propagación de un producto tóxico de desecho liberado por las cianobacterias, perjudicial para la mayor parte de la vida bacteriana, las cianobacterias incluidas. Esta toxina contaminante era el oxígeno. El "holocausto por oxígeno", como se lo ha llamado, causó una muerte masiva de bacterias e impuso mutaciones que crearon nuevas razas. Algunas bacterias se escabulleron bajo tierra para huir del gas letal, otras desarrollaron la capacidad para "respirar" oxígeno; otras entablaron relaciones de realimentación que condujeron a un nuevo paso en la evolución.

Margulis sugiere que estaba montado el escenario para la simbiosis cuando una de las cianobacterias que estaba provocando el holocausto por oxígeno entró en otra bacteria en busca de alimentos. El organismo huésped se protegió de la repentina presencia del oxígeno de esa célula formando una membrana nuclear alrededor de su ADN, y esto creó la primera célula nucleada.

Una segunda invasión —esta vez llevada a cabo por bacterias alargadas que *respiraban* oxígeno y entraron en un organismo huésped— activó un cambio claramente simbiótico. Margulis teoriza que al combatir la invasión de los que respiraban oxígeno, el organismo huésped terminó formando eslabones de realimentación con el invasor y el invasor se quedó, transformando la realimentación en un arreglo muy beneficioso. La relación otorgó al huésped la capacidad para usar el oxígeno como fuente energética y a la vez dio al invasor alargado un ámbito permanente de sostén. La simbiosis testimonia el principio de que una estructura autopoiética cambia con el objeto de permanecer igual. También demuestra uno de los extraños modos en que se produce el acoplamiento por realimentación. Este intento de rechazar a un intruso creó una interacción que creó un matrimonio.

Según la teoría de Margulis, el apareamiento simbiótico entre las dos razas bacterianas eventualmente fue tan total que sólo quedan algunos indicios del origen distinto del intruso. Uno de ellos es el hecho de que los actuales descendientes de esas bacterias intrusas —llamados mitocondrios— forman parte permanente de nuestras células, pero aún poseen un ADN separado.

Margulis cree que el reino vegetal nació en un proceso similar cuando células huésped nucleadas fueron invadidas por las cianobacterias, amantes del sol y productoras de oxígeno. La resultante interacción por realimentación "convenció" a las cianobacterias de quedarse como

cloroplastos y otorgó a la nueva célula la capacidad para crear energía a partir del agua y la luz solar, y luego, junto con los mitocondrios de las células, para respirar lo que antes era un desecho tóxico. Los cloroplastos también tienen su propio ADN.

Según Margulis, las bacterias espiroquetas, veloces y con forma de destornillador, constituyeron otra intrusión transformada en matrimonio. Si ella está en lo cierto (muchos biólogos no aceptan esta parte de su teoría), las espiroquetas entablaron una relación de realimentación particularmente variada con sus células huésped. Se transformaron en flagelos y cilios, dando movilidad a las nuevas células nucleadas. También se transformaron en microtúbulos, estructuras fibrosas del interior de la célula que desempeñan diversas funciones, desde el acarreo de mensajes químicos y secreciones a través de la célula hasta la orquestación de la división de cromosomas en el núcleo. Margulis cree que en el curso de la evolución los microtúbulos de las células también evolucionaron para formar axones y dendritas, los extremos activos de las neuronas. La primitiva realimentación entre espiroquetas y células huésped puede haber conducido así al desarrollo del cerebro. Fue un destino irónico. Las espiroquetas son famosas por su rápida movilidad. En un sentido, el proceso que las transmutó en células cerebrales las obligó a sacrificar esta identidad y volverse sedentarias. Por otra parte mantienen su identidad anterior, pues, empacadas e inmóviles en nuestros cráneos, se convirtieron en instrumento de la red de realimentación más veloz de la historia del planeta. Ahora, en un centelleo de movimiento eléctrico, no se desplazan por el cieno primordial sino por los confines más remotos del espacio y del tiempo, siguiendo la relampagueante movilidad del pensamiento humano.

La realimentación simbiótica que dio a las células la capacidad para moverse, realizar la fotosíntesis y usar el oxígeno para "masticar" químicamente sus alimentos, condujo eventualmente a otros tipos de realimentación. Por ejemplo, el sexo. Margulis y Sagan dicen: "El sexo, como la simbiosis, es expresión de un fenómeno universal, el principio de mezclarse y congeniar. Dos organismos, sistemas u objetos bien desarrollados y adaptados se combinan, reaccionan, vuelven a desarrollarse, definirse, adaptarse, y surge algo nuevo".

Eventualmente las células de reproducción sexual creadas mediante la simbiosis se acoplaron y comenzaron a especializarse en la creación de nuevas funciones. Una célula nucleada con cilios puede haberse unido a una segunda célula, así liberando a los microtúbulos de esa célula para que se desarrollara en otros sentidos, por ejemplo, un aparato sensorial. La larga evolución de las plantas y animales multicelulares había comenzado.

Margulis llega a la conclusión de que, aunque nos consideremos seres autónomos, somos —desde el cerebro a los pies— una compilación de microbios eslabonados por cooperación simbiótica. De hecho, toda vida es una forma de cooperación, una expresión de la realimentación surgiendo del flujo del caos. Según este enfoque, el reino del Emperador Amarillo se construyó y preservó no sólo mediante combates mortales sino mediante una expansiva armonía.

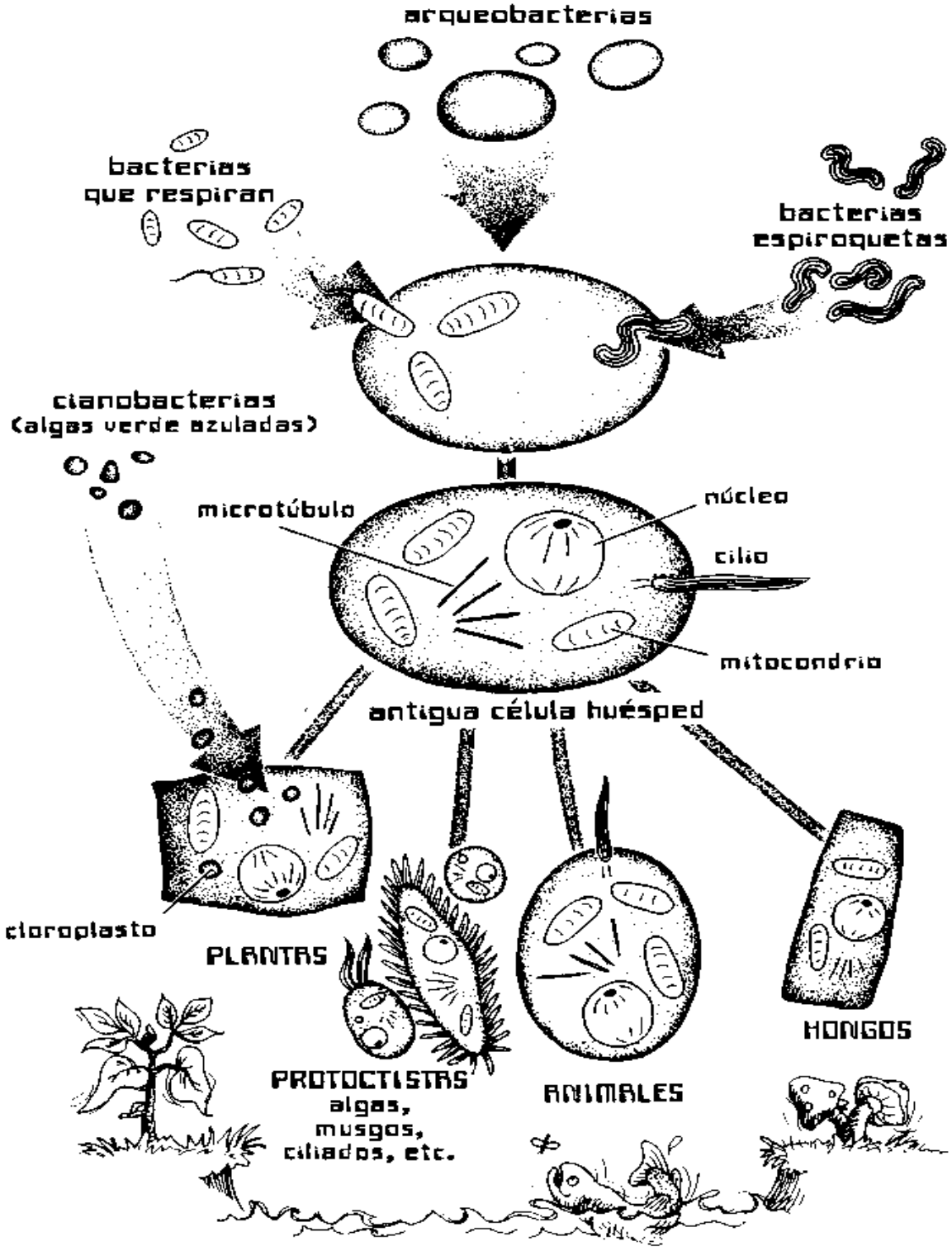


Figura 2.1. **Descripción de la evolución simbiótica que va desde las bacterias hasta los organismos multicelulares, según Margulis. Esta microbióloga afirma que evolucionamos como microbios cooperativos.**

Al mostrar convincentemente que la cooperación es un potente mecanismo para el cambio evolutivo, Margulis suma su voz a la creciente marea de teóricos que exigen una nueva perspectiva de la evolución. Aunque la teoría original de Darwin se puede interpretar de un modo que acepte la cooperación entre los organismos, el enfoque popular y científico de la evolución ha enfatizado por mucho tiempo lo contrario: que el equilibrio natural es el resultado de una intensa competencia entre organismos que conduce a la "supervivencia del más apto".

Pero un relativamente simple cambio de énfasis puede conducir a un drástico cambio en la visión del mundo. El filósofo Robert Augros y el físico George Stanciu han intentado presentar este cambio en una serie de argumentaciones y ejemplos de su libro *La nueva biología.*

Ejemplo: el modelo competitivo de la naturaleza predice que dos especies de animales similares deben luchar entre sí por los alimentos y el espacio disponibles. Pero la observación sugiere que dichas luchas son extremadamente raras. Por ejemplo, dos especies de cormoranes de Gran Bretaña han encontrado modos de cambiar la dieta y los nidos para no competir. Aunque ambas especies anidan de manera similar, una busca sus moradas en lo alto de los peñascos o en salientes anchas, mientras que la otra escoge salientes angostas y anida en sitios más bajos. En vez de competir, ambas especies han interactuado con el medio ambiente y entre sí para crear nichos diferentes.

Otro ejemplo: al parecer, la dominación dentro de las especies constituye un testimonio a favor del espíritu competitivo de la naturaleza. Los lobos, los toros, las aves, presuntamente todos tienen jerarquías de dominación. Sin embargo, esta estructura se puede mirar desde el polo opuesto, como un modo ingenioso de evitar competencias dañinas y conflictos. Las luchas de predominio entre los machos de una especie quedan resueltas en cuanto se decide cuál animal es más fuerte. Una vez que eso está claro, cesa la lucha. Este arreglo se puede encarar como un modo no competitivo sino cooperativo de evitar un conflicto donde el individuo más fuerte triunfaría de todos modos sobre el más débil, con daños probables para ambos.

Tercer ejemplo: la teoría darwiniana de la competencia entre especies descansa sobre el supuesto de que la población de una especie crece sin límites a menos que sea contenida por los implacables mecanismos de depredación y hambruna de la naturaleza. Darwin mismo utilizó "cálculos teóricos" para cimentar este supuesto, que él basaba en ejemplos de poblaciones de animales domésticos que se habían "vuelto salvajes" (como las poblaciones de conejos y lagartas comentadas en el Capítulo 3). Pero allí donde las especies surgen naturalmente, parecen enlazadas con el ambiente de tal modo que regulan sus cifras demográficas. Las poblaciones existen naturalmente en ciclos limitados. Los estudios acerca del ciervo de cola blanca, el ante, el bisonte, el alce, la oveja de cuernos largos, el íbice de Dalí, el hipopótamo, el león, el oso pardo, la foca arpa, el cachalote y muchas otras especies demuestran que las poblaciones alcanzan esta autorregulación bajando o elevando

la tasa de natalidad o la edad de primera reproducción, de acuerdo con la densidad de población. Cuando los científicos intentan desplazar a una especie de un territorio, la población permanece estable porque animales de territorios vecinos cubren la laguna (en la sección siguiente veremos cómo las neuronas cerebrales hacen algo similar). No es pues "la naturaleza de rojos dientes y garras" —según la célebre frase de Tennyson— la que mantiene las poblaciones dentro de ciertos límites, sino que aparentemente una población tiene un tamaño natural, tal como lo tiene un organismo individual. El tamaño de la población depende del modo en que está relacionado mediante la realimentación con el medio ambiente configurado por otras especies y recursos ecológicos. Esto tiene sentido porque las especies evolucionan realimentándose con un ambiente en evolución. A menos que interfieran los seres humanos, lo que mantiene una cifra demográfica es ante todo una realimentación regulatoria y no violenta.*

Aunque muchos científicos no aceptan el cambio de énfasis representado por el enfoque de la realimentación holística, hay un creciente afán de plantear una alternativa científica ante el darwinismo ortodoxo.

La nueva biología de Augros y Stanciu es uno de estos intentos. El famoso biólogo evolutivo Stephen Jay Gould ha hecho otro al apropiarse de algunas ideas del intelectual ruso Petr Kropotkin. Gould señala que Kropotkin interpretaba *El origen de las especies* de modo muy diferente al de los científicos europeos y norteamericanos. Kropotkin encontraba en Darwin pruebas de la cooperación en la naturaleza antes que de la competencia, una tesis que el ruso delineó en su libro *Socorro mutuo.* Kropotkin escribía: "Si nosotros ... preguntamos a la Naturaleza quiénes son los más aptos, si los que continuamente guerrean entre sí o los que se respaldan mutuamente, vemos de inmediato que los animales que adquieren hábitos de socorro mutuo son indudablemente los más aptos. Tienen más oportunidades de sobrevivir, y alcanzan, en sus clases respectivas, el mayor desarrollo de

* Darwin y Wallace llegaron al principio de que la competencia lleva a la supervivencia del más apto tras leer el ensayo de Thomas Malthus sobre la población. Malthus veía la competencia por la subsistencia como el medio que utilizaba la naturaleza para separar los débiles y perezosos de los industriosos y productivos entre los seres humanos. Bertrand Russell señaló que Darwin antropomorfizaba la naturaleza al usar la teoría económica *lais-sez-faire* de Malthus para describir la vida como si toda ella estuviera embarcada en una competencia implacable. ¿Es posible que esta extensión de Malthus haya conducido inadvertidamente a una seria distorsión de nuestra comprensión de la naturaleza, incluyendo, entre otras cosas, la naturaleza de nuestra propia violencia? Por ejemplo, ¿es posible que el impulso humano de exterminar otras especies, de luchar a muerte por el territorio o el sexo, de librar guerras con nuestra propia especie, sea menos el resultado de instintos animáis "naturales" que el de condicionamientos antinaturales provocados por la cultura humana? Si dejamos de lado la analogía (circular) de Darwin —la naturaleza es como el hombre, por tanto el hombre es como la naturaleza—, podemos estar en libertad para observar que los actos agresivos y aparentemente violentos de la depredación animal no son esencialmente espejos de la violencia humana. Un león que opera en la economía del hambre despacha a un antílope rápidamente, y hay mecanismos naturales que ponen a la presa del león en estado de shock, reduciendo el sufrimiento al mínimo. En cambio, la violencia humana que a menudo nos preocupa rara vez está dirigida a comer lo que mata y está impregnada de sufrimiento. Al contrario de la agresión animal, la agresión humana casi siempre está basada en el yo, un invento de la conciencia y la cultura humanas. Sean cuales fueren sus defectos, la nueva biología por cierto ha posibilitado cuestionar algunos supuestos antes incuestionables que acompañaban a la teoría de Darwin.

inteligencia y organización corporal". Gould enfatiza que Kropotkin desarrolló esta interpretación de Darwin después de varios viajes a Siberia y al norte de Manchuria, donde no observó una despiadada lucha por la existencia entre algunas especies de animales. Gould comenta: "Se podría argumentar que los ejemplos donde los animales se comportan como gladiadores se han planteado erróneamente como predominantes. Tal vez la cooperación y el socorro mutuo sean un resultado más común de la lucha por la existencia. Tal vez, en la mayoría de las circunstancias, la comunión tenga mayor éxito reproductivo que el combate".

Aun el reduccionista Heinz Pagels, el científico que tan mordazmente denunciaba a Prigogine, llegó a la conclusión de que la teoría darwiniana contiene una explicación limitada y tal vez muy fallida del orden que observamos en la biología.

En su libro *Sueños de la razón,* publicado en 1988 poco antes de su muerte, Pagels escribía que, desde Darwin, "hemos llegado a ver la selección natural, la elección de mutaciones raras y útiles a partir de miríadas de mutaciones inservibles, como única fuente del orden en los sistemas biológicos. ¿Pero es correcta esta perspectiva?" Pagels citaba modelos de computación de sistemas genómicos (de genes) diseñados por Stuart Kauffman de la Universidad de Pennsylvania. Dichos modelos sugieren, en palabras de Kauffman, que los sistemas genéticos complejos que interactúan entre sí "exhiben un orden mucho más *espontáneo* del que imaginábamos, un orden que la teoría evolutiva ha ignorado" (subrayado nuestro). Kauffman cree que esta nueva forma de principio ordenador de la evolución plantea un desafío para los científicos que tratan "de entender cómo dicho autoordenamiento interactúa con la selección natural, cómo la capacita, la guía y la restringe ... Los biólogos tienen muy en cuenta la selección natural, pero nunca se han preguntado cómo la selección interactúa con las propiedades colectivas autoordenadas de los sistemas complejos. Estamos entrando en territorio virgen".

El énfasis en la autoorganización y la evolución mediante la dependencia mutua desplaza los conceptos tradicionales de la evolución para acentuar el nuevo concepto de "coevolución". Hay ejemplos de coevolución por todas partes. Por ejemplo, la ancestral planta del maíz, el *teosinte,* comenzó como una hierba común en la meseta mexicana. Los humanos la seleccionaron y la cultivaron para obtener mazorcas cada vez más grandes. Ahora ya no se basta a sí misma pero necesita de dedos humanos que le arranquen los gruesos hollejos. Los humanos tampoco andarían muy bien sin el maíz, un alimento decisivo. En una danza de realimentación simbiótica, ambas especies coevolucionaron.

¿Podría la coevolución reemplazar a la evolución darwiniana como explicación primordial de los cambios naturales? Una vez más, los biólogos más ortodoxos se resistirían a semejante idea. Algunos de sus razonamientos se relacionarían con la creencia de que nuestro creciente conocimiento acerca de ese presunto ladrillo de la vida, la molécula de ADN, respalda una imagen de mutaciones desbrozadas mediante la competencia y transmitidas por

los genes. Pero aun aquí el enfoque de la realimentación coevolutiva está planteando un desafío.

La mayoría de los científicos evolutivos están convencidos de que el ADN es un plano o esquema determinista dentro de los individuos. El modo en que el código genético se expresa, por cierto, depende de rizos de realimentación entre el organismo en desarrollo y el medio ambiente, pero se supone que el código fija los límites. Por ejemplo, los investigadores afirman que los genes destinan a ciertas personas a ser obesas. Por mucho que respeten sus dietas, su predisposición genética las derrotará.

¿Qué significa decir que los genes son deterministas? Gail Reischaker, un filósofo de la ciencia que trabaja en colaboración con Margulis, señala que es común que los biólogos afirmen que los genes son el agente ordenador del organismo, pero que dicha afirmación es "totalmente infundada". Los cambios de los organismos pueden estar correlacionados con cambios genéticos, declara Fleischaker, pero eso sólo demuestra que los cambios genéticos pueden afectar o conmocionar la operación del sistema total del organismo. No demuestra que las estructuras genéticas *causen* o dirijan la operación del sistema. No se puede afirmar que ninguna molécula o tipo de molécula *determine* el orden del sistema.

Si los genes no son deterministas, no pueden ser la clave del cambio evolutivo. Esto está sugerido por un hecho curioso. Durante décadas los investigadores han bombardeado el ADN de moscas verdes con rayos X y otros tratamientos para causar mutaciones, produciendo toda clase de monstruosidades y variaciones. Pero ninguna de estas mutaciones ha bastado para crear una nueva especie de mosca. Dicho sea de paso, la opinión neodarwiniana de que la acumulación gradual de mutaciones y variaciones genéticas conduce eventualmente a una nueva especie no está respaldada por las pruebas. Como han señalado biólogos eminentes, tales como Gould, los esqueletos que hay en las rocas cuentan la historia de nuevas especies que surgen de pronto, aparentemente no como resultado de variaciones acumuladas. Augros y Stanciu argumentan que la variación (mutación en el ADN de una especie) no es "la fuente de cambio evolutivo que Darwin pensó que era. Su función consiste en permitir que la especie se adapte sin extinción ni evolución". Esto significa que las mutaciones acumuladas en un plano genético relativamente fijo no conducen por sí mismas a una especie nueva. Las especies nuevas surgen de otros procesos.

Otro tipo de prueba cuestiona además la imagen reduccionista del plano genético, sugiriendo que la analogía puede ser falsa. Los contratistas que construyen un centro de convenciones pueden respetar un plano que les indica cómo organizar sus materiales de construcción. Una vez que el edificio está levantado, el plano se puede utilizar para localizar cables, cañerías o soportes estructurales. ¿Pero qué ocurriría si el plano continuara cambiando como resultado de las variaciones meteorológicas?

Algo así ocurre en el ADN de nuestros cuerpos, según la genetista Barbara McClintock. La biógrafa de McClintock, la bióloga matemática Evelyn Fox Keller, piensa que los descubrimientos de McClintock

pueden constituir la base para "una revolución en el pensamiento biológico".

Trabajando con maíz, McClintock observó que los genes de los cromosomas se desplazan o "trasponen"; incluso parecen cambiar en relación con el estrés ambiental. McClintock propuso la idea, aparentemente estrafalaria, de que el programa genético no está necesariamente fijo en cada individuo. A fines de la década de 1970 otros genetistas hallaron lo que han denominado "genes saltarines" y confirmaron los hallazgos iniciales de McClintock. Sin embargo, Keller dice que a estas alturas la mayoría de los genetistas no entienden que estos genes que se trasponen implican una revolución, aunque algunos comienzan a advertir que existe una contradicción fundamental entre "las propiedades dinámicas del cromosoma que emergen ahora y la perspectiva estática [reduccionista] anterior". Keller escribe:

> ... aún nadie puede resolver esta contradicción. ¿Hay que repensar las relaciones internas del genoma, explorando modos en que la realimentación interna pueda generar cambio programático? ¿O hay que repensar la relación entre el genoma y su medio ambiente, explorando medios en que el ADN pueda responder a las influencias ambientales? ¿O hay que hacer ambas cosas?
>
> El aparato genético es incuestionablemente la garantía de la estabilidad básica de la información genética. Pero, también incuestionablemente, es un sistema más complejo de lo que se había pensado, con formas más complejas de realimentación. Tal vez el futuro demuestre que esta complejidad interna puede capacitarlo no sólo para programar el ciclo vital del organismo, con fidelidad a las generaciones pasadas y futuras, sino también para reprogramarse cuando esté expuesto a suficiente tensión ambiental, efectuando pues una especie de "aprendizaje" a partir de la experiencia del organismo. Dicha imagen sería de veras radical.

Al parecer esta imagen radical se está desarrollando. En 1988 John Cairns y sus colegas de la Escuela de Salud Pública de Harvard mostraron que, al cultivar en un medio lactoso bacterias que carecían de una enzima para metabolizar lactosa, algunas sufrían una mutación que luego las capacitaba para producir esa enzima. Esta mutación violaba un dogma central de la biología molecular, según el cual la información de la célula fluye en una sola dirección: de los genes al ARN, a la proteína y a la enzima. Aquí la información circulaba a la inversa. Una enzima codificada por un gene particular recurría a la realimentación para alterar ese gene.

Así, en muchos niveles, el código ADN parece menos un plano que un exquisito centro de relés de realimentación que equilibra la aptitud de la realimentación negativa para mantener la estabilidad con la aptitud de la realimentación positiva para amplificar el cambio. La realimentación del ADN, habitante del límite entre el orden y el caos, está acoplada con otra realimentación dentro y fuera del organismo individual, un ejemplo del proceso cooperativo y coevolutivo que sostiene y transforma la vida en este planeta.

Para James Lovelock, un científico británico, ex colaborador de Lynn Margulis, el planeta mismo es una forma de vida creada por esta

realimentación interconectada. Lovelock ha llevado la noción de realimentación y coevolución a alturas vertiginosas. Según su hipótesis de Gea, las especies de la Tierra —aproximadamente 4 mil millones— están coevolutivamente coordinadas de tal modo que nuestro planeta mismo es una estructura autopoiética, lo que Lewis Thomas denomina una gigantesca "célula única".

Lovelock es un estudioso independiente de la atmósfera y el inventor del dispositivo para capturar electrones que recogió los datos sobre los cuales Rachel Carson basó su éxito de venta *Primavera silenciosa,* un libro ambientalista.

En la década de 1970 la NASA pidió a Lovelock que diseñara un modo de detectar vida en Marte. El científico británico propuso que se buscaran pruebas biológicas en la composición atmosférica marciana, pero primero necesitaba estudiar un planeta donde supiera que la vida dejaba rastros: la Tierra. Este estudio lo llevó a ciertos hallazgos notables.

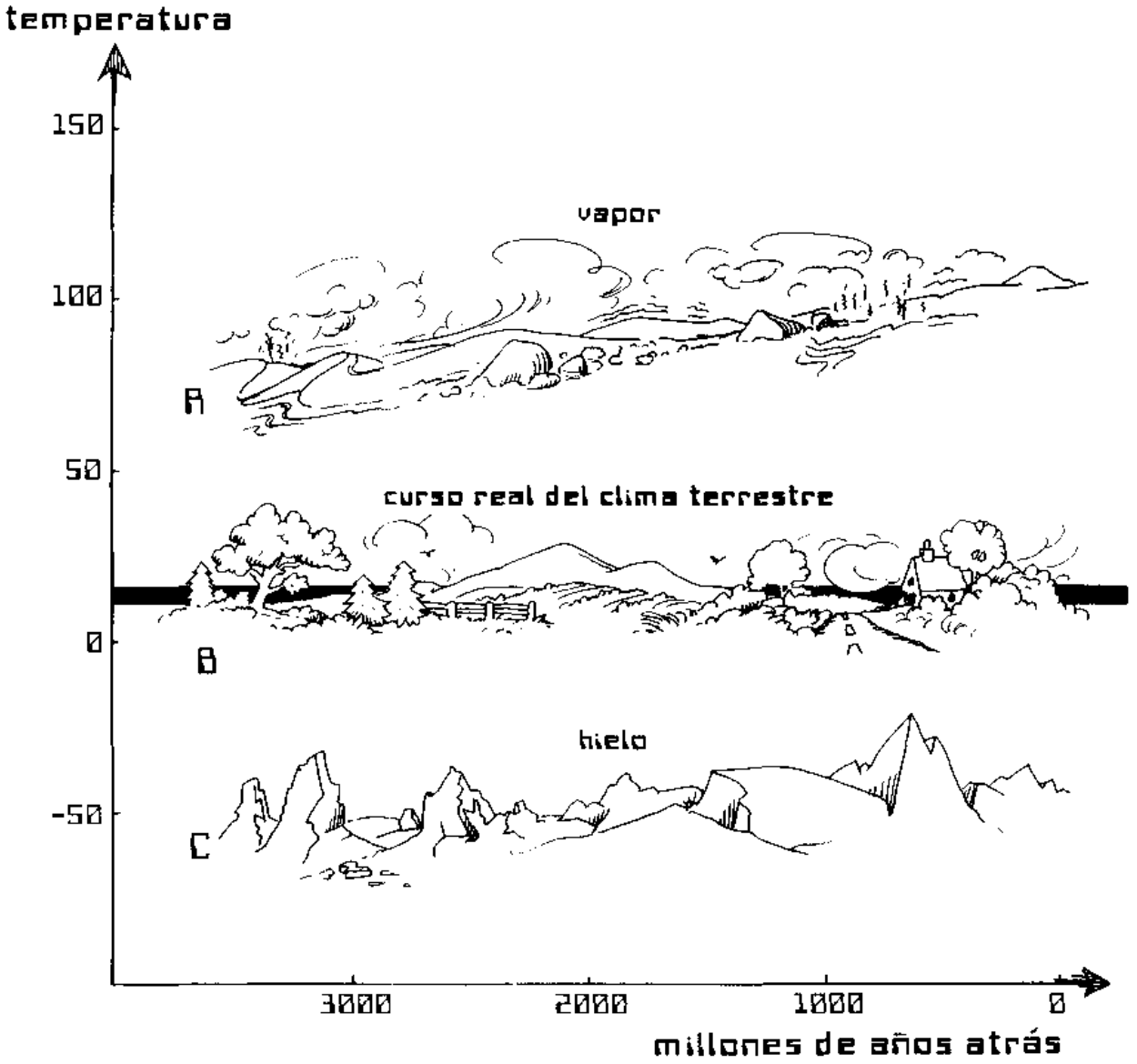
Por lo pronto, Lovelock quedó sorprendido por la inusitada composición de los gases que componen nuestra atmósfera. Un ejemplo es la presencia simultánea del metano y del oxígeno. En circunstancias normales, estos dos gases reaccionan para producir bióxido de carbono y agua. Lovelock calculó que para sostener la cantidad de metano que está regularmente presente en nuestra atmósfera, 1.000 millones de toneladas de ese gas deben ascender anualmente al aire. Por lo menos dos veces esa cantidad de oxígeno se debe reemplazar para compensar la reacción de oxidación del metano. Indagando más, halló que el bióxido de carbono era diez veces más del que sería si se permitiera que los gases atmosféricos estuvieran en equilibrio. El azufre, el amoníaco y el cloruro de metilo están presentes en grandes cantidades por encima del equilibrio. Lo mismo ocurre con el porcentaje de sal en el mar. Millones de toneladas de sal se vuelcan cada año en los océanos de la Tierra, pero la concentración salina permanece estable. El químico británico llegó a la conclusión de que el "persistente estado de desequilibrio" del planeta era "clara prueba de la actividad de la vida". Descubrió que la atmósfera marciana, en cambio, se encuentra en estado de equilibrio. Por tanto, predijo acertadamente que nuestras sondas Viking no encontrarían rastros de vida.

Tras concebir esta conexión entre la vida y el desequilibrio de la atmósfera terrestre, Lovelock continuó sus estudios y aprendió otro dato raro. En los 4.000 millones de años transcurridos desde que la vida apareció en la Tierra, la temperatura del Sol ha aumentado al menos 30 por ciento, indicando una temperatura media por debajo del punto de congelación en la Tierra primitiva. No obstante, los registros fósiles no indican la existencia de condiciones tan adversas. Este y otros datos llevaron a Lovelock a la conclusión de que la atmósfera terrestre, desde los comienzos, estuvo manipulada o regulada por la vida día tras día.

Lovelock postula que los instrumentos para esta regulación son múltiples y han coevolucionado con el tiempo. En un artículo para la revista científica *Nature* habla de uno de los reguladores de realimentación negativa del planeta.

El plancton oceánico emite un gas

Figura 2.2. **Las líneas A y C describen los dos destinos equilibrados de la Tierra. A es una atmósfera semejante a la de Venus: el calor del Sol está atrapado y el planeta es caliente, vaporoso e intolerable para la vida. C habría dado a la Tierra una atmósfera similar a la de Marte: las sustancias químicas como el oxígeno habrían reaccionado entre sí y se habrían eslabonado; la atmósfera no habría retenido los gases atmosféricos y la superficie se habría enfriado. Aunque el clima hubiera seguido un curso intermedio, B, la vida habría desaparecido a causa de la más fría condición de nuestro más débil sol antiguo. La situación real fue que la vida se las ingenió para crear la temperatura requerida para su propia supervivencia. La temperatura del dibujo está en grados centígrados.**



sulfuroso a la atmósfera. Una reacción química transforma el gas en partículas flotantes alrededor de las cuales se condensa el agua, montando el escenario para la formación de nubes. Luego las nubes reflejan en el espacio una luz solar que de otra manera habría llegado a la superficie de la Tierra. Sin embargo, si la temperatura desciende demasiado, el frío reduce la cantidad de plancton, no se forman tantas nubes y asciende la temperatura. El plancton opera como un termostato para mantener la temperatura terrestre dentro de cierto nivel.

Lovelock cree que un sinfín de mecanismos biológicos de esta clase son responsables de la "homeostasis" o estado estable del planeta. Así como nuestro ADN, temperatura, nivel hormonal, metabolismo y las muchas funciones de nuestros cuerpos son equilibradas por una serie entrelazada de rizos de realimentación positiva y negativa, la vida en la Tierra está equilibrada mediante realimentación. El organismo planetario, la célula única de la Tierra, permanece viable mediante la constante transformación de los elementos de su propia estructura interna.

Pero el planeta Tierra no es sólo un organismo homeostático, sino también un organismo en evolución. La atmósfera terrestre no sólo ha permanecido apta para la vida, sino que ha cambiado permitiendo la evolución continua de nuevas formas de vida.

En una onda solitón, las correlaciones no lineales de los rizos de realimentación positiva y negativa están equilibradas con exactitud, de tal modo que la onda permanece inalterada mientras se desplaza por el espacio. En los acoplamientos de realimentación de la Tierra, la realimentación positiva a veces impulsa el sistema hacia un régimen nuevo para que acontezca la evolución. Un ejemplo de un momento en que la realimentación positiva creó un nuevo régimen fue la crisis de contaminación por oxígeno causada por la actividad continua de las cianobacterias. La acumulación tóxica de oxígeno en el aire pudo haber destruido la vida, incluidas las cianobacterias mismas, pero en cambio propició la evolución. Lovelock declara: "Cuando el oxígeno impregnó el aire hace dos mil millones de años, la biosfera era como la dotación de un submarino averiado, y se necesitaban todas las manos para reconstruir los sistemas dañados o destruidos y al mismo tiempo amenazados por una creciente concentración de gases venenosos en el aire. El ingenio triunfó y se superó el peligro, no al estilo humano, mediante la restauración del viejo orden, sino ... mediante la adaptación al cambio y la conversión de un intruso asesino en un amigo poderoso". Se había alcanzado un punto de bifurcación, y el organismo Tierra "escapó", en palabras de Prigogine, "hacia una forma más elevada del orden" desarrollando una forma de vida que consumiera oxígeno.

Usando el antiguo nombre griego de la diosa Tierra, Lovelock denominó Gea a su teoría acerca de este organismo viviente, evolutivo, autorregulador y autoorganizativo.

A principios de la década de 1970 la comunidad científica recibió con sorna la teoría de Gea, la de Margulis, la de McClintock y las ideas relacionadas con la realimentación en general. Aunque Margulis teme que estará muerta antes que su teoría de

la simbiosis goce de total aceptación, obviamente se ha desplazado desde los bordes hacia el centro.

Lovelock también ha conquistado cierta desganada aceptación. Su idea de que la vida crea las condiciones para su propia existencia era radical. Hasta su llegada, los científicos creían que la vida era un mero pasajero en el planeta, que por azar tenía el ámbito atinado para la evolución biológica. Pero recientemente sus ideas se han tomado tan en serio que inspiran conferencias internacionales y artículos en las revistas científicas. Y en 1983 McClintock recibió el premio Nobel gracias a sus investigaciones.

Lovelock, Margulis y Mcclintock son figuras importantes en una vanguardia que está desviando la atención científica del tradicional tema del "análisis de partes" para dirigirla hacia temas nuevos como la "cooperación" y "el movimiento de la totalidad".

Por cierto el enfoque de ellos no es toda la historia —tal vez nada sea toda la historia— pero el drástico cambio de perspectiva abre nuevas y estimulantes visiones acerca del modo en que se mueve el universo que nos rodea.

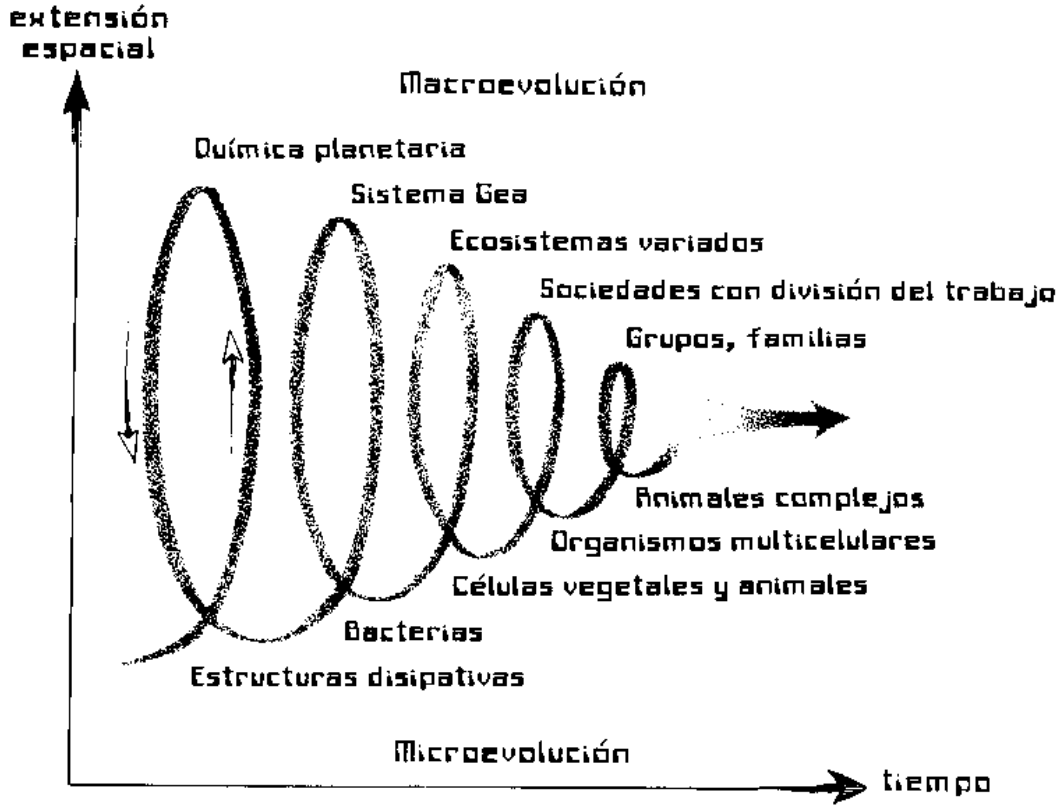
El científico de sistemas Erich Jantsch, por ejemplo, sugería que el trabajo de Prigogine, Margulis y Lovelock implica una escala cósmica de la coevolución en la naturaleza. Como hemos señalado, la evolución se refiere a las influencias interactivas que acontecieron entre el maíz y los seres humanos o los mitocondrios y el organismo huésped. Pero Jantsch proponía una evolución más abarcadora donde las escalas "micro" y "macro", como él las llama, evolucionan juntas. La atmósfera evoluciona mediante las bacterias, las bacterias evolucionan mediante la atmósfera. La coevolución acopla la gran escala y la pequeña escala en un ciclo de causalidad mutua que no tiene fisuras.

La idea de Jantsch es poco habitual porque se opone a la vieja creencia científica de que la naturaleza evoluciona de lo pequeño a lo grande, de lo simple a lo complejo. La coevolución de las escalas micro y macro es una idea fractal donde tanto las escalas grandes como las pequeñas surgen como aspectos de un sistema totalmente interconectado.

Otro concepto inspirado por la realimentación plantea interrogantes acerca de nuestra definición del individuo. Parece ser que cuanto mayor es la autonomía de un organismo, más rizos de realimentación se requieren tanto dentro del sistema como en su relación con el medio ambiente. Esta es la paradoja autopoiética. La paradoja implica que, en cierto sentido, el individuo es una ilusión. Margulis dice: "En realidad el individuo es algo abstracto, una categoría, una concepción. Y la naturaleza tiene una tendencia a evolucionar que trasciende toda categoría o concepción estrecha". ¿Podría el descubrimiento de que la individualidad es en sus raíces una empresa cooperativa llevarnos hacia una nueva clase de holismo, un holismo que resolverá el aparente conflicto entre libertad individual y necesidad colectiva?

No es sorprendente que las teorías de Margulis y Lovelock, con su énfasis en la cooperación universal como rasgo de la evolución, hayan sido adoptadas por el movimiento New Age, los ambientalistas, los "verdes" europeos y otros. Pero los dos científicos tienen actitudes muy diferentes ante esta adulación

Figura 2.3. **El difunto Erich Jantsch dijo en *The Self-Organizing Universe:* "La historia de la vida en la Tierra expresa la coevolución de macro y microsistemas autoorganizativos en grados cada vez mayores de diferenciación". Aquí vemos una espiral de coevolución donde cambios en pequeña escala crean cambios en gran escala y viceversa. Cada giro de la espiral conduce hacia una mayor autonomía tanto en el nivel individual como en el colectivo. Sin embargo, esta mayor autonomía también significa una interdependencia mayor y más compleja. Esta es la paradoja autopoiética. En el dibujo de arriba una simple espiral fluye entre las escalas, pero la idea de Jantsch es esencialmente frac tal. La coevolución está llena de orden caótico donde los cambios de gran y pequeña escala se reflejan recíprocamente, saltando de un nivel al otro, generando un movimiento evolutivo imprevisible pero totalmente interconectado.**



popular. Lovelock dice con entusiasmo: "Tal vez Gea sea la primera religión que contenga una teoría científica verificable". Margulis se queja: "Las connotaciones religiosas de Gea me dan náuseas".

Sin embargo, las connotaciones resultan difíciles de eludir. La palabra *religión* proviene etimológicamente de raíces que significan "ligar", y ni siquiera Margulis puede evitar una implicación casi religiosa en este sentido, con su mensaje y con su lógica de la cooperación biológica. Por ejemplo, ella y Sagan describen experimentos donde microbios encerrados en cajas y puestos bajo la luz se vuelven más estables como conjunto cuando hay más especies y mayor complejidad de interacción. Si la complejidad entre estructuras autopoiéticas puede conducir a la estabilidad del todo, ello implica que al salvar a otras especies de nuestra

codiciosa interferencia nos estamos salvando a nosotros mismos. Margulis declara abiertamente que para sobrevivir a la crisis ecológica y social que hemos causado quizá tengamos que iniciar empresas cooperativas drásticamente nuevas. Tal vez incluso tengamos que buscar una unidad que anteriormente sólo era imaginada por las religiones.

Se puede sugerir que con el advenimiento de la especie humana la paradoja autopoiética creó una nueva vuelta en la espiral de la coevolución planetaria. Las bacterias acopladas en nuestros cuerpos y cerebros nos han transformado en individuos independientes, autónomos. Pero en este momento, inmersos en el caótico flujo que hemos causado, tal vez lleguemos a advertir que para continuar siendo los individuos en que nos hemos convertido debemos acoplarnos en escala mundial, entre nosotros y con el medio ambiente. A su manera, las bacterias que enfrentaron la crisis del oxígeno "comprendieron" lo mismo: cooperación o muerte. Pero esta vez, si ocurriera, la cooperación global tendría una dimensión adicional, pues sería consciente de sí misma a través de miles de millones de cerebros humanos autónomos. Es muy adecuado que esos cerebros sean las sublimes creaciones de la realimentación y el caos, y día a día evoquen cómo surgieron de primitivas reacciones autocatalíticas y cooperativas que burbujeaban lejos del equilibrio.

EL CEREBRO NO LINEAL

Ilya Prigogine dice enfáticamente: "Es bien sabido que el corazón tiene que ser regular, de lo contrario morimos. Pero el cerebro tiene que ser irregular; de lo contrario tenemos epilepsia. Esto muestra que la irregularidad, el caos, conduce a sistemas complejos. No se trata de desorden. Por el contrario, yo diría que el caos posibilita la vida y la inteligencia. El cerebro ha sido seleccionado para volverse tan inestable que el menor efecto puede conducir a la formación de orden". En otras palabras, el cerebro es el producto no lineal de una evolución no lineal en un planeta no lineal.

En 1987 un artículo de *Scientific American* sintetizaba las actuales investigaciones neurofisiológicas sobre la memoria informando que los neurocientíficos han indagado sendas de memoria visual a través de seis zonas cerebrales (zona sensorial, amígdala, hipocampo, diencéfalo, corteza prefrontal, prosencéfalo basal) con rizos de realimentación interconectados. Se trata de un esquema en gran escala de la clase de no linealidad que existe en muchas escalas en todo el cerebro. Los rizos aumentan la posibilidad de que se produzca bifurcación y la amplificación de algún dato recibido. ¿Pero es el cerebro, como arguye Prigogine, una criatura del caos, una sopa alejada del equilibrio que hierve en la despareja llama de la vida cotidiana?

Varios investigadores han acumulado pruebas experimentales de que el cerebro es un dispositivo de realimentación no lineal, y varios teóricos de la neurofisiología ahora compiten por el honor de describir una imagen general del funcionamiento de la no linealidad cerebral.

Comenzaremos con los experimentalistas. Como en otras áreas *de* la ciencia del caos y el cambio, los experimentos incluyen

hoy matemáticas y modelos.

Los investigadores Don Walter y Alan Garfinkel de UCLA diseñaron ecuaciones que representan los patrones de activación de las neuronas. El enlace de tres neuronas en un modelo generó pruebas de un caos neural de bajo nivel con un orden implícito. Walter ha dicho que el modelo —*y* la actividad cerebral que representa— es imprevisible en los detalles, "pero tiene *tendencias".*

El modo en que esta activación neural caótica se transforma en orden está indicado por la investigación realizada en cerebros reales por Walter Freeman y Christine Skarda de la Universidad de California en Berkeley. Los dos científicos implantaron hasta sesenta y cuatro electrodos finos en los bulbos olfatorios de varios conejos y monitorizaron los patrones *de* las ondas cerebrales cuando los conejos olieron varias moléculas de diversos aromas. Los investigadores descubrieron que, cuando se detectaba un olor, el caos de bajo nivel de esta parte olfativa del cerebro se autoorganizaba momentáneamente, es decir, la activación de todos los bulbos de neuronas individuales se acoplaba de modo colectivo. El sistema tenía el aspecto de un ciclo límite, con un patrón de ciclo límite diferente para cada aroma. Si el conejo captaba un aroma que nunca había olido, el bulbo soltaba borbotones de actividad caótica. Si el nuevo olor aparecía varias veces, los borbotones se transformaban en un patrón ondulatorio característico.

Tal vez el olor familiar se encastre en el patrón fractal del caos de bajo nivel del bulbo, donde queda disponible para ser "invocado" mediante un acoplamiento de realimentación neuronal. En estos experimentos, el ciclo del "reconocimiento" de olores familiares era una onda momentáneamente organizada, como al arrojar una piedra a un estanque. Aquí el estanque era el habitual e hirviente caos de la activación neuronal del conejo. Alcanzar el orden manifestado por este ciclo límite momentáneo es, por cierto, el propósito del cerebro. Pero, como señaló Prigogine, si el orden cerebral se vuelve demasiado regular durante demasiado tiempo, hay problemas.

Roy King, un neurocientífico de la Universidad de Stanford, ha esbozado el problema investigando conexiones entre un neurotransmisor llamado dopamina y síntomas esquizofrénicos tales como las alucinaciones y los trastornos del pensamiento. Se sabía que las drogas que bloquean la dopamina reducían estos síntomas, pero los científicos no han podido hallar claras anormalidades en los niveles de dopamina de los pacientes esquizofrénicos.

King y sus colegas de Stanford insertaron los datos conocidos acerca de la actividad de la dopamina en un modelo matemático y lo probaron en un ordenador. El modelo sugiere que la clave de la esquizofrenia es la velocidad a la cual se libera dopamina en el cerebro. En cierto nivel crítico de dopamina, la velocidad de activación neuronal se divide en dos ritmos, y el resultado es un rizo de realimentación desquiciado. King describe este estado cerebral como semejante a un pliegue en la catástrofe cúspide de Thom. Pensemos en él como una púa de tocadiscos saltando sobre una rayadura. La zona cerebral en cuestión no puede ingresar en sus ciclos límites normales sino que insiste en patinar catastróficamente entre dos ciclos límites diferentes. La víctima de esquizofrenia adolece de un exceso de orden —orden encarcelado— que

paradójicamente se manifiesta, en el ataque de epilepsia, como un ataque masivo del caos.

En el caso de la epilepsia, una pequeña perturbación en los patrones de activación de algunas células cerebrales causa una bifurcación. Las células oscilan en una frecuencia y luego una segunda frecuencia se une a ellas; después la primera frecuencia se interrumpe. Este patrón se repite, creando "ondas móviles y rotativas" que son esencialmente iguales a las ondas espiraladas de la reacción Belousov-Zhabotinsky. ¿La conclusión? Para el cerebro, el caos es totalmente normal, pero el caos inducido por un exceso de orden es devastador. Uno recuerda el verso de Wallace Stevens: "Un orden violento es desorden".

Una de las claves del delicado equilibrio cerebral entre orden y caos involucra una técnica de computación relativamente nueva que permite a los científicos analizar con mayor detalle los oscilantes gráficos de los electroencefalogramas (EEG). Algunos investigadores usan estas técnicas para buscar atractores extraños. A. Babloyantz, de la Universidad Libre de Bruselas, notó que estos complejos gráficos tenían mucho en común con los fractales y decidió medir las dimensiones fractales de atractores extraños producidos por el cerebro durante los niveles de sueño.

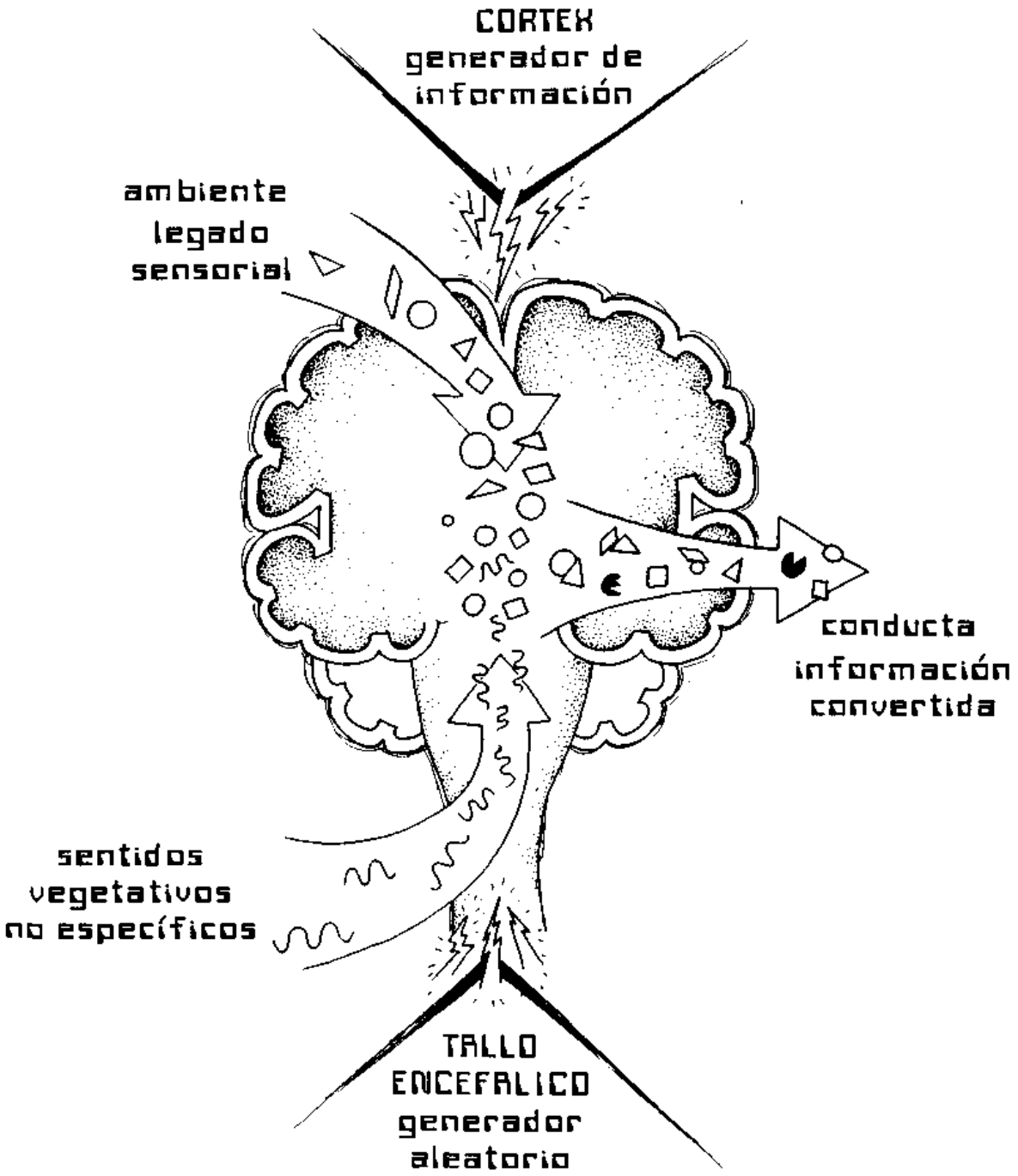
En el cerebro despierto, la actividad caótica de las activaciones neuronales está en un nivel bajo. Pero a medida que el cerebro se hunde más en el sueño, el caos se vuelve más pronunciado. Sin embargo, en los niveles de movimiento ocular rápido (REM), cuando se produce el soñar, la cantidad de caos de fondo decrece. Babloyantz cree que la dimensión fractal de los atractores extraños del cerebro podría brindar una medida de la profundidad de diversas etapas del sueño.

En una investigación similar, científicos del Centro de Estudios No Lineales de Los Alamos han deducido las dimensiones fractales de atractores extraños asociados con diversos niveles de anestesia. El grupo también piensa que será posible desarrollar un análisis informático de lecturas EEG para caracterizar diversos tipos de dolencia. Otros científicos desean explorar las ondas cerebrales complejas para buscar indicios fractales de pensamientos de alto nivel y aun de creatividad.

¿Podría la expresión general del cerebro, la personalidad, ser también un atractor extraño? Un psiquiatra de la Universidad de California en San Diego arguye que cada quien posee una identidad única que está escrita en todo lo que hacemos. Arnold Mandell afirma que ha estudiado patrones individuales tal como se reflejan en la velocidad de activación de los receptores de dopamina, los receptores de serotonina y las células simples en la actividad EEG y en la oscilación de la conducta, y que ha hallado una autosimilitud fractal entre todos estos indicadores.

La frontera del cerebro es un vasto territorio y los exploradores apenas empiezan a internarse en esa comarca agreste. Los modelos cerebrales alternan en popularidad con tanta frecuencia como las estrellas de rock y es probable que dentro de cien años los actuales mapas del paisaje neurofisiológico resulten tan extravagantes como los mapas del Nuevo Mundo dibujados en el siglo dieciséis. Pero un mapa tiene que empezar en alguna parte y entre los cartógrafos hay un creciente número de científicos que intentan dibujar la

Figura 2.4


CORTEX
generador de
información
ambiente
legado
sensorial
conducta
información
convertida
sentidos
vegetativos
no específicos
TALLO
ENCEFALICO
generador
aleatorio

gran figura con un perfil no lineal.

Uno de estos investigadores es Matti Bergström del Instituto de Fisiología de la Universidad de Helsinki, Finlandia. Durante muchos años Bergström ha trabajado en lo que él denomina el modelo cerebral de "generador bipolar". El modelo divide el cerebro en un extremo de "información" y uno de "azar" o caos, y Bergström dice que la interacción entre ambos aspectos genera el pensamiento y la conducta.

Cuando se estimula la retina u otro órgano sensorial, arguye Bergström, los datos que ingresan siguen dos direcciones. Una de ellas atraviesa el córtex o corteza, que está organizado para convertir el estímulo en atractores de ciclo límite, es decir, en una forma organizada de información.

Los datos también atraviesan el "generador aleatorio". Este extremo está localizado en el tallo encefálico y el sistema límbico; recibe datos de los órganos sensoriales y las actividades vegetativas —incluidos los sistemas que controlan la digestión y el pulso cardíaco— y los aglutina. El ingreso de datos en el generador aleatorio es "no específico": carece de estructura, o al menos su estructura es tan compleja que no contiene información que se pueda decodificar. Bergström dice que experimentamos la existencia del extremo aleatorio durante esos primeros momentos en que despertamos por la mañana, antes de saber dónde estamos y quiénes somos.

Por un instante no tenemos información, sólo "ser". Nuestra existencia y nuestra actividad cerebral son "no específicas". Luego el generador de información entra en acción y recordamos todo.

Según Bergström, cuando el campo de actividad eléctrica del generador aleatorio encuentra los patrones producidos por el generador de información, el resultado es una "nube de posibilidades" de ciclo límite que ha sido perturbada y reordenada mediante interferencia caótica. La nube de posibilidades contiene pues "mutaciones" de la información y estas mutaciones se enfrentan con las formas habituales de información en una suerte de lucha darwiniana por la supervivencia. En ese momento, las señales más fuertes dentro de la totalidad de señales que compiten en el cerebro se unen y sobreviven. Los datos que egresan de este conflicto forman una corriente de pensamiento y conducta eslabonada por realimentación.

Los científicos de sistemas William Gray y Paul LaViolette describen un cerebro no lineal con otro enfoque. Sugieren que el pensamiento arranca en un complejo y aun caótico nudo de sensaciones, matices y "tonos de sentimiento" que se desplazan en ciclos desde el sistema límbico a través del córtex. Durante este ciclo de realimentación, el córtex selecciona, o "abstrae", algunos de estos tonos de sentimiento. Estas abstracciones se reinsertan luego en el rizo. El continuo proceso de abstracción tiene el efecto de amplificar no linealmente algunos matices y plasmarlos en cogniciones o emociones que organizan complejos nudos de sensaciones y sentimientos llenos de matices.

"Los pensamientos son estereotipos o simplificaciones de los tonos de sentimiento", dice LaViolette. "Son como caricaturas de la realidad." De acuerdo con este modelo, los pensamientos/emociones abstraídos se asocian entre sí para crear más vastas estructuras de pensamientos/emociones abstraídos, que se vuelven "organizativamente cerrados". La cerrazón organizativa

significa que la riqueza de matices está sintetizada (simplificada) por pensamientos/emociones que tienen un aire de clausura. La mayor parte de nuestras opiniones y conocimientos son organizativamente cerradas. Hemos dejado de prestar mucha atención a los muchos tonos de sentimiento asociados con las cosas en que pensamos o los matices de nuestros gustos y rechazos emocionales. Pero debajo de cada pensamiento o simple emoción yacen capas de sensación y sentimiento que continúan sus ciclos en los rizos de realimentación del cerebro. Como estos matices continúan sus ciclos, queda la posibilidad de que una situación caótica o altamente cargada cause la abstracción y amplificación de otro matiz, que se transformará en pensamiento organizador. A través de este proceso los pensamientos y respuestas emocionales organizativamente cerrados a veces pueden cambiar.

El modo en que se almacenan y se recobran los recuerdos es un importante tópico de investigación y especulación para los científicos que trabajan en el concepto del cerebro no lineal. Hace varios años el célebre neurofisiólogo Karl Pribram intentó resolver el problema del almacenamiento de los recuerdos sugiriendo que el cerebro es un holograma. Los experimentos y la observación clínica indicaban que los recuerdos de largo plazo permanecen, aun después de la destrucción de grandes porciones del cerebro. En uno de estos experimentos, el neurocientífico Karl Lashley adiestró ratas para que corrieran por un laberinto y luego les extirpó quirúrgicamente diversas partes del cerebro buscando una sede de almacenamiento de la memoria. Nunca la encontró.

Las investigaciones actuales revelan que el órgano cerebral llamado hipocampo, del tamaño de una nuez, produce profundos cambios en la memoria y afecta la capacidad para retener recuerdos de largo plazo. Sin embargo, no hay que confundir el hipocampo con la *sede* de la memoria, aunque esté relacionado con su recuperación y almacenamiento. Según la teoría de Pribram la sede de la memoria no está localizada, sino difundida en todo el cerebro.

Pribram sugiere que el cerebro convierte la información sensorial en ondas. Estas ondas crean patrones de interferencia que se pueden almacenar en sinapsis nerviosas o en un "espacio de fases" por todo el cerebro. Así se almacena la información en un holograma, mediante el patrón de interferencia formado cuando las ondas láser se unen en la placa holográfica. En un holograma se puede recuperar la imagen proyectando un láser de la misma longitud de onda a través de la placa. También se puede recobrar la imagen entera cuando se proyecta un láser a través de un fragmento de la placa, aunque en este caso la imagen es más borrosa. Según Pribram, esto es análogo a la capacidad del cerebro para recobrar información aun cuando se han extirpado grandes fragmentos de la corteza donde estaba almacenada la información. Pribram sugiere que el cerebro recupera un recuerdo cuando lo atraviesa una onda similar a la que almacenó holográficamente.

Aunque los experimentos han identificado algunas células del sistema visual que responden holográficamente a las frecuencias espaciales, los neurocientíficos no han podido confirmar el mecanismo

ondulatorio holográfico de Pribram para el almacenamiento de memoria. Sin embargo, aunque la teoría de Pribram no se ha aceptado, es posible que la imagen del cerebro como holograma, en cuanto metáfora, haya contribuido a volcar a los neurocientíficos hacia un enfoque más holístico del enigma de la memoria. También es posible que el nuevo holismo de realimentación no lineal reviva —desde un nuevo ángulo— la idea de Pribram acerca del espacio de fases.

Freeman y Skarda informan que en sus experimentos, cuando el conejo inhala un olor familiar, el bulbo olfatorio reacciona con un ciclo límite donde "cada región local cobra una amplitud de oscilación que está determinada por el todo. *Cada región local transmite el todo* con un grado de resolución determinada por su tamaño relativo respecto del tamaño del bulbo" (la cursiva es nuestra). La "memoria" de ciclo límite correspondiente a un olor particular puede estar almacenada en el caos de bajo nivel, o patrón fractal, de todo el bulbo. Está almacenada allí holográficamente, por así decirlo, porque cada región local del bulbo contiene la totalidad del ciclo límite codificado en cada una de las oscilaciones de la región local.

Cada vez se acepta más que la vieja teoría de que los recuerdos estaban almacenados en las neuronas individuales es incorrecta. Los recuerdos deben surgir como relaciones dentro de la red neural, una suerte de espacio de fases de recuerdos.

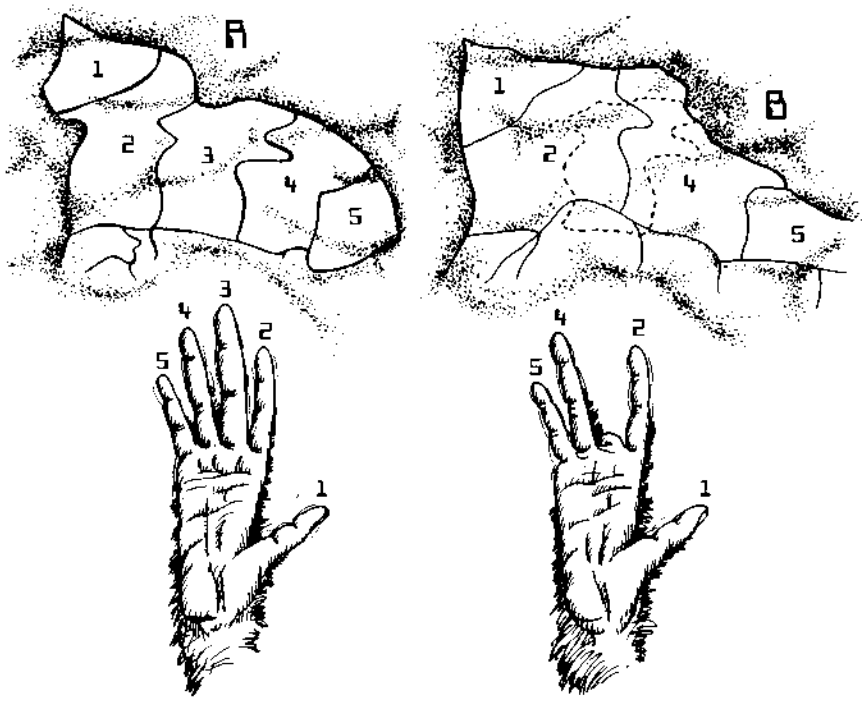
Michael Merzenich de la Universidad de California en San Francisco ha estudiado cerebros de monos mediante la implantación de electrodos. Señala que hay una considerable variación individual, de un mono al otro, en la localidad del cerebro donde se encuentra la actividad eléctrica correlacionada con el movimiento de la mano del mono. En cada mono estos mapas de los lugares de los dedos también cambian con el tiempo. Esto significa que las "sedes" cerebrales correspondientes a los dedos no están asociadas con neuronas particulares sino que existen como un patrón fluido de relaciones. Ello significa que la memoria para efectuar el movimiento de un dedo no está situada en la sinapsis de determinada neurona sino distribuida en una red cambiante.

Merzenich descubrió que cuando se daña o amputa el índice de un mono las zonas de actividad eléctrica correspondientes a los otros dedos se desplazan para llenar la laguna. El desplazamiento de las áreas de actividad se corresponde con que el mono aprende a compensar su incapacidad mediante el uso de los otros dedos. Cabe esperar que los experimentadores también hayan compensado al mono por su pérdida.

Si el cerebro funciona mediante el almacenamiento de la información y las funciones en redes de relaciones entre las neuronas en vez de mediante el almacenamiento de información en determinadas neuronas "sabias" u otras estructuras "duras", aunque se destruya una parte de la red el resto puede conservar la información "holográficamente".

Los científicos que trabajan en inteligencia artificial han añadido peso a esta idea. Una red informática llamada NetTalk imita las redes neurales del cerebro y ha aprendido a pronunciar palabras inglesas. La red consiste en 300 "neuronas" de

Figura 2.5. **La zona del cerebro que corresponde al dedo fallante del mono es cubierta por las zonas correspondientes a los demás dedos. Los científicos están aprendiendo que la información está almacenada en el contexto de las relaciones entre neuronas, no asentada en una neurona o un sitio particular del cerebro.**



ordenador unidas en 1.800 articulaciones que tienen controles de volumen que elevan o reducen la fuerza de la señal que las atraviesa. Inicialmente los controles de volumen se fijan al azar, pero tras enfrentar una lista de palabras y un plan de aprendizaje mediante ensayo y error, la red se autoorganiza, mejorando cada vez más su pronunciación. Aunque la red no cuenta con reglas para saber cómo se pronuncian ciertas letras en contextos diferentes, comienza a desarrollar y codificar dichas reglas implícitamente (u holográficamente) a través de la red. Los científicos saben que las redes están distribuidas porque pueden extraer una "semilla" de 10 "neuronas" escogidas al azar de la red y reproducir todo el sistema de codificación. También pueden dañar la red mediante la ablación o extirpación de varias "neuronas"; el resultado es que la red pierde precisión en su desempeño, pero aún conserva la capacidad para pronunciar palabras inglesas.

El funcionamiento de NetTalk es obviamente muy distinto del funcionamiento de los ordenadores en general. En un ordenador impulsado por un programa, todo el sistema falla si extraemos algunos circuitos. Cuando los científicos del cerebro descubrieron que la extracción de partes del cerebro no destruye un recuerdo, tuvieron que buscar explicaciones más extrañas acerca del modo en que el cerebro codifica la información. Algunos científicos creen que la conducta de redes informáticas como NetTalk puede brindar claves de la organización holográfica u holística de las redes neurales de los cerebros reales.

¿Cómo se forman las redes neurales en los cerebros reales? El premio Nobel Gerald Edelmari, investigador de la Universidad Rockefeller en Nueva York, aborda este interrogante con una teoría que poco a poco gana aceptación. Su teoría comienza internándose en los procesos que ante todo forman el cerebro.

Es obvio que no hay genes suficientes para gobernar la ubicación de las 10^{14} conexiones sinápticas del cerebro. Edelman razona que la ubicación de las neuronas en el cerebro de un embrión no está preprogramada por el gene. Hace unos años Edelman y sus colegas descubrieron moléculas de "adhesión" que guían las fibras nerviosas en su crecimiento aleatorio. A través de la realimentación, estas moléculas hacen que las fibras migratorias se acoplen o autoorganicen, formando columnas de pequeños grupos neuronales interconectados. La organización exacta de las sinapsis dentro de cada una de estas columnas neuronales, y entre las columnas, es única en cada caso; no hay dos que estén enlazadas de la misma manera.

Según la teoría de Edelman, la realimentación entre el cerebro y un estímulo entrante "selecciona" ciertos cúmulos de estos grupos de columnas como la respuesta cerebral a dicho estímulo. Aquí "selección" significa que al principio muchos de los grupos neuronales responden al estímulo, pero que al cabo algunas conexiones dentro de los grupos, y entre los grupos, son fortalecidas por el estímulo mientras que otras se extinguen.

Para demostrarlo, el equipo de Edelman construyó una simulación informática de una red de neuronas conectadas al azar. La estimulación de esta red hizo que algunas neuronas desarrollaran espontáneamente rizos de realimentación positivos y formaran cúmulos de células fuertemente conectadas. En el modelo, las células que no reciben estímulo conjunto o no poseen conexiones suficientes no se unen a los cúmulos.

En un cerebro verdadero como el del mono, la realimentación entre la red o grupo de neuronas y el medio ambiente es continua. Esto sugiere que la información involucrada en experimentar una sensación o realizar un movimiento, por ejemplo, puede hoy estar encastrada en un conjunto particular de relaciones neuronales pero mañana se puede haber desplazado ligeramente y estar encastrada en otro conjunto de relaciones. Si aplicáramos las ideas de Edelman a la memoria, podrían explicar por qué es más fácil recordar dónde dejamos la billetera que reconstruir el contexto de nuestros pensamientos y movimientos. Un recuerdo, como una sensación, no es un fragmento aislado; es un patrón de relaciones. El modelo de Edelman también podría explicar por qué nuestro recuerdo de un acontecimiento pasado se transforma con el tiempo. El recuerdo flota en un ondulante mar de relaciones que cambian continua aunque sutilmente.

El enfoque no lineal del cerebro ha tenido un impacto en el esfuerzo que los científicos de computación de todo el mundo están realizando para crear una "inteligencia artificial" (IA) en las probetas de sus microchips.

El psicólogo J. Z. Young piensa que el modelo cerebral de Edelman ofrece la mejor esperanza para

inventar una "máquina selectiva" que desarrolle sus conexiones y su jerarquía mediante una interacción con el medio ambiente y no mediante la programación. Young sugiere que dicho dispositivo, "durante su larga vida, podría adquirir gradualmente la experiencia necesaria para generalizar acerca de las propiedades del mundo y, en consecuencia ... dar indicios de esperanzas y creencias acerca del futuro".

Actualmente se ponen a prueba muchos esquemas en la investigación de IA, y el modelo cerebral de Edelman sigue el mismo rumbo general que la popular estrategia "conexionista". Los conexionistas sostienen que los circuitos de los ordenadores deben estar conectados como neuronas mediante articulaciones de células de microchips (sinapsis). Los programas no deben ser un conjunto lógico de instrucciones para producir resultados previsibles, sino limitarse a ser instrucciones para variar la fuerza de las conexiones entre procesadores, alentando así a la máquina a formar redes no lineales. Según la teoría conexionista, si se satisfacen todas estas condiciones la realimentación no lineal generada en la máquina por los problemas humanos hará que el ordenador sufra tales bifurcaciones y amplificaciones que la inteligencia se autoorganizará.

Las redes construidas para verificar las ideas conexionistas han sido relativamente simples. Cada transistor que representa una neurona de la red responde al *input* de otros transistores encendiéndose o apagándose, o bien amplificando o reduciendo una señal. La "suma" del *input* que reciba el transistor decidirá cuál de estas acciones ocurrirá. Hasta ahora, un ordenador construido con redes neurales ha exhibido memoria asociativa, que es la capacidad para recobrar un conjunto de datos desperdigados acerca de un tema aunque la pregunta inicial esté fragmentada o sea parcialmente incorrecta. (Recordar que una persona que conocimos en la universidad usaba gafas y luego recordar otros datos acerca de esa persona constituye un ejemplo de memoria asociativa.) Otro ejemplo de red neural informática es NetTalk, con su capacidad para aprender a pronunciar el inglés por sí misma.

Aunque los ordenadores digitales potentes también realizan las tareas que hasta ahora han realizado las redes neurales, las redes neurales las realizan con mayor celeridad. Las redes neurales son promisorias, pero por ahora son sólo formas rudimentarias de la elevada dinámica del cerebro viviente. Freeman y Skarda critican a los conexionistas partiendo de sus propios hallazgos sobre los recuerdos en el bulbo olfatorio. Dicen que allí la memoria no depende sólo de la interconexión de las neuronas sino de un trasfondo de caos. El patrón caótico al que regresaba el bulbo olfatorio después de cada olor reconocido no era el mismo. El caos del cerebro, pues, vuelve muy improbables las redes conexionistas precisas. Freeman afirma que el caos es lo que "establece la diferencia, en la supervivencia, entre una criatura con cerebro en el mundo real y un robot que no puede funcionar fuera de un ambiente controlado". El conexionismo se aleja de la lógica digital de los ordenadores, pero Freeman y Skarda parecen preguntarse si se aleja lo suficiente.

Aún está por verse si la ruta conexionista hacia la IA puede

triunfar. No obstante, es significativo que ahora los científicos cifren sus esperanzas en los aspectos no reduccionistas de la complejidad para resolver el problema de crear una máquina capaz de pensar. Sin duda la ciencia ha recorrido un largo camino desde esos días en que se creía que los aspectos previsibles y racionales de las máquinas eran la imagen del universo.

FUTUROS NO LINEALES

Muchas de las cosas que hemos comentado en este capítulo admitirían el encabezamiento general de "la realidad según una perspectiva de sistemas". La teoría de los sistemas no es tan gris ni mecánica como suena. Por el contrario, puede ser muy vivida. Una clave de los sistemas es la realimentación no lineal y, como hemos visto, la realimentación no lineal puede transformar la actividad más simple en la compleja efervescencia de una exhibición de fuegos artificiales.

El enfoque de sistemas ha cobrado la forma de muchas especies de teorías que han evolucionado a lo largo de los años: la teoría general de sistemas impulsada por el difunto Ludwig von Bertalanffy; la tradición cibernética iniciada por Norbert Wiener; la tradición servomecanicista o de ingeniería, representada por Jay Forrester, teórico de sistemas del MIT.

En sus diversas formas e híbridos, la idea de los sistemas se ha infiltrado virtualmente en todas las disciplinas. Han surgido departamentos de sistemas en las universidades de todo el mundo. Futurólogos como Alvin Toffler, John Naisbitt, Hazel Henderson y Marilyn Ferguson proclaman que la perspectiva de los sistemas es la ola del futuro. El economista y premio Nobel Herbert Simón anunció en 1978 que había abandonado la teoría económica tradicional para convertirse a la teoría de la información y los sistemas. Sin embargo, a pesar del entusiasmo, el enfoque de sistemas es todavía una ciencia joven que aún tiene que demostrar que es algo más que un modo nuevo y sagaz de mirar las cosas.

Encima del escritorio de Peter Senge, en la Escuela Sloan del MIT, cuelga un dibujo de su hijita. Es un remolino de líneas espasmódicas, un retrato del caos, en el cual la niña escribió con letra de preescolar: 'Tapa trabajando". El caos y la incertidumbre por cierto forman parte del trabajo que Senge realiza en el Grupo de Dinámica de Sistemas. Senge forma parte de una nueva raza de científicos sociales y puede servirnos como ejemplo de la clase de enfoque que están adoptando los teóricos de sistemas. Como otros teóricos de sistemas, está ansioso por explicar cómo funciona su perspectiva.

La idea de la "dinámica de sistemas" comenzó con el ingeniero Jay Forrester, un colega de Senge que en la década de 1950 trabajaba en la invención de la memoria central del ordenador. Forrester se interesó en la aplicación de los conceptos de la ingeniería de sistemas a las complejidades de la ciencias sociales, y adoptó el ordenador como flamante herramienta.

Desde la fundación del Grupo de Dinámica de Sistemas, Forrester y sus colegas han enseñado a diversas empresas y entidades municipales a abordar los problemas administrativos a través de modelos no lineales.

En la cabeza tenemos un sinfín de modelos que representan el funcionamiento de las cosas. Un modelo: "Si el coche empieza a

patinar, volver las ruedas en la dirección hacia donde patina". Otro modelo: "La letra con sangre entra". Algunos modelos involucran realimentación pero en general no la realimentación positiva propia de la no linealidad. En negocios y economía, los modelos teóricos usados para la planificación han sido tradicionalmente lineales: "Si aumentamos la cantidad de vendedores, aumentaremos la cantidad de ventas", o 'Tomemos la tasa de crecimiento de los últimos cinco años y proyectémosla para los próximos cinco años después de hacer las compensaciones por merma de población".

Pero los modelos lineales son poco confiables para las predicciones, que constituyen su función habitual. Los pronósticos no funcionan. La población de pronto empieza a crecer o se muda a otra parte del país y empieza a comprar menos un producto a causa de una razón imprevista, como la crisis del combustible. Los intentos de hacer predicciones sufren un destino caótico. Las predicciones fracasan porque los modelos no pueden tener en cuenta la interacción total de los elementos de un sistema dinámico sensible.

La respuesta de Dinámica de Sistemas a este dilema de los modelos consistió en volver no lineal la esencia de un modelo y a restar énfasis a la predicción.

Los modelos no lineales difieren de los lineales en diversos sentidos. En vez de tratar de deducir todas las cadenas de causalidad, el experto busca nodulos donde se unen los rizos de realimentación y procura capturar la mayor cantidad posible de rizos importantes en la "imagen" del sistema. En vez de diseñar el modelo para que haga un pronóstico de acontecimientos futuros o para que ejerza un control central, el experto no lineal se contenta con perturbar el modelo, verificando diversas variables para aprender acerca de los puntos críticos del sistema y su homeostasis (resistencia al cambio). El experto no procura controlar el sistema complejo mediante la cuantificación y el dominio de la causalidad; quiere agudizar sus "intuiciones" acerca del funcionamiento del sistema para interactuar con él más armoniosamente.

El desarrollo del modelo de sistemas ejemplifica el desplazamiento efectuado por la ciencia del caos y del orden, desde el reduccionismo cuantitativo hacia la apreciación holística y cualitativa de la dinámica.

¿Cómo se hace un modelo cualitativo? Cuando trabajan con organizaciones complejas tales como las empresas, los expertos de Dinámica de Sistemas tratan de identificar los conceptos escritos y mentales que la gente de una organización utiliza durante su labor, las normas y políticas de la organización, la conducta real de la gente en ese ámbito, la estructura organizativa, su propósito, y datos numéricos tales como cuántas personas trabajan y cuándo trabajan. El objetivo consiste en ver qué clase de rizos forman estos elementos.

"Al principio los clientes son escépticos", dice Senge. '"No se puede elaborar un modelo de esto; esto no es sólo un sistema de variables duras. Estamos hablando de la innovación, de las pasiones humanas, de muchas cosas sutiles que no se pueden representar en un modelo.' Al principio son cínicos, pero al cabo de un tiempo

se entusiasman. Ven que se puede hacer un modelo de la psicología y la sutil dinámica de una organización. Descubren que si uno puede hablar claramente acerca de algo, habitualmente se puede realizar un modelo, así que se entusiasman con los modelos de dinámicas sutiles cuya importancia todos conocen."

La maraña de rizos de realimentación es a menudo de gran complejidad, pero el ordenador puede manejar eso. Se asignan ecuaciones no lineales a los rizos para indicar el alud de acontecimientos que se producen a medida que los valores se incrementan ("ganancias de rizo") o disminuyen.

Lo que se excluye deliberadamente del modelo son los datos "históricos" o de "serie temporal" usados por los expertos lineales para computar los ascensos y descensos experimentados por las tendencias pasadas de la organización. El experto no lineal usa los datos de serie temporal no para construir el modelo sino para revisarlo. Al examinar el modelo en el ordenador, el experto puede verificar cuánto se acerca la conducta de su imagen de la realimentación organizativa a la conducta histórica de la organización real.

Una de las ventajas que se atribuye a los buenos modelos es que se pueden modificar los valores en diferentes rizos, proyectar la simulación en el ordenador y ver qué ocurre. Se puede intentar un cambio de política, observar el efecto que la adición o recorte de personal tiene en el sistema; se pueden cambiar experimentalmente las relaciones entre diversos elementos, incluso calibrar el posible resultado de una diferencia en la moral o la actitud de los empleados.

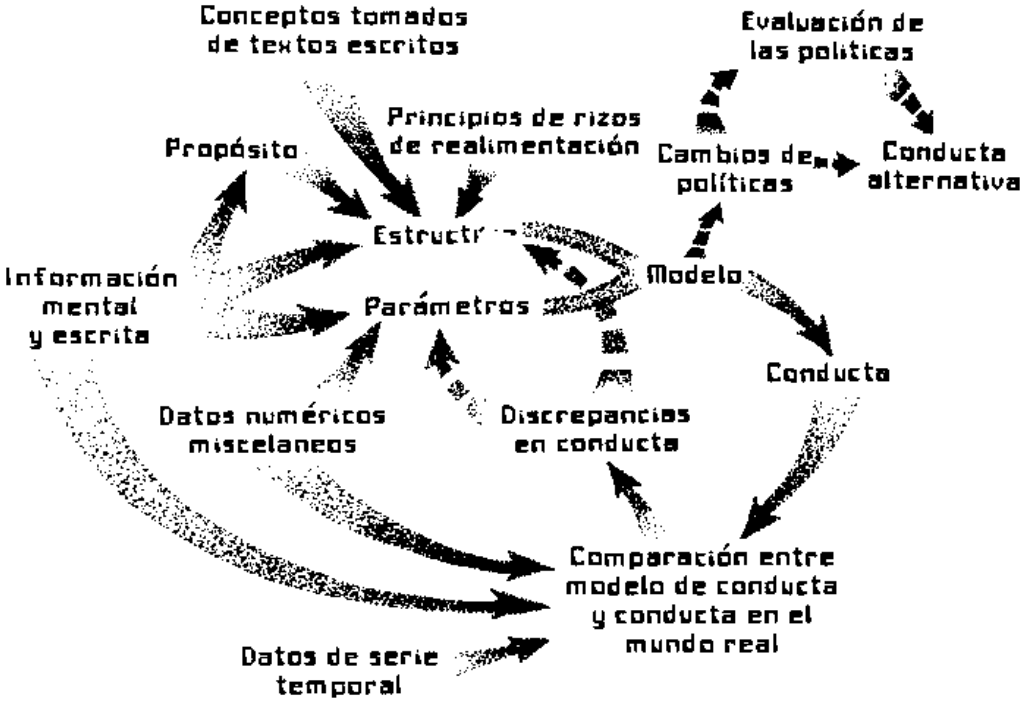


Figura 2.6. **Una imagen del proceso de creación de un modelo de realimentación no lineal es en sí misma un proceso de realimentación no lineal.**

Como para la mente humana resulta difícil visualizar poco más de unos pocos rizos, el ordenador es indispensable para este proceso.

Mediante el estudio de formas complejas y variadas de los sistemas, los teóricos de sistemas han desarrollado una larga lista de principios. He aquí unos pocos, resumidos por Peter Büttner, ejecutivo de la Boise Cascade Lumber Company y ex alumno de Senge en el MIT:

- Para cambiar un sistema para siempre hay que cambiar su estructura.
- En todo sistema dado hay muy pocos "puntos de influencia" donde uno puede intervenir para producir cambios significativos y perdurables en la conducta general del sistema.
- Cuanto más complejo sea el sistema, más alejados estarán la causa y el efecto entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo.
- A los pocos rizos de realimentación se vuelve difícil predecir la conducta de un sistema.
- Ni los puntos de influencia ni el modo correcto de influir para obtener los resultados deseados suelen ser obvios.
- "Peor en vez de mejor" es a menudo el resultado de un cambio "atinado" en una política influyente; por tanto, todo cambio de políticas que produzca resultados mejores de inmediato debe causar suspicacia.

En las dos últimas décadas han surgido muchos modelos en gran escala que siguen la inspiración del Grupo de Dinámica de sistemas. Estos modelos de sistemas de realimentación suelen tener escasos elementos y son bastante sencillos, dados sus alcances. Tal vez el más conocido sea la simulación desarrollada en la década de 1970 por ese grupo de economistas, expertos en demografía y otros investigadores que se llaman a sí mismos el Club de Roma. Directamente inspirado por Forrester, el grupo desarrolló un modelo global que incluye relaciones de realimentación entre elementos de la población mundial, recursos, producción de alimentos, producción industrial y polución.

Tal vez habría bastado el sentido común para llegar a la principal conclusión extraída de las simulaciones: una economía mundial basada en el crecimiento continuo de todos los sectores, o aun de algunos sectores, está condenada a un eventual fracaso. El modelo no constituía la predicción de un colapso en un momento determinado, un dato que en general se ha interpretado mal. Simplemente demostraba gráficamente que por mucho que se manipularan las variables, el supuesto del crecimiento llevaría al fin a un desastre global.

La razón es que todos los sistemas del mundo están acoplados en rizos de realimentación y los recursos son limitados. Recordemos el añadido no lineal de Verhulst a la ecuación de crecimiento exponencial y el súbito descenso que provocaba en la población de gusanos de Alicia.

Una de las expertas del Club de Roma, Donella Meadows, señala que el acoplamiento no lineal de factores económicos conduce a la ineludible conclusión de que "ninguna parte de la raza humana está separada de otros seres humanos ni del ecosistema global. Todos nos levantamos o caemos juntos".

Hazel Henderson cree que la

mentalidad de crecimiento ilimitado que ha dominado las economías del mundo es el resultado del enfoque lineal de los economistas ante un mundo no lineal.

¿Cuál es la solución a los dilemas no lineales que ya han comenzado a afectar nuestro estándar de vida? Muchos teóricos de sistemas aconsejan que aprendamos la lección que nos han dado los mitocondrios y las espiroquetas: aprendamos un nuevo modo de cooperación.

Algunos expertos en sistemas creen que esa cooperación ya puede estar aflorando en un innovador organismo social que ha florecido en nuestra sociedad: las redes.

Las redes siempre han existido de alguna manera, como medio para que las personas se comuniquen entre sí fuera de las jerarquías habituales. Pero el nuevo organismo de las redes es conciente y está impulsado por la realimentación. Su repentina evolución parece surgir de la creciente comprensión de que en nuestro complejo mundo no funcionan las viejas jerarquías sociales ni las estructuras reduccionistas de control.

Senge dice que en la mayoría de las organizaciones hay una suerte de juego en que los "subalternos fingen que son controlados y los superiores fingen que controlan". Pero la irrelevancia de la jerarquía se manifiesta abruptamente cuando un avión se estrella porque un perno de dos dólares funcionó mal. La persona que manufacturó el perno estaba en la escala inferior de la jerarquía de las personas que construyeron el avión, pero pudo derrumbar la jerarquía.

La comprensión de que las jerarquías son insensatas o ilusorias ha contribuido a alimentar la expansión de las redes, que muchos comentaristas sociales como Naisbítt, Toffler y Henderson consideran la forma del futuro. En su reciente libro *Medrando en el caos,* el asesor administrativo Tom Peters dice a los gerentes que en los fluctuantes mercados mundiales de hoy el único modo de florecer es "amar el caos" mediante la creación de un ámbito jerárquico no lineal dentro de la compañía. Peter predica que hay que involucrar a todos en todo para fomentar los hallazgos creativos. Su libro anterior, *En busca de la excelencia,* popularizó el concepto de la administración como red: "administrar deambulando". Los éxitos económicos del Japón también ofrecen convincentes ejemplos de una administración eficaz que alienta los sistemas de realimentación no jerárquica entre los obreros.

Han surgido redes globales extremadamente efectivas, no vinculadas con ningún país ni jerarquía social. Amnesty International, Greenpeace y la Coalición de Científicos Preocupados son ejemplos. El Partido Verde europeo se considera una red no jerárquica y se rige por el lema "actúa localmente, piensa globalmente", que es la consigna de muchas redes. Marilyn Ferguson ha dicho que las redes son "la conspiración de Acuario". Robert Theobald, economista y fundador de una red para "emprendedores sociales", dice que el "enlace y las redes serán el modo primario y reconocido de hacer las cosas en el futuro".

William Ellis, fundador de TRANET, una red de tecnología adecuada/alternativa, es aun más

visionario: "Podemos imaginar un futuro gobierno mundial como una red o redes multidimensionales que brindarán a cada individuo muchos caminos opcionales para que él pueda buscar su propio bienestar y participar en el control de los asuntos mundiales".

Ellis describe TRANET como una estructura "compuesta de lazos entre nodulos. No tiene centro. Cada miembro de la red es autónomo. Al contrario de una jerarquía, ninguna parte depende de ninguna otra. Diversos miembros se reúnen para tratar proyectos especiales o diversas cuestiones, pero ninguna burocracia exige acción ni conformidad".

Jeffrey Stamps, coautor de una guía para redes, define las nuevas redes como "telarañas de libre participación". Así, la flora cooperativa que evoluciona y se propaga adaptándose a la atmósfera mundial actual parece tener autonomía en el nivel de las "células" individuales (los miembros de la red).

Al igual que las bacterias a las que el oxígeno acumulado en la atmósfera obligó a formar empresas cooperativas, las redes parecen nacer en una atmósfera o contaminación planetaria de información.

Algunas redes se forman principalmente para intercambiar información entre personas con intereses comunes. Otras están expresamente diseñadas para crear la clase de flujo informativo que causa bifurcaciones y formas nuevas.

Roy Fairfield es un inveterado entusiasta de las redes y uno de los fundadores de la Union Graduate School, un experimento en redes de graduados iniciado a fines de la década de 1960. Aunque totalmente calificada, esta universidad no tiene campus ni biblioteca y ofrece a distantes alumnos un núcleo de docentes graduados hábiles para establecer conexiones con otros estudiantes y mantener la efervescencia de las ideas. Fairfield vuela de un punto al otro del país para reunirse con estudiantes, y también se comunica mediante una constante y voluminosa corriente de cartas, haiku, recortes, sugerencias de lectura y alusiones a otros estudiantes que podrían tener ideas relevantes. Dice: "No hago exigencias a cambio de lo que se comparte". Su visión de la educación es que las redes generarán algo creativo. Ve las redes como un modo de mantener un sustrato caótico de bajo nivel para que el caos —como en el cerebro— genere de cuando en cuando una estructura intelectual autoorganizativa.

Evidentemente, las buenas redes requieren trabajo duro y dedicación a la fe de que algo resultará de esta sinuosa y no lineal actividad. Los organismos de redes han perecido por centenares por falta de uso, y parecen ser entidades delicadas y transitorias. Tal vez el acoplamiento de realimentación de estas criaturas sea demasiado débil o flojo. Q tal vez una vida fugaz sea el destino natural de una red, que así permite que sus miembros pasen a otras redes. También es posible que aún no hayamos desarrollado esta especie cooperativa en su forma más viable. ¿Cómo pueden tales estructuras volverse autopoiéticas? Sin duda, todavía hay mucho que aprender acerca del orden complejo no jerárquico.

Senge, por lo pronto, cree que apenas estamos comenzando a comprender cómo manipular tamaña complejidad en un nivel social. Dice que cuando enseña a la gente a diseñar sistemas comienza con "un

grado de complejidad que esté dentro de los límites de la capacidad conciente" y luego asciende por la complejidad hasta que las personas aprehenden vagamente el todo sin advertirlo. Cree que aprender a manipular la complejidad significa aprender a vivir más intuitivamente, porque la intuición es la clave para realizar cambios significativos en los sistemas complejos, ayudarlos a evolucionar y evolucionar con ellos"

En el nivel más profundo de la dinámica de sistemas intentamos cultivar un singular sentido intuitivo/racional del momento en que nos acercamos al aspecto crítico de un sistema. A veces uno lo siente, sabe cuánto está llegando cerca de un punto de influencia. Rara vez se relaciona con los síntomas en que se concentra la mayoría de la gente, porque en un sistema la causa y el efecto rara vez están estrechamente relacionados en el tiempo y el espacio".

Cree que la gente debe zambullirse en la complejidad para liberar su visión. Uno desea cambiar el sistema para que exprese nuestra singular perspectiva de las cosas. Pero el problema es que no podemos hacerlo mecánicamente porque nuestra singular perspectiva no es un objeto reductible sino una sensación, un matiz. Para llegar a la visión, el sistema se debe abordar como una sutil totalidad. La tarea, según la describe Senge, no es fácil para las mentes entrenadas en el reduccionismo. Dice que mucha gente tiene una actitud increíblemente pasiva ante las organizaciones. "Tratamos de enseñar a la gente la perspectiva de sistemas y parte de ello consiste en asimilar la aptitud para crecer a partir de la incertidumbre reconocida. Uno siempre está en una modalidad experimental. Creo que es enormemente poderoso. Libera el lado visionario de las cosas. También libera el intelecto. En educación, permite que la gente opere en una modalidad de aprendizaje y no de pasividad, lo cual la vuelve mucho más eficaz intelectualmente".

Sin embargo, admite que, aunque a menudo las personas se enriquecen gracias a la dinámica de sistemas, no siempre se apegan al proceso. "Tal vez, a pesar de su enriquecimiento, creen que en algún momento obtendrán una reducción, un modelo que ellos podrán cambiar mecánicamente. Al cabo de un tiempo ven que el proceso de modelos, el proceso intuitivo, no tiene fin, y se desalientan. La naturaleza de lo que hacemos no congenia con sus supuestos sobre una solución reduccionista".

Tal vez adaptar nuestra mente a la sutil complejidad holística sea difícil porque hemos intentado, como dice Prigogine, escapar del tiempo con predicciones. Es un axioma de la teoría del caos que no hay atajos para aprender el destino de un sistema complejo; no tenemos un reloj de él en "tiempo real". El futuro sólo está revelado en el despliegue momento por momento del presente. Al enfrentar la limitación —la imposibilidad— de las predicciones, podemos regresar al tiempo real tomándolo como el linde entre el orden y el caos, entre lo conocido y lo desconocido, como la hondura de los mundos-espejo.

Capítulo 1

El Libro del Emperador Amarillo *dice:*

. . . La raíz del cielo y la tierra.
Continúa sin cesar, algo que casi existe;
úsala, nunca se agota.

PARADOJAS NO LINEALES EN LO PEQUEÑO

Es un lugar extraño. Para vivir en la profundidad de los mundos-espejo hay que convivir con paradojas, como lo señalan Ilya Prigogine y David Bohm.

Un científico piensa que la raíz del universo está en el caos; para el otro, en la raíz está el orden (orden de "grado infinito", lo llama Bohm, dando a entender que ve el caos como una muy sutil forma del orden). Ambos científicos concuerdan en la importancia de la no linealidad para sus nuevas concepciones de la realidad, pero ninguno de ambos concuerda en el rumbo de esta no linealidad. Significativamente, el principal punto de desacuerdo es el cuanto, el reino que para muchos constituye el nivel fundamental de la realidad.

A través de este libro hemos visto la profunda significación de la no linealidad en la naturaleza. Mientras la linealidad dominaba la física del siglo diecinueve, hoy los sistemas lineales parecen ser casi la excepción. La primera gran revolución científica del siglo veinte —la teoría de la relatividad— es firmemente no lineal. El borrón extraño en esta imagen cada vez más precisa de la no linealidad universal es la teoría cuántica. La matemática de la teoría cuántica es lineal. De hecho, lo que a veces se denomina la "extrañeza cuántica" de la teoría se aglutina alrededor de sus rasgos lineales.

La paradoja esencial de la linealidad cuántica radica en lo que se llama el "problema de la medición cuántica". Consiste en esto: las soluciones dadas por una teoría lineal, como la teoría cuántica, son todas igualmente buenas desde un punto de vista matemático; en verdad, nada puede impedir a un científico sumar soluciones en diversos modos para formar aun más soluciones. La solución a cualquier problema de la teoría cuántica siempre debe estar dada, pues, en términos de combinaciones lineales de diversas soluciones, combinaciones de diversos resultados.

Sin embargo, en todo experimento

cuántico siempre hay un resultado *definido.* Un contador Geiger emite chasquidos, una partícula deja un rastro en una placa fotográfica; estos son acontecimientos definidos y singulares. ¿Pero cómo surgen resultados singulares de una teoría que se especializa en todas las combinaciones lineales posibles de los resultados? He allí la extrañeza cuántica.

El físico Edwin Schrödinger ilustró esta paradoja de modo muy gráfico. Imaginó un experimento donde el "detector" del pasaje de una partícula cuántica no es un contador Geiger sino un gato que está dentro de una caja que tiene una cápsula de cianuro y un dispositivo activador aleatorio con una probabilidad 50:50 de activarse cuando un isótopo radiactivo emite un electrón. Si el electrón choca contra el mecanismo de activación en modalidad de "encendido", rompe la cápsula de cianuro y mata al gato. (Apresurémonos a añadir que Schrodinger jamás planeó realizar este experimento con un gato real; se trata sólo de una extravagante ejemplificación de la curiosa propiedad lineal de la teoría cuántica.)

Para comprender plenamente la extrañeza de la teoría cuántica, necesitamos ver cómo operaría este dispositivo en términos clásicos de gran escala. Para ello, reemplazaremos el activador cuántico (el dispositivo aleatorio y la partícula emitida) por su equivalente no cuántico, la ruleta y la bola. Cuando termina de girar la ruleta, sabemos que existe una probabilidad de 50:50 de que la bola haya caído en una de las ranuras rojas, lo cual tiene el efecto de romper la cápsula de cianuro y matar al gato. Si la bola cae en una ranura negra, no pasa nada y el gato vive. Ahora bien, antes de abrir la caja no tenemos manera de saber si el gato está vivo o muerto. Sólo podemos hacer una predicción probabilística. Pero hay algo que sí sabemos: el gato tiene que estar vivo *o* muerto. El sentido común nos indica que no puede haber otra posibilidad.

Ahora pensemos en el ejemplo cuántico, donde un átomo en desintegración activa la cápsula de cianuro. De nuevo ignoramos el destino del gato antes de abrir la caja. Y también sabemos que tiene que estar vivo o muerto. ¿Pero lo sabemos de veras?

El problema es que, como ahora enfrentamos una situación cuántica, debemos usar la matemática de la teoría cuántica, una matemática lineal. Esta matemática nos indica que un gato vivo y un gato muerto son soluciones igualmente válidas para la ecuación mecánica cuántica llamada ecuación de Schrodinger. Pero como esta ecuación es lineal también es posible tener soluciones válidas que contengan combinaciones de ambas posibilidades: un gato parcialmente vivo y parcialmente muerto. De hecho, la ecuación de Schrodinger predice todas las combinaciones lineales posibles de gatos vivos y muertos. Según la matemática, todas estas soluciones son válidas... y reales. Hasta que abramos la caja, el gato vivirá en un curioso estado cuántico de animación suspendida.

Desde luego, la experiencia nos dice que cuando abramos la caja no encontraremos una multitud de gatos en diversas combinaciones de vida y muerte. Encontraremos una solución única del experimento: un gato vivo o muerto. Se dice pues que las múltiples soluciones de la ecuación de Schrodinger sufren un "colapso" ante una simple

descripción: un gato muerto o vivo. (Cómo se produce este colapso es otro problema para los filósofos cuánticos. ¿Es resultado de la conciencia del observador humano, de no linealidades introducidas desde el mundo exterior, o hay universos múltiples que contienen gatos vivos y muertos?)

La paradoja del gato de Schrodinger ilustra claramente la escisión entre nuestro mundo no lineal de resultados definidos y el curioso mundo lineal de la teoría cuántica. Con la caja cerrada, la teoría cuántica exige una descripción lineal, combinaciones de gatos vivos y muertos. Con la caja abierta regresamos al más familiar mundo de los acontecimientos singulares, no lineales. ¿Pero cómo se concilian ambas descripciones? ¿Habría que introducir la no linealidad en el mundo cuántico? Ya hemos visto una parte de la respuesta de Prigogine. Prigogine intenta extender la no linealidad hallada en la realidad de escala clásica de las mareas altas y los corazones palpitantes a la invisible escala cuántica, porque cree que la irreversibilidad —y en consecuencia la flecha del tiempo— existe en todos los niveles. Para Prigogine, la no linealidad representa la creatividad del universo. A través de la no linealidad aspira a demostrar la fecundidad del caos cósmico. A través de la no linealidad y la irreversibilidad quiere inducirnos a pensar acerca del universo de una manera que será un "reencantamiento de la naturaleza".

Bohm, un renombrado físico de Birkbeck College, Londres, también ha intentado llevar la no linealidad al cuanto, pero por otras razones. Para Bohm, como pronto veremos, la no linealidad del cuanto es una clave matemática para lo que según su teoría es la totalidad innata e indivisible de la naturaleza. Mediante la no linealidad Bohm aspira a demostrar la fecundidad del orden cósmico, que según él existe como una infinita complejidad de movimiento. Llama a esta complejidad "orden implícito", pues el orden del todo está implícito en el movimiento de cada "parte". Bohm ha pasado más de treinta años elaborando su teoría del orden implícito y otras teorías similares en un intento de escapar del reduccionismo inherente al enfoque lineal.

En el resto de este capítulo exploraremos el intento de Bohm de demostrar cómo se puede resolver la paradoja de Schrödinger mediante el añadido de no linealidades y luego examinaremos otro intento llamado enganche de fases. Veamos primero la solución de Bohm.

La "interpretación causal" de Bohm es una propuesta que introduce la no linealidad en la teoría cuántica. Bohm advirtió que es posible redactar la ecuación de Schrödinger de otra manera, esencialmente dividiéndola en dos partes.* La primera parte describe una suerte de "electrón clásico". La segunda ecuación describe un extraño "potencial" en que se desplaza el electrón, una suerte de sensibilidad infinita del electrón (u otra partícula cuántica) ante su ámbito. Bohm llama "potencial cuántico" a esta sensibilidad. Como las ecuaciones de Bohm son una transformación matemática de las ecuaciones de Schrödinger, darán los mismos

* En realidad, Louis de Broglie ya había descubierto cómo dividir de esta manera la ecuación de Schrödinger. Sin embargo, de Broglie se desalentó ante las dificultades técnicas y pronto abandonó lo que él llamaba su "teoría de la solución doble".

resultados numéricos que la teoría cuántica convencional, pero su sentido es muy distinto.

El potencial cuántico que dicta el modo en que un electrón se desplaza es no lineal y está determinado, de manera inimaginablemente compleja, por toda la materia, todos los átomos y partículas elementales que rodean al electrón de marras. El potencial cuántico controla el movimiento de un electrón dentro de un átomo, o a medida que viaja dentro de un aparato experimental.

Dada la extrema sensibilidad del potencial cuántico, un electrón es constantemente impulsado hacia puntos de bifurcación a lo largo de su trayectoria, regiones donde puede ser arrojado en una u otra dirección. Tan compleja es esta acumulación de bifurcaciones y regiones de fluctuación violenta que el resultado es la indeterminación y la imprevisibilidad que caracterizan el movimiento de un cuanto individual como el electrón, algo que a veces se denomina "caos cuántico". Pero, para Bohm, el movimiento del electrón cuántico no es de azar e incertidumbre sino que está totalmente determinado, aunque por un potencial de tal complejidad y sutileza que todo intento de predicción queda frustrado de antemano.

Para Bohm el potencial cuántico —que es propio de toda partícula cuántica— es una infinitamente sensible realimentación con el todo. Imaginemos el electrón como un avión controlado por un piloto automático. El potencial cuántico asociado con la partícula es análogo a una señal de radar que informa al piloto automático acerca de todo lo que ocurre en el ambiente del avión. La señal no impulsa el avión pero puede influir en su curso profundamente, mediante la información que le brinda acerca de las condiciones meteorológicas, los otros aviones que hay en la zona, las cadenas montañosas, las torres de aeropuerto. Un cambio en la información causa un cambio de curso.

En el caso del electrón, como todas las moléculas que constituyen el aparato que rodean el sistema cuántico están en constante estado de movimiento térmico, el potencial cuántico del electrón fluctúa continuamente de manera extremadamente sutil. Bohm cree que esta fluctuación de la totalidad del campo de información genera los resultados probabilísticos de los procesos cuánticos, el caos cuántico.

¿Qué significa esto para el gato de Schrödinger? Según la formulación de Bohm y su colega Basil Hiley, antes de levantar la tapa el gato está siempre en un estado definido: está vivo o muerto, nunca ambas cosas, nunca en un estado "intermedio" de combinación lineal de soluciones. Podemos explicar esto mediante la analogía del avión.

Durante el vuelo, el piloto automático tiene en cuenta la información suministrada por el radar y en algún momento los datos constantemente cambiantes hacen que el avión enfile hacia determinada pista aérea. Cuando llega (o no llega) a una pista aérea, la información sobre los posibles lugares de aterrizaje sigue impresa en la pantalla de radar pero ya no tiene influencia en el rumbo del avión. Esta información inactiva es análoga a las otras soluciones posibles de la ecuación de Schrödinger acerca de la función ondulatoria. El colapso de la función ondulatoria es pues un colapso de información. El gato no está medio muerto ni medio

vivo, así como el avión no aterriza en dos pistas al mismo tiempo. En cuanto a las soluciones de la función ondulatoria que parecen indicar un gato medio muerto o medio vivo, en realidad no existen, afirman Bohm y Hiley. En cambio, dichas soluciones representan diversos aspectos de todo el campo de información que guía al electrón.

Así la teoría del potencial cuántico de Bohm resuelve la paradoja del gato de Schrödinger. También tiene la virtud de volver el mundo cuántico totalmente coherente con el dominio clásico. Ya no es preciso que el físico haga un "corte" entre los fenómenos no lineales de gran escala y la linealidad cuántica, entre el determinismo y el indeterminismo. Ahora el mismo orden se extiende desde el electrón hasta la galaxia.

El potencial cuántico no lineal también ayuda a explicar lo que se ha denominado "totalidad cuántica".

Los experimentos demuestran que si uno correlaciona dos partículas cuánticas y las envía volando en direcciones diferentes, aquello que hagamos a una será "sentido" por la otra, que reaccionará en forma acorde, aunque las dos estén separadas en el espacio. Bohm piensa que las dos partículas están acopladas con todas las demás partículas mediante sus potenciales cuánticos no lineales. El acoplamiento incluye también a las partículas del aparato de medición. Así el sistema entero se mueve en conjunto y lo que se hace a una partícula queda instantáneamente registrado por un cambio en todo el sistema, afectando así a la otra partícula.

La interpretación causal de Bohm (el potencial cuántico) es un rasgo de su teoría del orden implícito. Entiende el orden implícito como un vasto terreno de realimentación del cual emergen los procesos cuánticos y donde todo afecta todo lo demás. Es un terreno constituido por lo que él llama "holomovimiento". Para Bohm el trasfondo universal de la realimentación existe aun antes que haya "cosas" para entablar relaciones de realimentación. En el orden implícito de Bohm, cada cosa que identificamos como una "parte" u objeto contiene el movimiento del todo plegado dentro de sí, porque está arraigado en este trasfondo infinito de realimentación no lineal.

Bohm y Hilley admiten que el enfoque del potencial cuántico no predice resultados distintos de los ya obtenidos por la teoría cuántica ortodoxa. Pero creen que este concepto brinda una imagen mental de lo que acontece en esta escala, algo que la mecánica cuántica ortodoxa no logra hacer. El concepto además combina los acontecimientos cuánticos con la realimentación no lineal de gran escala que vimos en los sistemas caóticos sensibles, en la simbiosis bacteriana, en la reacción Belousov-Zhabotinsky y en otros surgimientos del orden a partir del caos.

ENGANCHE DE FASES

Hay otro modo de resolver las paradojas lineales de la teoría cuántica, y otro modo de que el gato de Schrödinger pueda terminar su esquizofrénica existencia de estados múltiples antes de salir de la caja. Una clave de este enfoque de la no linealidad cuántica radica en el esencial carácter colectivo de la naturaleza.

La vida y la naturaleza abundan en sistemas constituidos por individuos eslabonados. Hemos visto esto en los relojes químicos que

involucran la coordinación de millones de moléculas individuales; en el moho del légamo, que a partir de una señal aglutina a gran cantidad de amebas individuales. Hay sistemas de individuos eslabonados en las células idénticas de un huevo fertilizado, que se dividen y diferencian en órganos separados y luego trabajan en conjunto para mantener el organismo; en la ordenada estructura atómica de un imán; en la coordinación de electrones de un superconductor. Lo que se podría llamar "enganche de fases" acontece cuando muchos osciladores individuales abandonan un estado de caos colectivo para batir juntos o resonar en armonía.

Un conocido ejemplo de enganche de fases se presenta en nuestros cuerpos cuando dormimos de noche y estamos despiertos de día. Totalmente aislados de todo cambio en la luz, de los relojes o las comidas regulares, nuestros cronómetros biológicos siguen un ciclo de 25 horas. Una vez de vuelta a la luz, el reloj biológico es impulsado por el día de 24 horas y engancha sus fases con esta frecuencia. Pero sólo tenemos que realizar un vuelo transatlántico para desbaratar el enganche de fases y experimentar la desorientación del mareo de tierra mientras el cuerpo intenta adaptarse a un nuevo ciclo de 24 horas.

Las mujeres que viven en grupos cerrados —en cárceles, hospitales, residencias estudiantiles— tienden a sincronizar sus ciclos menstruales. Las bacterias espiroquetas empiezan a ondular con el mismo ritmo cuando se juntan en una fuente de alimentos. Margulis cree que este ritmo grupal puede explicar cómo las espiroquetas terminaron formando los cilios de las células animales primitivas.

Las oscilaciones colectivas forman ciclos límite mucho más estables y resistentes que un puñado de oscilaciones individuales. Los relojes individuales divagan y cambian, pero una entidad colectiva en enganche de fases puede resistir pequeñas perturbaciones.

En la Universidad McGill de Montreal, Michael Guevara, León Glass y Alvin Shrier tomaron células del corazón de un embrión de pollo y las disociaron en una solución, donde las células continuaron palpitando erráticamente. Pero al cabo de un par de días las células volvieron a palpitar juntas. Habían logrado enganchar sus fases de palpitación para producir una oscilación colectiva.

En la siguiente etapa del experimento de McGill, se insertó una sonda eléctrica en el conjunto y se aplicó a cada cual una pulsación o una serie periódica de pulsaciones. Las células cardíacas pudieron enganchar fases con las señales que recibían y producir una pulsación estable. Modificando la frecuencia, los experimentadores pudieron utilizar el enganche de fases para impulsar el ritmo de las células hacia una región de duplicación de períodos y caos eventual.

Los resultados de McGill sugieren que nuestros corazones palpitan mediante un sistema de enganche de fases entre las células. Estas entidades colectivas de células son impulsadas por marcapasos naturales —los nodulos nerviosos— que emiten señales periódicas. La estabilidad inherente de un corazón en enganche de fases es útil cuando el animal descansa o duerme. Para estallidos repentinos de actividad, el corazón necesita cambiar la frecuencia básica

de sus latidos, y allí es donde actúa el marcapasos.

Si las células cardíacas se pueden combinar para producir ritmos variables pero estables, ¿qué ocurre con las complejas redes no lineales del cerebro? Como hemos visto, el sistema nervioso consiste en una cantidad astronómica de interconexiones y tiene el potencial para explotar una enorme gama de órdenes, desde los ciclos límite y los solitones hasta las sutiles y variadas formas del caos. Hay enganche de fases en diversas frecuencias, como lo demuestran los ritmos cerebrales EEG. También hay ritmos que atraviesan el cerebro y parecen estar coordinados con tipos específicos de actividad. ¿Es posible que tales ritmos globales y locales estén presentes en forma fractal y se repitan en regiones cada vez más pequeñas del cerebro?

El enganche de fases ofrece una explicación posible de cómo los sistemas de nivel cuántico se pueden unir para crear sistemas de escala clasica. David Bohm ha realizado una interesante observación acerca del enganche de fases cuántico.

A principios de este siglo los científicos enfrentaban el problema de explicar los resultados negativos del famoso experimento Michelson-Morley. El sentido común indicaba que si uno corre hacia un haz de luz la velocidad parecerá más alta que si uno se aleja de él. Pero la cuidadosa verificación de Michelson y Morley demostraba que la velocidad de la luz parecía igual, sin importar hacia dónde se desplazaran el observador o la fuente lumínica.

Resultó ser que el resultado Michelson-Morley requería una explicación excepcional: la teoría especial de la relatividad de Einstein.

Pero un año antes de la publicación del trabajo clave de Einstein, otro físico, llamado Hendrick Lorenz, había sugerido que la velocidad de la luz no era constante, como indicaban Michelson-Morley, sino que los efectos experimentales conspiraban para que el cambio de velocidad resultara imposible de observar. Lorenz argumentaba que los relojes y las varas de medición están constituidos por átomos y que estos átomos se mantienen unidos merced a interacciones electromagnéticas. Cuando un cuerpo material se desplaza, tiene que readaptar su estructura interna. Esta readaptación hace que los relojes en movimiento anden más despacio y que las varas de medición se contraigan. Lorenz argumentaba que el conjunto de estas pequeñas adaptaciones en los aparatos de medición enmascaraban la cambiante velocidad de la luz que los aparatos intentaban medir.

La explicación einsteiniana del experimento Michelson-Morley era más sutil y abarcadora. Señalaba que el tiempo y el espacio no eran cosas absolutas, como suponía Lorenz, así que el argumento de Lorenz de que los relojes "en realidad" andaban más despacio y las varas de medición "en realidad" se contraían no tenía sentido. Ocurría en cambio que la longitud y el tiempo de diversos sistemas funcionan a diferentes razones relativas.

Bohm combina los desechados argumentos de Lorenz con la relatividad de Einstein para crear el concepto de los "marcos materiales". Sugiere que podemos considerar que los observadores —incluidos los observatorios u otras estructuras colectivas— definen su propio tiempo y espacio local. En un sentido la interpretación de Bohm es similar a la de Lorenz, pues el tiempo que hay

Figura 1.1. **El enganche de fases es como una orquesta de individuos que tocan sincrónicamente la misma melodía, pero sin director.**

dentro de un marco material es generado a partir del enganche de fases de la materia que está dentro de ese marco. Pero es diferente de la idea de Lorenz porque no hay un trasfondo absoluto de espacio y tiempo contra el cual se puedan medir estos relojes y distancias. En cambio, el tiempo es una medida de la cantidad de procesos que acontecen, los tic tacs del reloj interno del marco. Cuando los relojes andan despacio unos respecto de otros, es porque sus marcos materiales tienen un diferente enganche de fases mutuo.

Tal vez este enganche de fases de los marcos materiales no valga sólo para los viajeros espaciales que recorren un universo einsteiniano a velocidades cercanas a la de la luz. También puede acontecer en niveles individuales y culturales. Se puede manifestar en el hecho de que la gente y las sociedades parecen insertados

en diferentes "sentidos del tiempo".

El enganche de fases de los marcos materiales debe comenzar en el nivel cuántico. ¿Pero cómo? Sugerimos que la respuesta radica en la transformación que acontece cuando la conducta individual aleatoria se transforma en conducta colectiva. Aquí nos ayudará una analogía con el moho del légamo.

En un nivel, cuando abundan los alimentos en el suelo del bosque, el moho actúa como un conjunto de células individuales, cada cual independiente de sus vecinos y enfrascada en sus propias tareas. Pero cuando los alimentos escasean, estos individuos se funden en una entidad colectiva. Se unen para transformarse en un ser corporativo que se desplaza por el suelo del bosque. El moho del légamo muestra claramente la transición de conducta individual a conducta colectiva. Sugerimos que algo semejante puede ocurrir en el nivel cuántico entre los fenómenos individuales y colectivos. En tal caso, el enganche de fases cuántico podría constituir un puente que uniría la realidad clásica, la realidad no lineal y la realidad lineal cuántica.

Supongamos que los objetos cuánticos son como células del moho del légamo, en el sentido de que interactúan juntos de manera colectiva. En su naturaleza individual, podemos describir los objetos cuánticos mediante combinaciones lineales de todas las soluciones posibles, combinaciones de gatos muertos con gatos vivos. Pero a medida que gran cantidad de objetos cuánticos comienzan a actuar colectivamente, emergen ciertas propiedades estables y definidas y el conjunto ya no se puede describir mediante una combinación lineal de diversos estados. Tal vez algo semejante ocurra en los sistemas vivientes. Mediante el enganche de fases, se construyen moléculas cuyas propiedades están a medio camino entre lo cuántico y lo clásico. Por una parte, dichas moléculas poseen propiedades definidas, y por la otra todavía participan en procesos cuánticos. Algunas moléculas son sensibles a la información emitida por una partícula cuántica, por ejemplo.

Regresemos por un momento a la paradoja del gato de Schrodinger: obviamente el gato es un sistema cooperativo no lineal con propiedades bien definidas, no puede estar medio muerto y medio vivo. Por otra parte, el núcleo en desintegración que activa el cianuro es un objeto cuántico y lineal. Sin embargo, cuando el sistema se acopla con el gato de Schrodinger, se vuelve no lineal y puede residir sólo en estados definidos.

El matemático y físico teórico Roger Penrose también ha examinado lo que puede ocurrir cuando se acopla gran cantidad de objetos cuánticos. Penrose escogió trabajar con las más elementales de todas las entidades cuánticas, los espinores, cada uno de los cuales sólo puede adoptar uno de dos valores

posibles. Juntó estos objetos de acuerdo con las reglas de la teoría cuántica hasta que terminó con una gran red de espinores. Penrose se preguntó qué ocurría cuando se conectaran dos redes semejantes. La respuesta es que se ven una a otra en términos espaciales, como si estuvieran orientadas en un ángulo particular una respecto de otra.

Lo asombroso de este resultado es que Penrose comenzó de manera totalmente abstracta, no trabajando en el espacio sino en un dominio puramente matemático. Pero, a partir de las interrelaciones de los

espinores mientras se trababan para formar redes cada vez más grandes, pudo deducir las propiedades de la orientación en un espacio tridimensional. Al parecer, las propiedades del espacio no son inherentes, no son dadas, sino que emergen en la gran escala a partir de la interacción cooperativa de los sistemas cuánticos.

Sugerimos que, análogamente, los sistemas cuánticos se pueden combinar para crear no sólo el espacio sino el tiempo y otras estructuras macroscópicas. Por tanto es innecesario trazar una línea entre el mundo cuántico lineal y las no linealidades del mundo en gran escala. Pues cuando los sistemas cuánticos crecen de tamaño desarrollan no linealidades y estructuras.

En algunos casos, la estructura resultante en el nivel clásico se vuelve relativamente estable y así resulta relativamente insensible a las fluctuaciones cuánticas individuales, como es el caso de nuestro sistema solar. Pero otros sistemas de gran escala enganchan sus fases de tal modo que se vuelven sensibles y quedan cerca de una región caótica. En tales casos, el sistema colectivo clásico es sensible a las fluctuaciones individuales cuánticas y se comporta caótica e imprevisiblemente ante la influencia de un atractor extraño.

Cuando los científicos realizan mediciones cuánticas amplifican un proceso cuántico singular, con lo cual se altera alguna variable de gran escala, como la aguja del medidor o el chasquido de un contador Geiger. El resultado es siempre imprevisible, como en el experimento del gato de Schrodinger.

Las estructuras autopoiéticas tales como los gatos y los seres humanos han evolucionado de tal modo que explotan la imprevisibilidad individual del cuanto. Nuestros ojos, narices y bulbos olfativos pueden responder sólo a unos pocos cuantos energéticos. El sistema nervioso humano es tanto clásico como cuántico, y explota procesos en escala cuántica para alcanzar finalidades de gran escala tales como el movimiento o el habla. Así la tensión entre el caos cuántico individual y el orden cuántico colectivo es capaz de crear e impulsar escalas estructurales cada vez más complejas.

Sí, la profundidad de los mundos-espejo es un lugar extraño (o son lugares extraños). Allí, Prigogine resuelve el problema del gato de Schrödinger en el caos y la evolutiva flecha del tiempo. Bohm lo resuelve hallando huellas de un orden holístico infinito, y otros indicios sugieren que la solución se encuentra en la realimentación por enganche de fases. Es posible que todas estas soluciones sean erróneas, o que todas sean correctas. Al menos, todas parecen reflejos de una antigua tensión entre lo individual y lo colectivo, la certidumbre y la incertidumbre, el caos y el orden. Comprendemos cada vez más que esa tensión es creativa.

Durante un largo tiempo Ta'aroa vivió en su caracola. Era redonda como un huevo y giraba en el espacio en continuas tinieblas ... Pero al fin Ta'aroa golpeó su caracola, sentado en su estrecho confinamiento, y ella se rajó y se abrió. Él salió, se irguió sobre la caracola y exclamó: "¿Quién está encima de allí? ¿Quién está debajo de allí?" ... Así que volcó la caracola y la levantó de tal modo que formó una cúpula para el cielo y la llamó Rumia. Y se fatigó y al cabo salió de otra caracola que lo cubría, que tomó por roca y por arena ...No podemos enumerar las caracolas de todas las cosas que produce este mundo.

MITO POLINESIO DE LA CREACIÓN

Prologo

El emperador del Mar del Sur *se llamaba* Shu *(Breve), el emperador del Mar del Norte se llamaba Hu (Repentino) y el emperador de la región central se llamaba Hun-tun (Caos). De cuando en cuando Shu y Hu se reunían en el territorio de Hun-tun, y Hun-tun los trataba con gran generosidad...*

DE NUEVO MONSIEUR POINCARÉ

En un universo no lineal puede ocurrir cualquier cosa. Las formas se pueden desintegrar en hilachas de caos o entretejer en tramas de orden. ¿Pueden los principios de la no linealidad aplicarse también a la creatividad de los seres humanos, a nuestra capacidad para hacer una obra de arte o un descubrimiento científico? Henri Poincaré, el científico que nos brindó las primeras pistas sobre el modo en que la no linealidad y el caos trabajan en escala cósmica, también tuvo poderosas intuiciones acerca del modo en que el caos no lineal opera en la mente creativa. Una vez más, Poincaré se nos presenta para decirnos que la tensión de las viejas cosmologías aún es aplicable. Poincaré mostró que en nuestra actividad creativa la antigua tensión entre caos y orden está siempre renovada.

Poincaré reveló sus intuiciones acerca del proceso creativo en una conferencia de la Sociedad de Psicología de París. Aquí el gran físico describió el curioso proceso que lo llevó a resolver el problema de las funciones fuchsianas.

Figura P.1

Explicó a su público que durante dos semanas había luchado con su enigma matemático pero sus esfuerzos parecían vanos hasta que una noche, "contra mi costumbre, bebí café negro y no pude dormirme". Esa noche memorable "las ideas surgieron tumultuosamente; las sentí chocar hasta que algunos pares se engancharon, por así decirlo, formando una combinación estable". Entonces vio un orden condensándose a partir del caos.

Poincaré confesó, sin embargo, que las decisivas intuiciones de esa noche de vigilia fueron sólo el primer paso. Cuando examinó estas ideas "enganchadas", notó que contenían una nueva escala del caos. De esa confusión surgió una nueva percepción del orden, esta vez aun más contundente.

> En ese momento me fui de Caen, donde estaba viviendo, para emprender una excursión geológica auspiciada por la Escuela de Minería. Los episodios del viaje me hicieron olvidar mi trabajo matemático. Tras llegar a Coutance, abordamos un autobús para ir a algún sitio. En cuanto pisé el estribo se me ocurrió, sin que ninguno de mis pensamientos anteriores pareciera haber allanado el camino de esta idea, que las transformaciones que había usado para definir las funciones fuchsianas eran idénticas a las de la geometría no euclidiana. No verifiqué la idea; no habría tenido tiempo, pues, sentándome en el autobús, continué con una conversación ya iniciada, pero sentí una absoluta certeza. Al regresar a Caen tranquilicé mi conciencia verificando ociosamente el resultado.

Poincaré dijo a su público que este proceso de descubrimiento científico parecía iniciarse en la frustración, la confusión y el caos mental para desembocar en una imprevista intuición. Recordó otra ocasión en que el proceso se repitió. Disgustado porque no podía resolver un problema, "fui a pasar unos días junto al mar y pensar en otra cosa. Una mañana, caminando por el acantilado, la idea [solución] se me ocurrió, con las mismas características de brevedad, brusquedad y certeza inmediata".

Aunque Poincaré no lo ahondó mucho más, este análisis surtió un profundo impacto en las teorías sobre la creatividad.

En su notable libro *El acto de la creación,* Arthur Koestler sugiere que tales transiciones del orden al caos como la que describió Poincaré deben ser una función del proceso que Koestler llama "bisociación", es decir, la conjunción de dos marcos de referencia distintos. Koestler tomaba como ejemplo prototípico de bisociación la historia del antiguo científico griego Arquímedes. Arquímedes había recibido el encargo de calcular la cantidad de oro que había en la corona del rey, pero estaba frustrado porque no podía hacerlo sin fundir la corona.

Se cuenta que un día Arquímedes entró en la bañera y gritó "Eureka!" ("¡Lo encontré!") porque comprendió, mirando el ascenso del agua, que podía medir el volumen de la corona poniendo la corona en agua y calculando cuánta agua desplazaba. Pudo llegar a esta ingeniosa solución, decía Koestler, acoplando dos marcos de referencia: el problema de la medición y el baño.

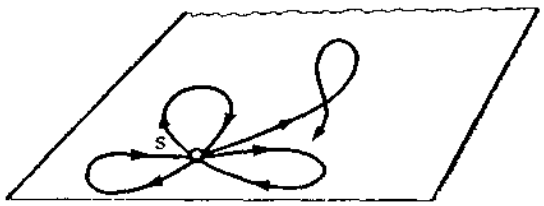
En el caso de la repentina inspiración de Poincaré, Koestler interpretaba que el cambio de aires había permitido al gran científico alterar los marcos de referencia del problema y así llegar a la repentina

solución.

Koestler consideraba que la bisociación era el proceso central de la creatividad. Sus diagramas del proceso son una especie de mapa de espacio de fases psicológico.

La *Figura P.2* muestra la imagen de Koestler, la mente forcejeando con un problema. El punto de partida (P) es una especie de punto atractor. La intensidad del interés aleja a la mente lejos del atractor impulsándola hacia la solución o meta (S). La busca inicial involucra patrones habituales de pensamiento que actúan como ciclos límite. La mente se atiene a estos patrones. Sin embargo, la meta o solución no se encuentra en el mismo marco (o plano, en este caso) de referencia que el problema; no se encuentra en el contexto familiar de las soluciones previas a problemas similares.

Figura P.2



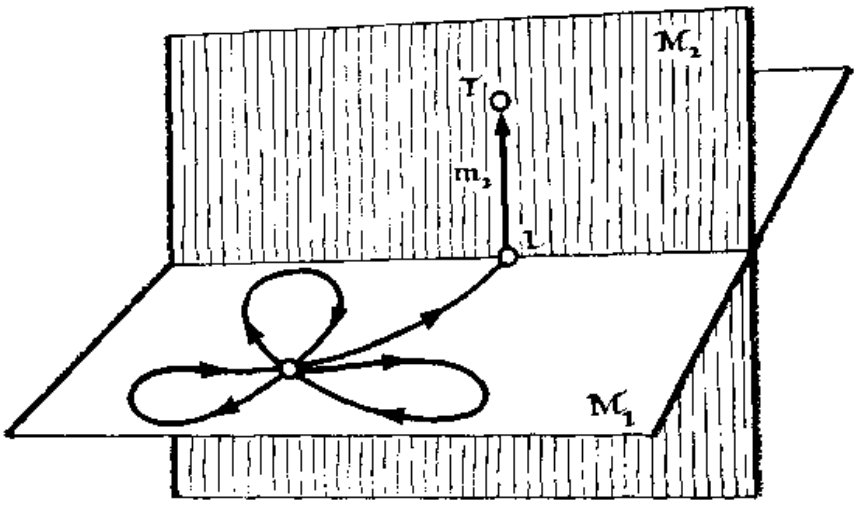
Según la descripción de Koestler, la frustración del creador aumenta y la busca de una solución se vuelve cada vez más errática, los ciclos límite se desintegran y producen un flujo mental que está alejado del equilibrio. En un punto crítico de este burbujeo de pensamientos, se alcanza una bifurcación donde un pequeño dato o una observación trivial (como la elevación del nivel del agua en la bañera) se amplifica, haciendo que el pensamiento se ramifique buscando un nuevo plano de referencia, un plano que sí contiene la solución.

En el diagrama de Koestler *(Figura* P.3), M significa *"matriz",* aludiendo al contexto o plano de referencia. La L del punto de bifurcación es el "lazo" entre los dos planos del pensamiento. El lazo es el factor amplificado en la bifurcación para crear el nuevo orden. En la bisociación de Arquímedes, el lazo entre los dos planos puede haber consistido en ver el agua subiendo en la bañera y su correspondencia con el volumen de las partes sumergidas del cuerpo del científico. Poincaré no nos contó tanto sobre su situación como para que podamos identificar cuál era el nuevo marco de referencia cuando abordó el autobús. La lejanía física respecto de su lugar de trabajo parece haber bastado para brindarle una nueva perspectiva de todos esos elementos matemáticos que hervían caóticamente en su cerebro, y el cambio de escena evidentemente introdujo ideas matemáticas de otros marcos de referencia que no había incluido en su reflexión inicial acerca del problema. Así un pensamiento casual sobre la geometría no euclidiana se amplificó y acopló con el problema fuchsiano.

Un importante investigador de la creatividad, el psicólogo Howard Gruber de la Universidad de Ginebra, ha llevado la descripción de Koestler un poco más allá. Gruber sugiere que los procesos creativos se deberían abordar no sólo como acoplamientos de *dos* marcos de referencia sino de varios.

Poincaré comenta que antes de alcanzar la solución final de las funciones fuchsianas sufrió por lo menos un cambio de perspectiva previo, durante esa noche de insomnio inducido por el café. La investigación de Gruber indica que

Figura P.3



en el proceso creativo los cambios de perspectiva ocurren todo el tiempo en diversas escalas, antes de alcanzar finalmente la solución creativa. Según Gruber, muchas y pequeñas modificaciones de planos de referencia se acoplan hasta producir un viraje en la percepción.

Podemos concebir que el esfuerzo mental del creador corre en círculos alrededor del problema o tarea creativa, bifurcándose para llegar a nuevos planos de referencia, regresando al plano anterior, ramificándose hacia otro plano y hacia planos que se encuentran dentro de planos. Este esfuerzo mental genera un flujo alejado del equilibrio que desestabiliza los ciclos límite del pensamiento habitual. También engancha las fases de realimentación de varios planos de referencia y comienza a producir espontáneamente una autoorganización.

La capacidad para saltar de un plano de referencia a otro mientras se acoplan diversos planos parece depender de la sensibilidad del creador a los matices.

MATICES: UNA SENSIBILIDAD EXTREMA

Una característica distintiva de las personas creativas es su extrema sensibilidad a ciertos matices del sentimiento, la percepción y el pensamiento. Un matiz es una sutileza de significado, un complejo de sentimiento o una delicadeza de percepción para la cual la mente no tiene palabras ni categorías mentales. En presencia de un matiz, el creador sufre lo que se podría llamar una aguda reacción no lineal. Henry James cuenta que la novela *The Spoils of Poynton* surgió en su mente cuando una mujer sentada junto a él en una cena deslizó un comentario acerca de una madre y un hijo que reñían por una finca. En ese momento James experimentó una vivida

aunque amorfa captación de la historia que pronto se sentaría a escribir. Su sensibilidad al peculiar matiz (el complejo de sentimientos y pensamientos inefables e inclasificables) que él veía en ese episodio había amplificado en sus pensamientos las palabras de esa mujer. Todo creador es sensible a diversos tipos de matices. Los

matices son como la riqueza de la zona límite del conjunto de Mandelbrot, la riqueza de las muchas escalas de un fractal. Para un creador, los matices evocan la "información faltante". El impresionista Claude Monet era increíblemente sensible a los matices relacionados con el movimiento de la luz solar. Virginia Woolf reaccionaba enérgicamente a todos los matices relacionados con movimientos ondulatorios. Este matiz la indujo escribir algunas de sus más grandes novelas. Un matiz es al principio algo muy íntimo. Como su riqueza no se puede describir mediante las formas normales de pensamiento, ni está contenida en ellos, no es fácil compartirlo con otras personas. Para expresar su experiencia de un matiz, el individuo tiene que crear una forma que lo comunique.

James llamaba "germen" a toda idea o imagen cargada de matices que incitara a un creador a realizar una forma nueva. ¿Los científicos también reaccionan ante los matices germinales?

El historiador de las ciencias Gerald Holton, de Harvard, argumenta que los científicos creativos son agudamente sensibles a los matices relacionados con ciertos temas que perciben en la naturaleza. Estos temas están hondamente arraigados en la historia personal del científico y a veces se relacionan con un matiz que el científico percibió en la infancia. Holton relaciona el descubrimiento de la relatividad con el rico matiz que Einstein percibía en el tema del "continuo". Einstein recordaba que a los cinco años su padre le mostró una brújula. El misterioso poder del continuo electromagnético donde flotaba la aguja de la brújula lo cautivó. "Aunque yo era muy pequeño, el recuerdo de este episodio jamás me abandonó", declaró más tarde Einstein. Holton cree que la aguja del continuo magnético estaba relacionada en la mente del joven Einstein con sus tempranas inquietudes religiosas y su percepción de una fuerza invisible que unificaba el universo. Más tarde, el tema del continuo de la naturaleza parece haber sido un germen cargado de matices que indujo a Einstein a emprender diversos proyectos científicos, entre ellos la teoría de la relatividad y la busca de un continuo universal que él llamaba el "campo unificado".

Desde luego, el mundo está lleno de matices potenciales; está saturado de sutilezas de significado, sentimiento y percepción, experiencias para las cuales nuestros idiomas y nuestras lógicas no tienen categorías. Los matices existen en los espacios fractales que hay *entre* nuestras categorías de pensamiento. Según la teoría de Paul LaViolette y William Gray, los matices circulan todo el tiempo desde los centros emocionales y perceptivos de nuestro cerebro para ser rápidamente simplificados por nuestra corteza, que los transforma en pensamientos que son categóricos u "organizativamente cerrados". Todo lo que consideramos conocimiento del mundo es organizativamente cerrado. Pero nuestras dudas, incertidumbres e interrogantes están llenos de matices. Al experimentar el matiz entramos en la zona limítrofe entre el orden y el caos, y en el matiz radica nuestra captación de la totalidad e indivisibilidad de la experiencia.

Una escultora describía así su experiencia infantil de los matices: "Un charquito que relucía con aceite derramado y reflejaba un retazo del

cielo del Medio Oeste de pronto se expandía, por una infinita fracción de segundo, para abarcar mi universo entero".

Aunque la mayoría pasamos por alto tales percepciones, e incluso las reprimimos porque amenazan nuestra manera habitual de pensar, los creadores se concentran en ellas y las amplifican. Los creadores cultivan la habilidad para vivir en lo que Keats llamaba "dudas e incertidumbres" creadas por un matiz el tiempo suficiente para permitir el florecimiento de algo nuevo.

Cuando un germen que contiene matices cae en un suelo mental fecundo, el resultado en la mente del creador es un desequilibrado flujo de interrogantes, incertidumbres y sensación de totalidad que permite que el material sobre el cual se trabaja —trátese de datos científicos, un paisaje y un lienzo, o los personajes de una novela— amplique las sutilezas, se bifurque buscando nuevos planos de referencia y forme rizos de realimentación entre diferentes planos, en un proceso donde una forma se autoorganiza para encarnar el matiz.

Nuestros patrones de pensamiento habituales se organizan alrededor de ciclos límite. Cuando le piden que configure formas a partir de una masa compleja de material o que resuelva un problema, la mente suele reaccionar formulando una estructura reduccionista u organizativamente cerrada en vez de permitir —como haría un creador— que el material evolucione por sí mismo a partir de las dimensiones fractales del matiz.

¿Qué clase de creación se produce mediante esta autoorganización inducida por los matices? Para buscar la respuesta, iremos al mundo de las artes creativas.

LA NATURALEZA FRACTAL DE LAS CREACIONES

En *El mono gramático* Octavio Paz declara que la visión de la poesía es la de la convergencia de todos los puntos, el final del camino: una visión oblicua y vertiginosa revela el universo no como una sucesión sino como un ensamblaje de "mundos en rotación".

Un poeta que explícita matices es como una ecuación iterativa en el límite entre el finito orden y el infinito caos. El creador descubre la autosimilitud. Tomemos como ejemplo de esa autosimilitud el poema "The Writer", del premio Pulitzer Richard Wilbur.

LA ESCRITORA

En *su cuarto del piso de arriba*
donde irrumpe la luz, y los tilos se mecen en las [ventanas
mi hija escribe un cuento.

Me paro en la escalera al oír
el martilleo de las teclas en su cuarto cerrado,
como una cadena trepando por la borda.

Aunque ella es joven,
el material de su vida es un pesado cargamento.
Le deseo buen viaje.

Pero de pronto se interrumpe
como rechazando mi cómoda reflexión.
Crece una quietud jadeante,

como si la casa entera pensara,
y de pronto ella vuelve a martillar
las teclas, y de nuevo calla.

Recuerdo al estornino aturdido
que hace dos años quedó atrapado en ese [cuarto:
entramos con sigilo, abrimos una ventana

y nos alejamos para no asustarlo:
durante una hora impotente, por la hendija,
observamos cómo esa criatura

lustrosa, salvaje, oscura, iridiscente
aleteaba contra el fulgor, caía como un guante
al duro piso o al escritorio,

y luego, encorvada y ensangrentada, recobraba
el brío para comenzar de nuevo; y cómo el ánimo
se nos levantó cuando, con repentina certeza,

se elevó desde un respaldo,
enfilando rectamente hacia la ventana correcta
y cruzando el antepecho del mundo.

Siempre, querida,
es cuestión de vida o muerte. Lo había olvidado.
Te deseo lo mismo de antes, pero con más fuerza.

El poema está construido como una serie entrelazada de metáforas o, mejor dicho, "reflectáforas". Una reflectáfora es cualquier recurso creativo (incluyendo, en literatura, recursos tales como la ironía, la metáfora, el símil, el retruécano, la paradoja, la sinécdoque) que surte su efecto creando en la mente del lector una tensión insoluble entre las similitudes y diferencias de sus términos. En otras palabras, una reflectáfora provoca un estado de inmenso asombro, duda e incertidumbre, una percepción de los matices. Una reflectáfora importante en el poema de Richard Wilbur es la comparación entre dos términos: el esfuerzo de la hija para escribir un cuento y el esfuerzo del estornino para enfilar "rectamente hacia la ventana correcta". Estos dos términos son obviamente muy diferentes, y vienen de muy diferentes anaqueles de nuestra biblioteca mental. Pero Wilbur los ha yuxtapuesto de una manera que sugiere similitudes. La tensión entre las obvias diferencias y las similitudes descubiertas obliga a la mente del lector a abandonar su sistema de categorías habituales para hallar sutilezas y matices.

La segunda reflectáfora importante del poema sugiere las similitudes (y también las diferencias) entre el esfuerzo de la hija para escribir y el esfuerzo del padre para comprender lo que le ocurre a ella mientras intenta escribir. Una tercera asimila a la hija con la casa (por ejemplo, al asociar la mente de la muchacha que lucha con el cuento con la ventana del piso superior de la casa, donde "se mecen los tilos". Aquí podemos ver cómo, aunque son diferentes, los términos de una reflectáfora se reflejan entre sí, de allí el nombre.

La cuarta reflectáfora importante es bastante interesante porque implica una metáfora (recordemos que la metáfora es una variedad de la reflectáfora) que el padre rechaza en la cuarta estrofa. Allí, en su intento de comprender el matiz de las experiencias de su hija, el narrador deliberadamente compara los esfuerzos de ella con un viaje marítimo. Cuando él dice esto, sin embargo, la muchacha "se interrumpe / como rechazando mi cómoda reflexión". Con estas palabras el narrador comprende que la metáfora del viaje marítimo es un cliché. Es una metáfora *muerta,* una metáfora que ha perdido la tensión entre sus términos. En vez de evocar la profundidad de los sentimientos del padre acerca de la lucha de la hija, la comparación metafórica de la vida de la hija con un viaje marítimo le niega matices, la encierra en categorías que simplifican la experiencia, es "organizativamente cerrada". Wilbur, un poeta, un escritor, tiene aguda conciencia de que la metáfora, para evocar matices, tiene que ser lozana, no muerta; debe sacudir la mente provocando asombro, abriendo una brecha entre sus términos y luego franquear la brecha con una electricidad de matices. El uso excesivo cierra la brecha entre los términos de una metáfora porque llegamos a pensar que "sabemos" qué significa la metáfora. Comparar la vida con un viaje marítimo parece trillado porque todos sabemos acerca de la difícil travesía y el "pesado cargamento" de la vida.

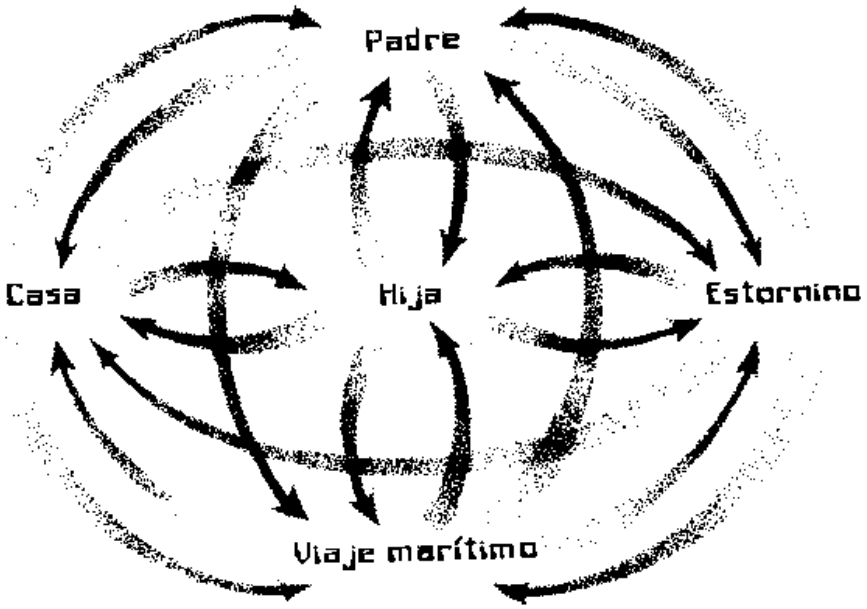
Irónicamente, sin embargo, al reconocer que la metáfora del viaje marítimo supone una categoría cerrada, el escritor que narra el poema se obliga a sí mismo —y obliga al lector— a comprender que en realidad no sabemos qué significa decir que la vida es como un viaje marítimo. Como resultado del cuestionamiento del cliché, la metáfora del viaje marítimo recibe una inyección de asombro y puede regresar implícitamente en la última estrofa del poema, esta vez rebosante de matices.

Una reflectáfora, donde los matices surgen de una tensión insoluble entre sus términos, es como un fractal. Recordemos que en los fractales hay orden y caos, llenen autosimilitud en varias escalas, pero esta autosimilitud no implica autoidentidad, y es imprevisible y aleatoria. La tensión entre similitudes y diferencias en las reflectáforas también crea una sensación de imprevisibilidad y azar en el trabajo creativo, una sensación de que aquello que experimentamos es orgánico, familiar y desconocido al mismo tiempo.

Los términos de una reflectáfora son como polos en un artefacto eléctrico. En la brecha que hay entre ellas fluye una electricidad de matices. Cuando hay varias reflectáforas en la pieza, los polos (términos) interactúan como circuitos o rizos de realimentación, y cada cual afecta los demás creando un movimiento de matices. Es un movimiento autoorganizativo en el límite del orden y el caos.

Este es un mapa abstracto de la totalidad y autosimilitud del poema. La realimentación muestra que no sólo todo afecta todo lo demás dentro del poema, sino que *es* todo lo demás. El padre es en cierto sentido la hija (es un escritor, por ejemplo: está esforzándose para expresar matices mientras ella libra su propia lucha); la hija es la casa; el padre es la casa, y así sucesivamente. También es cierto que cada término *no*

***Figura* P.4**



es el otro, pues sus diferencias también son vitales.

El proceso de creación de este poema tal vez se autoorganizó a partir de un germen cargado de matices que contenía la sensación de Wilbur de que el acto de la creación literaria y las relaciones padre-hijo son en cierto modo iguales. Apropiadamente, el resultado de desplegar ese germen fue un objeto autosimilar. Como decía James, los gérmenes también contienen una percepción de la totalidad. Esta totalidad se encarna en la autosimilitud de la obra terminada, donde cada parte está acoplada con cada otra parte, es generada y reflejada por ella.

Ello nos conduce a una autosimilitud adicional, evidente en este poema en cuanto advertimos que Richard Wilbur, al escribirlo, debió pasar por la misma lucha que enfrentan el padre y la hija del poema. Esta escala de autosimilitud no es inusitada en las obras creativas. En cierta escala podemos leer toda gran obra de arte como un retrato de la lucha mental que enfrentaba el artista para crear la obra misma: *Moby Dick,* "Guernica" y el concierto Emperador parecen claros ejemplos.

A través de esta realimentación autosimilar, la obra de arte revela que hay mundos dentro de otros mundos. Pero tal vez aún nos quede por abordar la más importante escala de la autosimilitud: la que existe entre la obra de arte y su público.

En el poema de Wilbur, esta autosimilitud se manifiesta en la lucha del lector para conectarse con los matices elusivos del poema, que es muy parecida a la lucha del padre para conectarse con la hija y a la lucha de la hija para conectarse con su cuento.

Un poema como el de Wilbur exhibe una tensión reflectafórica en todas sus escalas. El poema existe en los matices de sus metáforas, ironías, paradojas, imágenes, en otras palabras, en las dimensiones que hay entre los atractores de ciclo

límite del lenguaje. El movimiento de matices resultante (el poema mismo) es, como hemos visto, fractal o (si se quiere) holográfico, pues cada parte refleja cada una de las demás, aunque no con exactitud.

La estructura fractal/holográfica del poema de Wilbur también es evidente en la pintura "La gran ola" de Hokusai (véase el final del Capítulo 4). El lector puede reparar en la tensión reflectafórica entre la momentánea forma fluida del primer plano y el sólido monte Fuji del trasfondo; entre las naves que repiten la curva de las olas pero también son amenazadas por ellas; entre los rostros de los marineros y las motas de espuma.

La inclinación de Hokusai a recurrir a una estructura fractal no es inusitada. Miremos este retrato de María Portinari, pintado en el siglo quince por el artista flamenco Hans Memling.

Notemos que la forma ovoide de los ojos de la mujer se repite en muchas variaciones y tensiones reflectafóricas a través de la pintura. Por ejemplo, en el cuello y el pico del sombrero cónico, aun en la curva de los pulgares. En su estructura fractal, la pintura de Memling revela la paradoja de la simplicidad como complejidad y la complejidad como simplicidad.

Una vez que Benoit Mandelbrot descubrió la geometría fractal, los artistas comenzaron a reconocerla conscientemente como rasgo del arte. "Uno mira cada vez más adentro de un fractal, y siempre sigue siendo fractal", dice el pintor inglés David Hockney. "Es un camino hacia una mayor percepción de la unidad." Hockney considera que su propia obra es holográfica y fractal.

Figura P.5

Los músicos también han reparado en esta conexión. El compositor Charles Dodge, director del Centro de Música por Computación en Brooklyn College, enlaza los fractales con una autosimilitud básica que siempre ha existido en la música clásica. "En los estudios de la estructura musical abunda la conciencia de la autosimilitud", dice Dodge.

Por ejemplo, Leonard Bernstein, en sus conferencias de Harvard, señalaba la autosimilitud que había en la estructura musical, desde las escalas más grandes hasta las más pequeñas, llamando "metáfora musical" a esas variantes recurrentes. Y el compositor Arnold Schönberg insistía en que en una gran pieza musical "las disonancias son sólo las consonancias remotas". La afirmación de Schönberg lleva implícitos el matiz, la autosimilitud, la totalidad y la tensión

reflectafórica.

Pero los compositores contemporáneos no sólo han observado las similitudes entre la geometría fractal y la tradicional estructura estética de su arte, sino que han empleado la tecnología de los fractales en algunas composiciones.

El compositor Charles Wuorinen, ganador del premio Pulitzer, señala qué en 1977 se inspiró en la lectura del libro de Mandelbrot sobre la geometría fractal. Fascinado por la idea de la "conducta de partes de la naturaleza", insinuada en el libro, escribió varias piezas usando algoritmos fractales. Una, titulada *Bamboula Squared,* fue compuesta para cinta cuadrofónica y orquesta y ejecutada por la New York Philharmonic en 1984. Según Wuorinen, las piezas se generaron mediante el hallazgo del algoritmo "correcto" y mediante la iteración de ese algoritmo como un fractal aleatorio. El algoritmo correcto es el que crea matices equilibrando el azar con rasgos autosimilares. La pieza resultante obliga a la audiencia a interactuar constantemente con la música y a reconocerla como una nube de sonidos que están obviamente ordenados y son similares entre sí, pero también constantemente imprevistos y diferentes. Esta percepción de lo esperado como inesperado es una faceta vital de la expresión creativa. Renueva constantemente la tensión entre el orden y el caos, en una visión oblicua y vertiginosa, como quería Paz, que revela el universo no como sucesión sino como un ensamblaje de "mundos en rotación".

EL ARTE DE LA CIENCIA Y OTRAS ARTES

David Bohm propone que la ciencia del futuro se aproxime más al arte. Hace dos sugerencias. Primero, argumenta que los científicos, en vez de desechar las teorías científicas alternativas a favor de una teoría "aceptada", deben perseguir la posibilidad de que la verdad científica, como la verdad artística, dependa de incesantes matices, de "mundos en rotación". Bohm señala que la raíz de la palabra *teoría* significa "ver". A causa de los infinitos matices de la realidad, puede haber muchos modos de ver qué está haciendo la naturaleza. Los artistas, desde luego, lo saben desde hace tiempo.

La segunda sugerencia de Bohm para transformar la ciencia en arte es inducir a los autores de las teorías científicas a incorporar una especie de ironía emparentada con la ironía del arte. Esta ironía sería un reconocimiento de que la teoría, diga lo que dijere acerca de la realidad, no es esa realidad, porque toda teoría es una abstracción a partir del todo y en cierto sentido es pues una ilusión. Aunque las teorías científicas pueden ser ilusiones útiles, cree Bohm, el que recurre a una teoría siempre debe tener en cuenta las limitaciones de dicha teoría. En cierta medida, una buena teoría debería fijarse ciertos límites, como el Emperador Amarillo en su modalidad más taoísta.

Peter Senge dice que nuestras futuras actividades empresariales y sociales serán más efectivas si también se desarrollan en una atmósfera de ironía y matices, y habla de reconocer la incertidumbre básica: "La reverencia por la incertidumbre es una de las implicaciones no reconocidas del pensamiento de sistemas". Paradójicamente asocia

esta reverencia con una cualidad visionaria que ha visto en ejecutivos de éxito que tienen una extraordinaria energía y capacidad para convertir su percepción personal de los matices en una forma que ejerce un impacto en los demás.

"Creo que la reverencia por la incertidumbre es la diferencia entre un visionario creativo y un fanático. Un fanático busca algo que elimine la incertidumbre. La persona creativa reconoce la incertidumbre y dice: 'Esto es lo que me gustaría que ocurriera. No sé si es posible, pero me gustaría arriesgarme por esto'."

En el esquema de Senge, la reverencia por la incertidumbre lleva a una visión personal que, a la vez, se eslabona con la aptitud del individuo para impulsar la acción colectiva de muchos individuos. Esto nos recuerda una vez más la afirmación de Keats según la cual la capacidad para vivir entre "dudas e incertidumbres" (entre matices) constituye la base de la capacidad de creación.

Los antiguos decían que la tarea del artista consistía en presentar un espejo de la naturaleza. Tal vez las épocas posteriores entendieron mal esta frase, pues el espejo del arte nunca ha sido una mera imitación servil de las formas y los gestos de la naturaleza. Siempre se trató de un espejo que evoca a Alicia en el País de las Maravillas, tan lleno de juego e incertidumbre como la naturaleza misma, un espejo que revive en formas nuevas la antigua tensión entre el orden y el caos. Posiblemente, en las bifurcaciones que conducen a nuestro futuro, la ciencia y las instituciones sociales se unan con las artes para presentar a nuestro universo turbulento un espejo turbulento y juguetón. Tal vez, por lo que hemos visto en este libro, ese movimiento ya está comenzando.

INTRODUCCIÓN

La humanidad se acerca deprisa a un punto de bifurcación. Durante este siglo, los supuestos reduccionistas llevaron a los científicos a las honduras del átomo, donde liberaron las pavorosas fuerzas nucleares que podrían ser nuestra condenación. Sin embargo, la exploración del reduccionismo en el corazón del átomo también liberó importantes intuiciones en los límites del reduccionismo. Las paradojas de la teoría cuántica revelaron a los científicos la misteriosa "totalidad cuántica", cuyas vastas implicaciones apenas se empiezan a explorar. Pero la mayoría de los físicos, entretanto, llevan a cabo el programa reduccionista como si nada hubiera cambiado. Construyen aceleradores cada vez más grandes y poderosos buscando los ladrillos de la naturaleza: quarks, gluones y la potencial fuerza primordial que generó el universo.

En la biología molecular, el enfoque reduccionista de dividir la realidad en partes constitutivas y ensamblarla según nuestras necesidades y caprichos conduce ahora a una revolución biotecnológica. Con los recientes descubrimientos genéticos, los científicos están llegando rápidamente a la posibilidad de rediseñar los organismos existentes para crear otros nuevos, introduciendo la perspectiva que un día transformará el planeta en un hábitat poblado por nuestras propias criaturas. Alentados por nuestros conocimientos genéticos, tal vez pronto sintamos la tentación de intervenir en nuestra propia evolución.

La naturaleza controlada por el pensamiento humano es la esencia del sueño reduccionista. Es un sueño que persiste a pesar de sus evidentes fracasos. La orientación que trata cada sistema como mecánico, constituido por partes y aislado de otros sistemas, ha generado una tecnología tan poderosa que domina el mundo. Pero un subproducto directo de esa tecnología es la distorsión del ambiente planetario, incluyendo el vaciamiento del ozono estratosférico y la acumulación de gases mediante el efecto invernáculo. Muchos científicos predicen que estos aspectos de la tecnología y el progreso producirán desastres ecológicos y el caos para nuestra especie. Pero el sueño reduccionista no se inmuta. En un mundo mecánico, la ciencia reduccionista puede "arreglar" lo que arruina. Así se elevan propuestas para arrojar ozono congelado a la atmósfera para reparar el daño.

Contra esta tendencia surge la joven ciencia del caos, la totalidad y el cambio, una nueva insistencia en las interrelaciones, una conciencia de la imprevisibilidad esencial de la naturaleza y de las incertidumbres de nuestras descripciones científicas.

Entre la perspectiva holística y la reduccionista, ¿por cuál optaremos? Tal vez una medida del creciente conflicto esté dada en el grado en que la posición reduccionista se ha apropiado del lenguaje holístico. Ahora es común que los científicos hablen de realidad "perspectiva" y no de realidad objetiva, de "posibilidades creativas" y no de causalidad, de "escenarios probables" y no de

resultados deterministas, de "modelos útiles" y no de verdades permanentes. Aunque dicho lenguaje puede parecer holístico, no es necesariamente así. Jeremy Rifkin observa:

> A primera vista, términos como "perspectiva", "escenarios", "modelos" y "posibilidades creativas" parecen indicar una nueva conciencia humana de nuestras limitaciones, de nuestra incapacidad para aprehender o comprender plenamente las verdades del universo. No es así. La nueva jerga cosmológica no nace de la humildad sino del engreimiento. Cuando miramos con más atención, el nuevo vocabulario de pronto cobra un aspecto totalmente nuevo, tan amenazador como deletéreo. Perspectivas, escenarios, modelos, posibilidades creativas. Son palabras de autor, las palabras de un creador, un arquitecto, un diseñador. La humanidad está abandonando la idea de que el universo opere mediante verdades de hierro porque ya no siente la necesidad de estar limitada por esos grillos. La naturaleza es creada de nuevo, esta vez por los seres humanos.

Así, el nuevo vocabulario holístico puede ocultar un impulso reduccionista tradicional, el impulso de alguien que ensambla y manipula partes. La apropiación del lenguaje indica que el instinto reduccionista de las ciencias es poderoso, tanto que es casi imposible concebir las ciencias sin ese afán de llegar al fondo absoluto de las cosas, de hallar esa parte absoluta, de detectar la base absoluta de las formas.

Pero el impulso holístico de las ciencias también es poderoso, un reflejo del impulso reduccionista. Un científico puede buscar la parte absoluta porque anhela ver las interrelaciones del todo. El deseo de hallar una respuesta reduccionista a menudo va acompañado por la necesidad de tener un misterio en el cual trabajar. La diferencia entre reduccionismo y holismo es en gran medida una cuestión de énfasis y actitud. Pero en última instancia esa diferencia es todo.

En los años venideros, la creciente lucha entre el reduccionismo sin ataduras y la actitud representada por la ciencia de la turbulencia tendrá un desenlace. Los términos utilizados por los defensores de ambos enfoques no siempre distinguirán su posición; los problemas que los dividan no siempre serán claros, pero con el tiempo se dará respuesta a la pregunta. ¿Llevaremos el reduccionismo hasta el sueño extremo (y tal vez el engaño extremo) de transformar la naturaleza en una mera extensión del pensamiento humano? ¿O entraremos en el espejo turbulento abrazando nuestras limitaciones y confesando nuestras dependencias?

Si entramos en el espejo, ¿qué encontraremos? Obviamente, nadie lo sabe. Las ideas científicas de cooperación y de imprevisibilidad inherente podrían conducirnos hacia realidades no soñadas y actividades inauditas. Incluso es posible que estas realidades turbulentas sean más dramáticas que los futuros de ciencia ficción que nos promete la perspectiva reduccionista. O tal vez la nueva realidad se manifieste principalmente en nuestro cambio de actitud.

¿Podría ser una actitud como la que ha adoptado la genetista Barbara McClintock ante su trabajo? "Básicamente todo es uno", dice McClintock. "No hay modo de trazar una frontera entre las cosas. Lo que hacemos [normalmente] es trazar

subdivisiones, pero no son reales." Aunque McClintock llegó a esta percepción de la unidad concentrándose en partes (particularmente en el cromosoma) con un fervor casi reduccionista, su enfoque no es reduccionista ni "objetivo" en el sentido tradicional. "Descubrí que cuanto más trabajaba con ellos, más grandes se volvían [los cromosomas], y cuando estaba trabajando de veras con ellos no estaba afuera, sino allí adentro. Yo formaba parte del sistema." Como un sabio taoísta, tal vez como un taoísta Emperador Amarillo, McClintock ejerce una actitud irónica: reduccionista y holista a la vez, intenta llegar al fondo de cosas que, como bien sabe, no tienen fondo. En su percepción de la totalidad, que ella llama "una sensibilidad hacia el organismo", se regodea en las incertidumbres, las interrelaciones y las dependencias mutuas que impregnan la naturaleza. Su biógrafa describe su "acceso *a* la profunda conectividad de todas las formas biológicas, de la célula, del organismo, del ecosistema. El anverso de la moneda es su convicción de que, sin conciencia de la unidad de las cosas, la ciencia sólo nos puede dar una naturaleza en pedazos; con más frecuencia sólo nos da pedazos de naturaleza. A juicio de McClintock, una cerrada confianza en la metodología científica invariablemente nos crea problemas. "Hemos desquiciado el ambiente y pensábamos que estábamos bien, porque usábamos las técnicas de la ciencia. Luego se transforma en tecnología y nos devuelve la bofetada porque no reflexionamos sobre las consecuencias. Adoptábamos supuestos que no teníamos derecho a adoptar. Desde el punto de vista de cómo funcionaba todo, sabemos cómo funcionaba una parte... Ni siquiera preguntamos, ni siquiera vimos cómo andaba el resto. Todas esas otras cosas estaban pasando y ni siquiera lo vimos."

McClintock evidentemente ha entrado por el espejo turbulento en un universo más vasto, más complejo, más fluido, menos seguro y en cierto sentido más temible que el que nos pintaba la ciencia reduccionista. Pero, en otro sentido, parece saber que el universo turbulento no es nada de esto; es un sitio hospitalario porque allí todos estamos juntos.

INTRODUCCIÓN

Si *alguna vez me cayera … ¿Qué quedará de mí? … Nadie sabe cómo ocurrió, y el* Rig Veda *sugiere que es posible que ni siquiera el Único lo sepa … interrumpió Alicia, con cierta imprudencia … No como el Caos, aglomerado y magullado, mas como el mundo, armónicamente confundido: en el cual vemos orden en la diversidad, y en el cual todo congenia aunque todo difiera … Alicia apenas pudo contener la risa …*

BIBLIOGRAFÍA

A continuación citamos algunas de las fuentes que utilizamos para escribir este libro. Se trata de una lista de sugerencias que no pretende agotar el creciente cuerpo de literatura científica y de divulgación que abarca los tópicos comentados en *Espejo turbulento.*

Todos los epígrafes relacionados con el Emperador Amarillo provienen de dos fuentes: (1) *The Book of Lieh-tzu,* traducción inglesa de A. C. Graham, Londres, John Murray, 1960; y (2) *The Complete Works of Chuang Tzu,* traducción inglesa de Burton Watson, Nueva York, Columbia University Press, 1968.

El epígrafe de Campbell pertenece al libro que escribió en colaboración con Bill Moyers, *The Power of Myth,* Nueva York, Doubleday, 1988.

El epígrafe de Pope pertenece a su "Essay on Man".

El epígrafe de Stevens pertenece a su poema "Connoisseur of Chaos".

INTRODUCCIÓN

Briggs, John, y E David Peat: *Looking Glass Universe,* Nueva York, Simón & Schuster, 1984. [Hay versión en castellano: *A través del maravilloso espejo del universo,* Barcelona, Gedisa, 1989.]

Gleick, James: *Chaos: Making a New Science,* Nueva York, Viking, 1987.

Kneale, Dennis: "Market Chaos: Scientists Seek Pattern in Stock Prices", en *Wall Street Journal,* 17 de noviembre de 1987.

Prólogo Una antigua tensión

Beir, Ulli (comp.): *The Origin of Life and Death,* Londres, Heinemann, 1966.

Colum, Padraic: *Myths of the World,* Nueva York, Grosset & Dunlap, 1959.

Disorder and Order: Proc. Stanford Int. Symp. (14-16 de setiembre de 1981), Stanford Literature Studies 1, Saratoga, California, Anima Libri, 1984.

Long, Charles H.: *Alpha: The Myths of Creation,* Nueva York, George Braziller, 1983.

Richardson, George P: "The Feedback Concept in American Social Science with Implications for Systems Dynamics", *Int. Systems Dynamics Conf*., julio 1983.

Weiner, Philip, (comp.): *Dictionary of the History of Ideas,* Nueva York, Charles Scribner's Sons, 1973.

Capítulo 1 Atractores y mapas de lectura

Abraham, Ralph H. y Christopher D. Shaw: *Dynamics - The Geometry of Behavior, Part 1: Periodic Behavior,* Santa Cruz, Aerial Press, 1984.

Abraham, Ralph H. y Christopher D. Shaw: *Dynamics - The Geometry of Behavior, Part 2: Chaotic Behavior,* Santa Cruz, Aerial Press, 1984.

Arnold, V. I.: "Small Denominators and Problems of Stability of Motion in Classical and Celestial Mechantes", *Russ. Math. Suru.* 18 (1963): 85.

Goldstein, Herbert: *Classical Mechanics,* Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1950.

Kolmorogov, A. N.: "Preservation of Conditionally Periodic Movements with Small Change in the Hamiltonian Function", *Lecture Notes in Phys.* 93 (1979): 51.
Leung, A.: "Limiting Behavior foir a Prey-Predator Model with Diffusion and Crowding Effects", *Jour. Math. Biol. 6* (1978): 87.
Smith, J. Maynard: *Models in Ecology,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1974.
Smith, J. Maynard: "The Theory of Games and the Evolution of Animal Conflicts", *Jour. Theor. Biol* 47 (1974): 209.
Walker, Grayson H., y Joseph Ford: "Amplitude Instability and Ergodic Behavior for Conservativa Nonlinear Systems", *Phys. Rev.* 188 (1969): 87.

Capítulo 2 La turbulencia, ese atractor extraño

Hammer, Signe, y Margaret L. Silbar: "The Riddle of Turbulence", *Science Digest,* mayo 1984.
Hénon, Michel: "A Two-dimensional Mapping with a Strange Attractor", *Commun. Math. Phys,* 130 (1976): 69.
Hopf, E.: "A Mathematical Example Displaying Features of Turbulence", *Comm. Puré Appl. Math.* 1 (1948): 303.
Landau, L. D.: *On the Problem of Turbulence: Collective Papers of L. D. Landau,* trad. ing. D. ter Haar, Nueva York, Pergamon, 1965.
Lorenz, Edward N.: "Deterministic Nonperiodic Flow", *Jour. Atmospheríc Sciences* 20 (1976): 69.
Lorenz, Edward N.: "The Mathematics of Mayhem", *The Economist,* 8 de setiembre de 1984.
Reiter, Carla: "The Turbulent Nature of a Chaotic World", *New Scientist,* 31 de mayo de 1984.
Ruelle, David y Floris Takens: "On the Nature of Turbulence", *Commun. Math. Phys.* 20 (1971): 167.

Capítulo 3 La extraña ruta de la duplicación

Feigenbaum, Mitchell J.: "Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations", *Jour. Statistical Phys.* 19 (1978): 25.
Hirsch, J. E., B. A. Huberman y D. J. Scalapino: "Theory of Intermittency", *Phys. Rev.* 25 (1982): 519.
Jensen, Roderick B.: "Classical Chaos", *American Scientist,* marzo-abril 1987.
Marcoff, John: "In Computer Behavior, Elements of Chaos", *New York Times,* 11 de setiembre de 1988.
May, Robert M.: "Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics", *Nature* 261 (1976): 459.
Saperstein, Alvin M.: "Chaos — A Model for the Outbreak of War", *Nature* 309 (1984).
Screenivasan, K. R. y R. Ramshankar: "Transition Intermittency in Open Flows and Intermittency Routes to Chaos", *Physica* 23D (1986): 246.
Taubes, Gary: "Mathematics of Chaos", *Discover,* setiembre 1984.

Capítulo 4 Magia iterativa

Chaitin, Gregory J.: "Gódel's Theorem and Information", *Int.*

Jour. Theor. Phys. 21, N° 12 (1982): 94.
Crutchfield, James R, J. Doyne Farmer, Norman H. Packard y Robert Shaw: "Chaos", *Scientific American,* diciembre 1986.
Day, Richard H.: "The Emergence of Chaos from Classical Economic Growth", *Quart. Jour. Econ.,* mayo 1983.
Day, Richard H.: 'Irregular Growth Cycles", *The American Econ. Rev.,* junio 1982.
Hofstadter, Douglas R.: *Godel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid,* Nueva York, Vintage Books, 1980.

CAPITULO o En ambos lados/Lados ambos en

Batty, Michael: "Fractals — Geometry Between Dimensions", *New Scientist,* 4 de abril de 1985.
Batty, Michael: *Microcomputer Graphics,* Londres, Chapman and Hall Computing, 1987.
Barcellos, Anthony: entrevista con Benoit Mandelbrot, en Donald J. Albers y G. L. Alexanderson (comps.): *Mathematical People: Profiles and Interviews,* Boston, Birkhauser, 1985.
Gleick, James: "The Man Who Reshaped Geometry", *New York Times Magazine,* 8 de diciembre de 1985.
Dewdney, A. K.: "Computer Recreations", *Scientific American,* agosto 1985.
Kalikow, Daniel N.: *David Brooks Investigation of the Mandelbrot Set,* Monografía, Framingham, Massachusetts, Prime Computer, 1985.
La Brecque, Mort: "Fractal Simmetry",*Mosaic,* enero-febrero 1985.
Lorenz, Konrad: *On Aggression,* trad. ing. M. K. Wilson, Nueva York, Harcourt, Brace & World, 1966.
Mandelbrot, Benoit: *The Fractal Geometry of Nature,* San Francisco, W. H. Freeman, 1982.
Mandelbrot, Benoit: "The Many Faces of Scaling, Fractals, Geometry of Nature, and Economics", en William C. Schieve y Peter M. Alien (comps.): *Self Organization and Dissipative Structures,* Austin, University of Texas, 1982.
Mandelbrot, Benoit: entrevista, *Omni,* febrero 1984.
Mandelbrot, Benoit, Dann E. Passoja y Alvin J. Paullay: "Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals", *Nature* 308 (1984): 721.
Peterson, Ivars: "Packing It In", *Science News, 2* de mayo de 1987.
Peitgen, H. O. y P. H. Richter: *The Beauty of Fractals,* Berlín, Springer-Verlag, 1986.
Poston, Tim, y lan Stewart: *Catastrophe Theory and* its *Applications,* Boston, Pitman, 1981.
Ruelle, David: "Strange Attractors", *Math. Intell 2* (1980): 126.
Saunders, P. T.: *An Introduction to Catastrophe Theory,* Cambridge, Cambridge University
Press, 1980. Shannon, C. E. y W. Weaver: *The Mathematical Theory of Information,* Urbana, University of Illinois Press, 1949.
Thom, Rene: *Structural Stability and Morphogenesis,* trad. ing. D. H. Fowler, Reading, Massachusetts, Benjamín, 1975.
Thompson, D'Arcy: *On Growth and Form,* Cambridge, Cambridge University Press, 1917.
Ullman, Montague: "Wholeness and Dreaming", en Basil Hiley y F. David Peat (comps.): *Quantum Implications,* Londres, Routledge and Kegan Paul, 1987.

Vilenkin, N. Ya: *Stories About* Seis, Nueva York, Academic Press, 1965.
West, Bruce J. y Ary L. Goldberger: "Physiology in Fractal Dimensions", *American Scientist,* julio-agosto 1987.
Zeeman, E. C.: *Catastrophe Theory,* Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1977.

Capítulo 4 La gran ola

Bishop, A. R. y T. Schneider: *Solitons and Condensed Matter Physics,* Nueva York, Springer-Verlag, 1978.
Dodd, R. K., J. C. FJibeck, J. D. Gibbon y H. C. Morris: *Solitons and Nonlinear Wave Equations,* Nueva York, Academic Press, 1982.
Fermi, Enrico, J. Pasta y S. Ulam: "Studies of Nonlinear Problems", reimp. en E. Segre (comp.): *Collected Papers of Enrico Fermi,* vol. 2, Chicago, University of Chicago Press, 1965.
Frampton, Paul H.: "Vacuum Instability and Higgs Scalar Mass", *Phys. Rev. Lett,* 37 (1976):1378.
Frampton, Paul H.: "Consequences of Vacuum Instability in Quantum Field Theory", *Phys. Rev. Lett.* D15 (1977):2922.
Ingersoll, Andrew P.: "Models of Jovian Vórtices", *Nature* 331 (1988):654.
Lee, T. D.: *Particle Physics and Introduction to Field Theory,* Suiza, Harwood Academic Pubs, 1981.
Lonngren, Karl y Alwyn Scott (comps.): *Solitons in Action,* Nueva York, Academic Press, 1978.
Russell, J. Scott: "Report on Waves", *Report Brit. Assn. Advancement Sci.* 1945.
Takeno, S., (comp.): *Dynamical Problems in Soliton Systems,* Nueva York, Springer-Verlag, 1985.
Yuan, H. C. y B. M. Lake: "Nonlinear Deep Waves", en B. Kursunoglu, A. Perlmutter y L. F. Scott (comps.): *The Significance of Nonlinearity in Natural Sciences,* Nueva York, Plenum, 1977.

Capítulo 3 La flecha del tiempo

Engel, Peter: "Against the Currents of Chaos", Rev. of *Order Out of Chaos.* The Sciences, setiembre-octubre 1984.
Davies, Paul: *The Physics of Time Asimmetry,* Londres, Surrey University Press, 1974.
Landsberg, P. T.: *Thermodynamics,* Nueva York, Interscience, 1961.
Pagels, Heinz R.: "Is the Irreversibility We See A Fundamental Property of Nature?" Rev. of *Order Out of Chaos,* Phys. Rev. enero 1985.
Penrose, Oliver: "Improving on Newton" Rev. of *Order Out of Chaos, Nature,* 26 de julio de 1984.
Prigogine, Ilya: *From Being to Becoming,* San Francisco, W. H. Freeman, 1980.
Prigogine, Ilya: entrevista con los autores, Universidad de Texas en Austín, 27-29 de abril de 1985.
Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers: *Order Out of Chaos,* Toronto, Bantam Books, 1984.
Prigogine, Ilya y Y. Elskens: "From Instability to Irreversibility", *Proc. Nati. Academy of Sci.* 83 (1986)5756.

Capítulo 2 Triunfos de la realimentación

Augros, Robert y George Stanciu: *The New Biology: Discovering the Wisdom of Nature,* Boston, Shambhala, 1987.
Bergström, R. M.: "An Analysis of

the Information-carrying System of the Brain", *Synthese* 17 (1967): 425.
Bergström, R. M.: "An Entropy Model of the Developing Brain", *Developmental Psychobiology* 2 (3): 139.
Bergström, R. M.: "Quantitative Aspects of Neural Macrostates", *Cybernetic Medicine* (1973):9.
Bertalanffy, Ludwig von: *General System Theory,* Nueva York, George Brasiller, 1968.
Büttner, Peter: "What Is Systems Thinking?" *The Brattlebow Bulletin,* julio 1985.
Cairns, J., J. Oberbaugh y S. Miller: "The Origin of Mutants", *Nature* 335 (1988):142.
Capra, Fritjof: *The Turning Point,* Toronto, Bantam, 1982.
Chandler, David L.: "Rethinking Evolution", *Boston Globe,* 28 de julio de 1986.
Edelman, Gerald: "Group Selection as the Basis for Higher Brain Function", en F. O. Schmitt y otros (comps.): *The Organization of the Cerebral Cortex,* Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1983.
Ellis, William: "Transnational Networks and World Order", *Transnational Perspectivas 8,* N°4(1982):9.
Fairfield, Roy: *Person-Centered Gradúate Education,* Buffalo, Prometheus 1977.
Fleischaker, Gail R.: *Autopoiesis: System Logic of the Origin and Diversity of Life,* tesis doctoral, Boston University, 1987.
Freeman, Walter J.: "Physiological Basis of Mental Images", *Biol. Psychiatry* 18, N° 10 (1983): 1107.
Freeman, Walter J. y Christine A. Skarda: "Spatial EEG Patterns, Nonlinear Dynamics and Perception: The Neo-Sherrington View", *Brain Research Rev.* 10 (1985):147.
Ferguson, Marilyn: *The Aquarian Conspiracy, Los* Angeles, Tarcher, 1980.
Forrester, Jay: *Urban Dynamics,* Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1969.
Forrester, Jay: "Common Foundations Underlying Engineering Management", The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Impresión de una charla.
Fox, Jeffrey L.: "The Brain's Dynamic Way of Keeping in Touch", *Science,* agosto 1984.
Gardner, Howard: *The Mind's New Science,* Nueva York, Basic Books, 1985.
Garfinkel, Alan: "A Mathematics for Physiology", *American Physiological Society,* 1983.
Gray, William: "Understanding Creative Thought Process: An Early Formulation of the Emotional-cognitive Structure Theory", *Man-Environment Systems* 9, N^B 1 (1979).
Globus, Gorden G.: "Three Holonomic Approaches to the Brain", en Basil Hiley y F. David Peat (comps.): *Quantum Implications,* Londres, Routledge and Kegan Paul, 1987.
Gould, Stephen Jay: "Kropotkin Was No Crackpot", *Natural History* (1988):12-21.
Harley, Richard: "Global Networks: Trading Recipes and Technologies from Maine to Nepal", *Christian Science Monitor, 7* de octubre de 1982.
Henderson, Hazel: *The Politics of the Solar Age,* Carden City, Nueva York, Doubleday, 1981.
Hofstadter, Douglas R.: *Metamagical Themas: Questing for the Essence of Mina and Pattern,* Toronto, Bantam, 1985.

Hooper, Judith y Dick Teresi: *The 3-Pound Universa,* Nueva York, Macmillan, 1986.
Jantsch, Erich: *The Self-Organizing Universe,* Oxford, Pergamon, 1980.
Johnson, George: "Learning, then Talking", *New York Times,* 16 de agosto de 1988.
Joseph, Laurence E.: "Britain's Whole Earth Gurú", *New York Times Magazine, 2* de noviembre de 1986.
Keller, Evelyn Fox: *A Feeling for the Organism,* Nueva York, W. H. Freeman and Co, 1983.
King, Roy, Joachim D. Ráese y Jack Barchas: "Catastrophe Theory of Dopaminergic Transmission: A Revised Dopamine Hypothesis of Schizophrenia", *Jour. Theoretical Biol.* 92 (1981):373.
LaViolette, Paul A.: "Thoughts About Thoughts About Thoughts: The Emotional Perceptive Cycle Theory", *Man-Environment Systems 9,* N° 1 (1979).
Lipnack, Jessica y Jeffrey Stamps: *Networking: The First Report and Directory,* Carden City, Nueva York, Doubleday, 1982.
Lovelock, J. E.: *Gaia: A New Look at Life on Earth,* Oxford, Oxford University Press, 1979.
Margulis, Lynn y Dorion Sagan: *Microcosmos,* Nueva York, Summit Books, 1986.
Meadows, Donella H. y otros: *The Limits to Growth,* Nueva York, New American Library, 1974.
Meadows, Donella H. y otros: "Whole Earth Models and Systems", *The Co-evolution Quarterly Report.* Reimpresión.
Miskin, Mortimer y Tim Appenzeller: "The Anatomy of Memory", *Scientific American,* junio 1987.
Mosekilde, Erik, Javier Aracil y Peter M. Alien: "Chaotic Behavior in Non-linear Dynamic Models". Manuscrito. Naisbitt, John: *Megatrends,* Nueva York, Warner, 1984.
Pagels, Heinz: *The Dreams of Reason,* Nueva York, Simón & Schuster, 1988.
Peat, F. David: *Artificial Intelligence,* Nueva York, Baen, 1988.
Peters, Thomas y Robert H. Waterman, hijo: *In Search of Excellence,* Nueva York, Harper & Row, 1982.
Peters, Thomas y Robert H. Waterman, hijo: *Thriving on Chaos: A Handbook for a Managerial Revolution,* Nueva York, Alfred A. Knopf, 1987.
Rosenfield, Israel: "Neural Darwinism: A New Approach to Memory and Perception", *New York Rev. of Books,* 9 de octubre de 1986.
Senge, Peter M.: "Systems Dynamics, Mental Models and the Development of Management Intuition", *Int. System Dynamics* Con/., julio 1985.
Senge, Peter M.: "Systems Thinking in Business: An Interview with Peter Senge", *Revisión 7,* Nª 2.
Senge, Peter M.: entrevistas con J. Briggs, MIT, Cambridge, Massachusetts, 4 de setiembre de 1986 y 8 de enero de 1987.
Sterman, John D.: "Deterministic Chaos in Models of Human Behavior: Methodological Issues and Experimental Results". Manuscrito.
Tank, David W. y John J. Hopfield: "Collective Computation in Neuronlike Circuits", *Scientific American,* diciembre 1987.

Theobald, Robert: *The Rapids of Change,* Indianápolis, Knowledge Systems, 1987.
Várela, Francisco J.: *Principies of Biological Autonomy,* Nueva York, North Holland, 1979.
Weiner, Jonathan: "In Gaia's Carden", *The Sciences* (enero-febrero 1986) 2.
Weisburd, Stefi: "Neural Nets Catch the ABCs of DNA", *Science News,* 1° de agosto de 1987.
Young, J. C.: "Hunting the Homunculus", *New York Rev. of Books,* 4 de febrero de 1988.

Capitulo 1 Raíces cuánticas de lo extraño

Bohm, David, B. Hiley y T. N. Kaloyerou: "An Ontological Basis for Quantum Theory".

ILUSTRACIONES

Todos los encabezamientos de capítulo fueron diseñados por Cindy Tavernise.

FRONTISPICIO

Cindy Tavernise

Prólogo

P.1 Detalles de Ch'en Jung, *Nueve dragones;* Francis Gardner Curtis Fund; cortesía del Museo de Bellas Artes, Boston.
P.2 Cortesía Norman J. Zabousky, reproducido de *Physics Today,* © 1984.
P.3 Cindy Tavernise
P.4 Cindy Tavernise

Capítulo 1

1.1 Cindy Tavernise
1.2 Cindy Tavernise
1.3 Cindy Tavernise
1.4 Cindy Tavernise
1.5 Cindy Tavernise
1.6 Cindy Tavernise
1.7 Cindy Tavernise
1.8 Cindy Tavernise
1.9 Cindy Tavernise
1.10 Cindy Tavernise
1.11 Cindy Tavernise
1.12 Cindy Tavernise
1.13 Cindy Tavernise
1.14 Cindy Tavernise
1.15 Cindy Tavernise
1.16 Cindy Tavernise
1.17 Cindy Tavernise
1.18 Cindy Tavernise
1.19 Cindy Tavernise
1.20 Cindy Tavernise
1.21 Cortesía Laboratorio de Propulsión de Chorro, Pasadena, California.

Capítulo 2

2.1 Cindy Tavernise
2.2 Castillo de Windsor, Librería Real, © Her majesty Queen Elizabeth II
2.3 Cindy Tavernise
2.4 Cindy Tavernise
2.5 Cindy Tavernise
2.6 Cindy Tavernise
2.7 Cindy Tavernise
2.8 Cindy Tavernise
2.9 Cindy Tavernise

Capítulo 3

3.1 Cindy Tavernise
3.2 Cindy Tavernise
3.3 Cindy Tavernise
3.4 Cindy Tavernise
3.5 Cindy Tavernise
3.6 Cindy Tavernise
3.7 Cindy Tavernise
3.8 Leo Kadanoff, de *Physics Today,* ©1983
3.9 Cortesía Roderick V. Jensen, reproducido de *American Scientist,* © 1987; dibujo de Cindy Tavernise
3.10 Cortesía Roderick V. Jensen, reproducido de *American Scientist,* © 1987

Capítulo 4

4.1 Cindy Tavernise
4.2 Cindy Tavernise
4.3 James Crutchfield
4.4 Douglas Smith, Museo de Ciencias de Boston
4.5 Cindy Tavernise, según gráficos realizados por James Crutchfiel

4.6 Cindy Tavernise

Alicia en doble página

Cindy Tavernise

CAPITULO O

0.1 Cindy Tavernise
0.2 Cindy Tavernise
0.3 Cindy Tavernise
0.4 Cortesía Roderick V. Jensen, reproducido de *American Scientist,* © 1987
0.5 Cortesía de Benoit Mandelbrot, investigación de IBM
0.6 Cortesía de Benoit Mandelbrot, investigación de IBM
0.7 Cindy Tavernise
0.8-0.18 Estas ilustraciones fueron realizadas en un semiminiordenador Prime 9955 y trasladadas a imagen de media tinta de 300 dpi (puntos por imagen) vía PostScript en una impresora Apple LaserWriter. Se efectuó un cómputo de Conjunto de Mandelbrot para cada uno de los 90.000 puntos por pulgada cuadrada de estas imágenes. Se las reproduce aquí con la amable autorización de Prime Computer Inc., Natick, Massachusetts, y los creadores de este proceso en Prime: David Brooks y Dan Kalikov. Técnica de imágenes, © Prime Computer Inc.
0.19 Cindy Tavernise
0.20 Cindy Tavernise usando gráficos realizados por Roderick V. Jensen, reproducido de *American Scientist,* © 1987, y Leo Kadanoff de *Physics Today,* © 1983
0.21 Cortesía H-O. Peitgen y P. H. Richter, reproducido de *The Beauty of Fractals,* Sprínger-Verlag, Heidelberg, © 1986.
0.22 Cindy Tavernise
0.23 Douglas Smith, Museo de Ciencias de Boston
0.24 Cortesía de Michael Batty, reproducido de su *Microcomputer Graphics,* Chapman and Hall Computing, y *New Sientist,* © 1985.
0.25 Cortesía de Michael Batty, reproducido de su *Microcomputer Graphics,* Chapman and Hall Computing, y *New Sientist,* © 1985.
0.26 Reproducido con autorización del Museo Británico
0.27 Katsushika Hokusai, *La gran ola,* colección Spaulding, cortesía del Museo de Bellas Artes de Boston

Alicia en doble página invertida

Cindy Tavernise

Capítulo 4

4.1 Cindy Tavernise
4.2 Cindy Tavernise
4.3 Cindy Tavernise
4.4 Laboratorio de Propulsión de Chorro, Pasadena, California
4.5 Cindy Tavernise
4.6 Cindy Tavernise
4.7 Cindy Tavernise
4.8 NASA

Capítulo 3

3.1 John Briggs y F. David Peat, reproducido de *Looking Glass Universe*

3.1B,C Agradecemos al doctor Ralph Abraham por las ilustraciones del flujo de Bénard. Están tomadas de su *Dynamics: The Geometry of Behavior: Chaotic Behavior,* publicado por Aerial Press Inc.

3.2 Cindy Tavernise

3.3 Cindy Tavernise

3.4 Fotografías de Fiz Goro, de *Being to Becoming* de Ilya Prigogine, © 1980 W. H. Freemand and Company; reproducidas con autorización

3.5 Cortesía de los Observatorios de Astronomía Óptica Nacionales

3.6 John Briggs

3.7 Cindy Tavernise

Capítulo 2

2.1 Cindy Tavernise, siguiendo a Lynn Margulis

2.2 Cindy Tavernise, siguiendo a John Lovelock

2.3 Cindy Tavernise, siguiendo a Erich Jantsch

2.4 Cindy Tavernise, siguiendo a Matti Bergström

2.5 Cindy Tavernise, siguiendo a Michael Merzenich

2.6 Cindy Tavernise, siguiendo a Peter Senge

Capítulo 1

1.1 Cindy Tavernise

Prólogo

P.1 James Crutchfield

P.2 Reproducido con autorización de Sterling Lord Literistic, Inc., © 1964 by Arthur Koestler

P.3 Reproducido con autorización de Sterling Lord Literistic, Inc., © 1964 by Arthur Koestler

P.4 Cindy Tavernise

P.5 Museo Metropolitano de Arte, Nueva York, donación de Benjamín Altman, 1913. Todos los derechos reservados, The Metropolitan Museum of Art

Finalispicio

Cindy Tavernise