

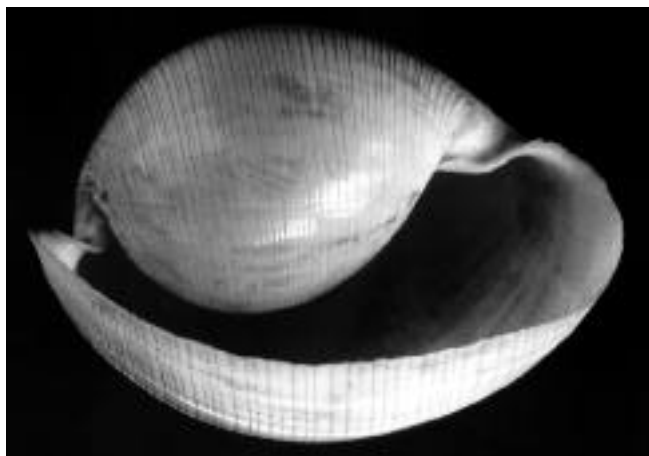
# Patrones y procesos en la naturaleza.



*Nada existe,  
sólo átomos y vacío.  
Todo lo demás  
son pareceres.*

DEMÓCRITO DE ABDERA

## La importancia de los protectorados



GERMINAL COCHO

PEDRO MIRAMONTES

De manera recurrente los científicos, en especial los físicos, han creído haber llegado a la frontera del conocimiento, a los límites del saber, y también de cuando en cuando han anunciado, como lo hizo Demócrito hace veinticinco siglos, que se ha llegado al fondo del pozo del conocimiento. En algunos medios de la física contemporánea la ecuación de Schrödinger es considerada como la herramienta capaz de describir cuanto ocurre en el universo (no relativista), y no es exagerado decir que tal afirmación es algo así como la *teoría de casi todo*. Sin embargo, aunque esta ecuación es correcta y bastante útil (su validez ha sido comprobada cotejando sus resultados para casos especiales con experimentos finísimos) no se puede resolver cuando el número de partículas llega a la docena. Entonces no tiene sentido tratar de resolver dicha ecuación para conglomerados grandes de átomos y ni soñar que se pudiese hacerlo para biomoléculas o algo más grande. Por lo tanto, resulta que *la ecuación de casi todo es la ecuación de casi nada*, puesto que no es capaz de decir algo acerca de las células, los organismos, los terremotos, los arcoiris, las sociedades ni de todo lo que parece ser interesante en escalas espaciales que no sean las submicroscópicas.

Tal parece que la naturaleza —como los enconados dioses de la mitología griega, que castigan al hambriento Tántalo alejando el alimento y la bebida cuando éste ya los tiene casi a su alcance— hace retroceder sus fronteras cuando en apariencia están próximas y siempre queda algo más por descubrir, lejos de nuestro alcance.

En 1972, Philip W. Anderson, Premio Nobel de Física, publicó un artículo en el cual llama la atención acerca de la futilidad de perseguir las leyes de lo fundamental, entendidas éstas como las leyes de lo más pequeño: “La capacidad de reducir todo a leyes fundamentales simples no garantiza la capacidad de reconstruir el universo a partir de esas leyes”. El

trabajo de Anderson es uno de los banderazos de salida hacia la búsqueda de otras leyes, de aquellas que surgen de la organización de la materia y que no se pueden deducir a partir de las de sus componentes.

Llama la atención que el afán en la búsqueda de los límites últimos mediante la reducción de los sistemas al estudio de sus partes se extiende también a otras ciencias, notablemente a la biología molecular. La complejidad del mundo vivo ha llevado a sus estudiosos a adoptar la estrategia que privilegia el estudio de las partes en perjuicio de la totalidad. No es que este enfoque sea indebido; de hecho, ha demostrado su poder en la biología molecular y en la biotecnología (lo mismo que la física lo ha hecho en la mecánica cuántica), pero es en la ciencia de la vida en donde la observación de Anderson tiene un impacto mayor. En efecto, lo que en física ha sido la reducción de fenómenos al estudio de las partículas elementales, en la biología lo ha sido a los genes. Como muestra podemos citar la expresión eufórica de Walter Gilbert (Premio Nobel de Química en 1980) acerca de la perspectiva de que la genética molecular cuente con el genoma humano completo (la lista ordenada de todas las bases nitrogenadas —A, C, G y T— que forman el ADN): “La secuenciación completa del ser humano es el grial de la genética humana. Toda la información posible acerca de la estructura humana será revelada —aunque no comprendida”.

Podemos notar que a veinticinco siglos de distancia la afirmación de Gilbert es equivalente a la de Demócrito. Anderson nos previene que el camino inverso a la reducción no garantiza la extrapolación de los resultados de un nivel de organización de la materia a los niveles superiores de organización de la misma. A nosotros nos parece evidente que el solo conocimiento de todos los genes del ser humano no permitirá comprender gran cosa de las funciones del mismo. La imagi-

nación, los sueños, las sonrisas y el amor no podrán ser entendidos a partir del conocimiento de todos los genes, de la misma manera que la ecuación de Schrödinger no sirve para entender a tales genes.

### No hagas nada sin protección

En 1952, Arthur C. Clarke, muy conocido por ser el creador del relato que dio lugar a la famosa película de Stanley Kubrick *2001 Odisea en el espacio*, escribió en 1953 un cuento de tintes ominosos. Se trata de “Dial an F for Frankenstein”. En él, Clarke se imagina a nuestro planeta en el futuro hipotético de 1973, en el cual las redes de telecomunicaciones conectan prácticamente a todas las poblaciones sobre el planeta. En un momento dado, las autoridades internacionales ponen en funcionamiento un nuevo satélite de comunicaciones como culminación de la red mundial, y en la medianoche del día en el que la conexión se establece todos los teléfonos del mundo repican al unísono. Quienes descuelgan el aparato no escuchan más que un lamento tenebroso de ultratumba: es el llanto de un recién nacido que no es humano; es la red mun-

dial que nace como una inteligencia superior, que adquiere conciencia de sí misma y desarrolla pensamiento, ideas y sentimientos. El relato finaliza con la perdición de la humanidad.

Clarke se inspiró con seguridad en el sistema nervioso central. Aunque nadie sabe bien a bien de dónde salen las ideas, sentimientos, inteligencia y conciencia humanas, una idea muy generalizada, y posiblemente cierta, es que están distribuidas en todas partes y en ningún lado. Desde la Edad Media se sabe que el cerebro humano es el asiento de las facultades mentales (lo mismo sucede en muchos otros animales; los perros, por ejemplo, sueñan, tienen conciencia de su existencia y algunos rasgos innegables de inteligencia y sentimientos), pero fue hasta los principios del siglo XX cuando Santiago Ramón y Cajal estableció que la neurona es la unidad estructural básica del sistema nervioso central. Entonces, una colección de procesadores biológicos —las neuronas— interconectados, procesando e intercambiando información deben, de alguna manera, dar lugar a las funciones superiores del sistema nervioso central. Lo destacable del cuento de Clarke es ha-



ber señalado la posibilidad (en claro contraste con el programa científico reduccionista) de que estas funciones —imaginación, sentimientos, fantasías, etcétera— sean una consecuencia del *proceso de interacción* de los agentes que componen un sistema y no de la *naturaleza material* de los mismos.

También existe un relato angustioso de Boris y Arkadi Strogardski, una par de hermanos soviéticos que escribieron en las décadas de los sesentas y setentas algunas de las páginas más brillantes de la ciencia ficción como auténtico género literario. En su relato, una conciencia habita el interior de una caja llena de procesadores en paralelo y no sabe que no tiene cuerpo. Su creador le ha dotado de una memoria de un pasado inexistente pero factible y le ha convencido que es parapléjico y ciego. Él piensa que su sentido del oído son los impulsos eléctricos que le llegan a través de un micrófono conectado con el exterior. Es sobrecogedor. ¿Fantasía? ¿Pura imaginación? Veamos.

Todos somos testigos de que la turbulencia de algunos líquidos es independiente de la naturaleza material de los mismos, y que, sin embargo, sus manifestaciones son similares, muy parecidas o, de plano, las mismas: tanto el agua como la gasolina y el alcohol, por ejemplo, forman ondas, vórtices y remolinos esencialmente de la misma manera. De forma análoga, una computadora posee la capacidad de cómputo independientemente de que su CPU sea de microprocesadores de silicio, de transistores de germanio, de bulbos incandescentes o de engranes metálicos y palancas; en principio cualquier dispositivo, digital o analógico, que sirva como compuerta lógica puede ser la base de una computadora. Al igual que la turbulencia, la propiedad de cómputo es in-



dependiente de la naturaleza material de los agentes procesadores. En estos casos se dice que la turbulencia y el cómputo son propiedades *protegidas* de la materia, propiedades que no están codificadas en los componentes materiales (el bulbo no tiene implícito que va a ser usado para computar y no para reconstruir imágenes en una televisión; el alcohol no tiene un código que le preestablezca que va a terminar co-

mo un daiquirí en una fiesta o en la herida de un paciente).

En los protectorados, la conducta macroscópica se asocia con propiedades emergentes que no dependen de la naturaleza microscópica del sistema. Es una fortuna que existan los protectorados, pues de otra manera para entender el comportamiento de un sistema macro o mesoscópico habría que describir minuciosamente el comportamiento de cada uno de sus componentes. Por suerte, como lo mencionan Goldenfeld y Kadanoff en un bello ensayo de reciente aparición: “de otro modo, para modelar un *bulldozer* ¡necesitaríamos modelar los quarks que lo forman!”.

La materia se autoorganiza en niveles y escalas bien separados y distinguibles; por ejemplo, una escala de organización es la de los quarks, otra lo es la de los hadrones (neutrones y protones) y otra la de los átomos. No hay una organización en escalas intermedias. Es gracias a la existencia de estas escalas en los niveles de organización de la materia que la física misma existe; no podemos imaginarnos la ciencia tal como la conocemos si para estudiar cualquier cosa tuviéramos que ir a lo infinitamente pequeño de sus componentes. Si deseamos estudiar un litro de gas, la presión es una propiedad que no depende de si el gas es argón, nitrógeno o metano. Lo que sucede es que al elegir una escala para estudiar un fenómeno las interacciones subyacentes se promedian y no se manifiestan individualmente como tales, sino como un campo de fondo. La moraleja es que hay que elegir el nivel adecuado de descripción y análisis para entender un fenómeno: no tiene sentido resolver la ecuación de Schrödinger para estudiar por qué se funde un foco.



La física y la biología son ciencias de escalas, y no únicamente en la jerarquía de la organización de la materia sino también con respecto al espacio y al tiempo: la predicción climática es prácticamente imposible de una semana a la otra, pero las estaciones se suceden a lo largo de los años con gran parsimonia; un huracán es una estructura de hermosa regularidad cuando se fotografía desde un satélite; pero una paloma atrapada en medio de uno de ellos no piensa lo mismo. Como lo señala Octavio Miramontes, una hormiga tiene un comportamiento irregular y desordenado mientras que el colectivo de hormigas es una organización coherente y armónica.

El fondo del asunto es el estudio de las causas que hacen que existan los protectorados, ¿por qué la materia se organiza espontáneamente para dar lugar a toda una jerarquía de organización? ¿Por qué existe, por ejemplo, la superfluidez del helio (un estado que adopta cuando se enfría por debajo de la temperatura crítica de  $-270^{\circ}\text{C}$ ) si en los quarks no está preestablecido que deba de existir? ¿Por qué existen la imaginación y la fantasía humanas si en los genes no está escrito? La respuesta a estas interrogantes puede, a su vez, depender de otra cuestión. Sabemos que todos los electrones son idénticos entre sí, pues no hay manera de distinguir uno de otro; sin embargo, los átomos ya son distinguibles y se agrupan en cerca de una centena de tipos distintos (pero idénticos entre sí), diferenciados por sus propiedades que se resumen en la Tabla de Mendeléiev. Si seguimos escalando la ladera de las escalas de organización y, con ello, los diversos niveles de complejidad, llegamos a la situación en la que cada animal, en particular los humanos, es distinto a todos los demás, cada uno es un *individuo*—Paco es diferente de Ernesto. Por una parte, la complejidad aumenta y, por la otra, correlativamente, la semejanza se pierde. Así, la complejidad es el origen de la individualidad pero, paradó-

jicamente, se manifiesta únicamente bajo acciones colectivas. Aunque más que *paradójicamente*, deberíamos decir *dialécticamente*. Sin embargo, en estos tiempos de neoliberalismo en lo económico y de enajenación en lo educativo y cultural, dialéctica es una palabra que pasó de ser maldita durante la guerra fría a inexistente en nuestro mundo orweliano que ha encontrado en la televisión a su *big brother*.

### Un par de ejemplos

El concepto de protectorado es sumamente importante, ya que sin él no se comprende la organización de la materia que da lugar a estructuras discernibles y funcionales, por ello creemos importante agregar un par de ejemplos. La figura 1 contiene tres imágenes, una de bacterias *Bacillus subtilis*, otra es el crecimiento dendrítico de iones de zinc y la última es una fotografía de un amanecer sobre la cordillera de los Himalayas tomada desde un satélite; los tres patrones son idénticos, ya que poseen la misma caracterización matemática cualitativa (son fractales), y también lo son desde el punto de vista cuantitativo, pues tienen la misma dimensión fractal. Este ejemplo es rico en enseñanzas, ya que nos encontramos ante un mismo patrón de crecimiento macroscópico con mecanismos microscópicos tremendamente distintos. Eso, para empezar, es un buen ejemplo de protectorado, pues involucra tanto un caso extraído de la biología, otro de la física y un modelo

matemático. Dicho sea de paso, si no hubiera protectorados no existirían los modelos matemáticos, puesto que para construirlos tenemos que postular algunos supuestos o premisas que desdeñan la naturaleza íntima de los objetos a modelar. Pensemos en la situación en la que nos encontraríamos si para modelar la dinámica de una población o de una comunidad ecológica el color de los ojos de los individuos que componen los sistemas fuera relevante. Por otra parte, nos queda claro que en la organización espacial de las colonias de *Dicty* (como se le conoce a *Dictyostelium*) la contribución de los genes es irrelevante (una opinión contraria a la nuestra se encuentra en el artículo “The Development of Social Amoeba”, de R. H. Kessin y M. M. van Lookeren Campagne, en el número de noviembre-diciembre de 1992 de la revista *American Scientist*).

Nuestro último ejemplo, y confesamos que lo dejamos al final pues nos parece el más impresionante, es el tipo de protectorado que se puede estudiar en un cristal. Todos sabemos que un cristal es un sólido cuyos átomos se encuentran en una disposición espacial regular y simétrica. Gracias a esta uniformidad, en un cristal hace falta únicamente conocer una unidad geométrica elemental para reconstruir el cristal completo mediante su repetición monótona. En un cristal a muy baja temperatura se pueden desdeñar las oscilaciones de sus átomos y lo que queda es una malla regular estática. A esa situación le llamaremos “cristal congelado” o “cristal muerto”.

FIGURA 1



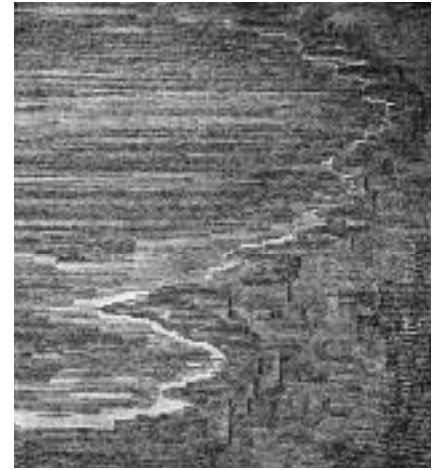
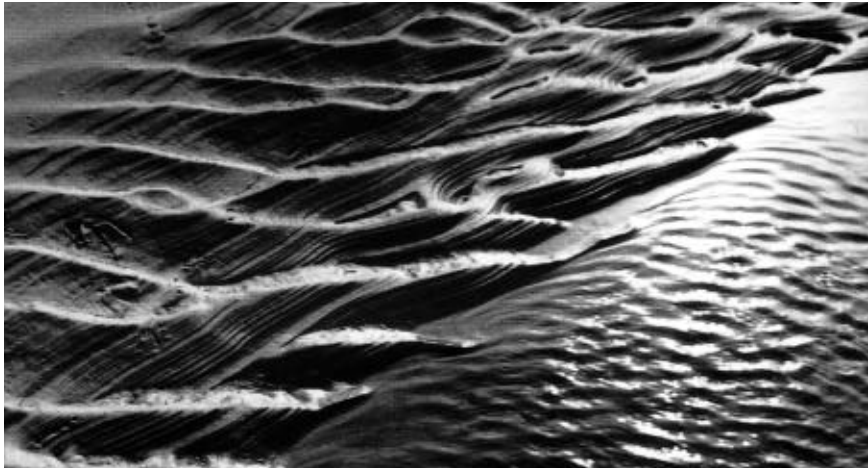
A menudo los cristales tienen defectos que pueden ser puntuales (un átomo faltante, un átomo extraño...) o bien dislocaciones de borde (la interrupción de un plano del cristal y a continuación la liga entre el plano vecino superior con el inferior). Estos defectos tienen características de partículas, pues se pueden mover e interactuar teniendo como escenario al cristal, que cada vez parece más "vivo". Lo interesante en verdad es notar que estos aspectos de los cristales tienen su contraparte tanto en el mundo de lo ultramicroscópico como a niveles cosmológicos. La teoría de las supercuerdas nos dice que, a niveles de la escala de Planck ( $10^{-33}$  centímetros), las partículas elementales no son entes puntuales sino cuerdas unidimensionales cuyos distintos modos de vibración dan lugar a todas las partículas, incluyendo a una que es la unidad cuántica de la gravitación (que no se ha encontrado aún, pues los aceleradores de partículas más poderosos en existencia únicamente tienen un poder de resolución de  $10^{-17}$  centímetros). Estas cuerdas se propagan e interactúan de la misma manera que lo hacen los defectos en los cristales. A escala cosmológica, en el límite de lo muy grande, el espacio puede presentar defectos topológicos como las cuerdas cósmicas: largas hebras o lazos de masa y energía que surgen de transiciones de fase en el universo temprano y se comportan de un modo análogo a las dislocaciones en los cristales. Se tienen, asimismo, defectos puntuales, como los monopolos magnéticos y bidimensionales, como las "paredes cósmicas".

Vemos pues cómo los aspectos importantes de multitud de fenómenos no dependen, o dependen poco, de los detalles particulares de la materia involucrada, por lo que pueden presentarse dinámicas similares en situaciones que son drásticamente diferentes, como sucede en el vacío en la teoría cuántica del campo, los defectos en los cristales o las vastedades del universo.

### Algo se ha roto...

Al proceso mencionado dos secciones arriba, aquél en el cual la homogeneidad del conjunto de elementos de un sistema se pierde, se le llama *ruptura de simetría*, de manera que se puede decir que se gana complejidad si se pierde simetría. Aquí también caen bien ejemplos tanto de la biología como de la física. Uno de ellos es el desarrollo embrionario de los animales: un óvulo fecundado da lugar a dos células idénticas, y éstas, a su vez, dan lugar a cuatro, luego a ocho, dieciséis, treinta y dos y así hasta tener una estructura multicelular esférica (que es el sólido más simétrico de cuantos conocemos); de repente, llegado un momento en el desarrollo del cual nadie sabe el porqué, la simetría esférica se rompe y el conglomerado celular pasa a un estadio de menor simetría que es la bilateral. Lo interesante del asunto es que este rompimiento de simetría geométrica va acompañado de un rompimiento de simetría funcional: cada célula era idéntica a las demás antes de esta ruptura y luego pasa a ser una célula diferenciada, o, en otras palabras, con estructura y función distintas, algunas serán células hepáticas, otras se convertirán en neuronas, etcétera. Las rupturas de simetría en el desarrollo ontogénico del individuo van acompañadas de un incremento en la complejidad. Sucede lo mismo en el desarrollo filogenético, es decir, a lo largo de la evolución de las especies. Esta afirmación puede enfermar de un coraje a Stephen Jay Gould, quien ha hecho de su vida una cruzada personal en contra de la idea de que a lo largo de la evolución los seres vivos han ganado complejidad. Lo sentimos mucho, aunque no dejamos de mencionar su lucha contra las corrientes religiosas estadounidenses que pretenden que la teoría de la evolución no sea enseñada en las escuelas, así como su labor educativa, y su incesante crítica al racismo, al sexismo y a toda forma de discriminación.

Las rupturas de simetría son importantes pues dan lugar a estructuras discernibles donde antes existían estados homogéneos. Otro ejemplo de ruptura de simetría, sin recurrir a ninguna figura o gráfica, lo constituye el siguiente ejercicio mental. Imaginen un aro metálico (también se pueden hacer dibujos) suspendido del techo mediante una varilla vertical que es una extensión de uno de sus diámetros, de tal manera que el aro puede dar vueltas teniendo como eje de giro la línea vertical definida por ese diámetro y la varilla. En el aro se encuentra insertado un pequeño anillo metálico que puede deslizarse sin fricción a lo largo del aro. Si el aro y el anillo se encuentran en reposo, la posición de equilibrio de este último es el fondo del aro. Si lo alejamos de esta posición y lo soltamos, el anillo oscilará periódicamente alrededor del punto de equilibrio. Ahora pongamos el aro a girar; primero lentamente y después incrementando la velocidad de rotación. ¿Qué sucede con el anillo que se encuentra oscilando? Sucede que la fuerza centrífuga de la rotación del aro hace que cada vez le sea más difícil al anillo regresar hacia la posición de equilibrio, pero una vez que lo ha pasado se aleja de él rápidamente. No cuesta trabajo aceptar que al sobrepasar una cierta velocidad crítica de giro el anillo no vuelve más al fondo del aro rotatorio y comienza a oscilar alrededor de un punto que se encuentra en una de las dos mitades del aro grande. El punto de equilibrio original estaba colocado justamente en la parte más baja del aro sobre el eje de rotación que también es un eje de simetría; al incrementar la velocidad de giro la simetría se rompe y el nuevo punto de equilibrio queda en una de las dos mitades del aro, mitad que, por cierto, no se puede determinar de antemano. Aquí se ve que las rupturas de simetría no únicamente rompen la homogeneidad de un medio, sino que también eligen *mano* en donde antes había isometría: el sistema se volverá zur-



do o diestro pero ya no seguirá siendo simétrico, tal como nos sucede a nosotros, que tenemos una simetría geométrica bilateral pero funcionalmente somos diestros o zurdos.

Existen muchos compuestos químicos que tienen propiedades físicas o químicas distintas dependiendo si los contemplamos en el espejo; estructuralmente son simétricos pero sus propiedades rompen la simetría funcional; dicha propiedad se llama *quiralidad*.

Hay rupturas de simetría en todas partes: los aminoácidos que forman nuestras proteínas son levógiros, esto es, son ópticamente activos y cambian hacia la izquierda el plano de polarización de la luz.

### Autoorganización

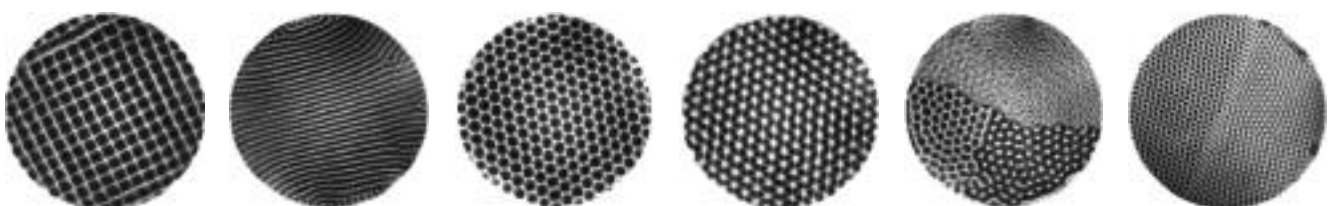
Diez microsegundos después del big-bang, hará unos quince mil millones de años, el plasma de quarks y gluones que constituía esa fase incipiente del universo co-

nocido se expandió y, al enfriarse, dio lugar a la formación de los hadrones y leptones, la dilatación posterior del universo enfrió tanto a la materia que los mismos se agruparon para formar átomos. Mucho tiempo después, en los hornos estelares, los átomos ligeros dieron lugar a los más pesados. En toda esta historia se repite el mismo patrón: los ingredientes de los niveles inferiores se agrupan, sin que en su naturaleza se encuentre explícita esa orden, para dar lugar a los integrantes de los niveles superiores. Adicionalmente, no se forman todas las estructuras que uno puede imaginar: sólo hay noventa y cinco tipos de átomos naturales, todos ellos cocinados con los mismos ingredientes. A este proceso espontáneo de organización de elementos individuales en estructuras coherentes lo llamamos *autoorganización*.

El fenómeno de autoorganización se conoce desde hace mucho tiempo, y se sabe que ciertos sistemas termodinámicos

fuera del equilibrio muestran una capacidad espontánea para desarrollar estructuras, formas y patrones en un rango estrecho de sus parámetros como resultado únicamente de sus dinámicas internas. En la figura 2 presentamos los resultados de un experimento con fluidos granulares (arena). El profesor Harry Swinney, del Centro de Dinámica No Lineal de la Universidad de Texas, puso arena en un plato de Petri y lo colocó sobre una bocina conectada a un generador de audio en el cual podía modular la intensidad y la frecuencia del sonido, mismo que se traducía en vibraciones del plato con la arena. Después de homogeneizar perfectamente el contenido del plato, empezó a ensayar diversas combinaciones de amplitud y frecuencia y obtuvo los patrones que se ven en la figura. Patrones por demás discernibles y coherentes que ni son el estado inicial homogéneo ni tampoco arena distribuida al azar. Reconocemos aquí un caso de ruptura de simetría de

FIGURA 2





los mencionados en la sección anterior que se traduce en *una emergencia de patrones*, pero lo destacable es que las formas espaciales surgen espontáneamente de *la nada*. Ésta es la esencia del fenómeno de autoorganización (la autoorganización sólo es posible en sistemas termodinámicos abiertos bajo dinámicas no lineales, es decir, que intercambian masa, energía o información con su entorno).

Dicho sea de paso, el experimento de Swinney también es un caso de protectorado, ya que los mismo patrones ocurren si la arena es fina, gruesa, metálica, granos de mostaza o líquidos como mercurio o agua.

Un sistema evoluciona al transcurrir el tiempo y tiene varias posibilidades como destinos finales. A estos destinos se les llama *atractores*. El fondo de una vasija que contiene una canica es un atractor *puntual*; los atractores pueden ser *periódicos*—una órbita planetaria— o una serie muy complicada de estados que se recorren irregularmente pero que poseen geometría fractal bien determinada y que son conocidos como atractores *caóticos* o atractores *extraños*. El conjunto de estados iniciales que desembocan eventualmente en un atractor se llama *cuenca de atracción*. En este contexto la autoorganización es un fenómeno que tiende a un

atractor bajo la sola influencia de su dinámica interna.

### Zona crítica

La figura 3 representa un diagrama de fases de una sustancia pura. En ella podemos reconocer algunos aspectos de la vida cotidiana. Notemos que los ejes coordenados representan, respectivamente, la temperatura y la presión de la sustancia. Supongamos por un momento, sin menoscabo de la generalidad, que nuestra sustancia es agua.

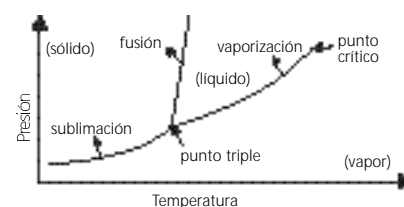
El primer hecho notable que salta a la vista es la existencia de un punto triple en los valores de presión y temperatura donde las tres curvas se encuentran, ahí coexisten las tres fases del agua: la sólida, la líquida y la gaseosa; es un estado difícil de creer pero real. Todos sabemos por experiencia que si cruzamos, aumentando la temperatura, la curva que sirve de

frontera entre las fases líquida y gaseosa, el agua se convierte en vapor sin estados intermedios. Cambios análogos e igual de familiares se llevan a cabo al cruzar cualquiera de las otras curvas en cualquier sentido. Sin embargo, la intuición pierde terreno cuando notamos que la curva que separa la fase líquida de la gaseosa se *termina en un extremo*. Esto quiere decir que si manipulamos con habilidad las variables temperatura y presión podremos pasar de agua líquida a vapor de manera continua, sin una transición abrupta. Ese extremo de la curva se llama *punto crítico*, y sus propiedades son notables y se heredan a toda una vecindad a su alrededor, llamada *zona crítica*.

En la zona crítica la función de correlación tiene valores altos aún para distancias muy grandes. En lenguaje llano, esto quiere decir que tal sistema llega a tal grado de integración que todas sus partes se influyen entre sí, a un nivel tal de existencia colectiva que lo que afecta a uno de sus componentes lo resienten los demás. Otra de las características de la zona crítica es que los sistemas que se encuentran en ella experimentan fluctuaciones de todos los tamaños dentro de un rango relativamente amplio y que estas fluctuaciones se dan a un bajo o nulo costo energético.

Un ejemplo de esto son los polímeros biológicos. A la temperatura ambiente y en solución acuosa, la dinámica de las proteínas y ácidos nucleicos se lleva a cabo de tal modo que la contribución energética de la entropía casi cancela la de la entalpía, situación que constituye una condición característica que define una zona crítica de las mencionadas en la sección anterior. Consecuentemente, dicha dinámica puede llevar a cabo fluctuaciones a muy bajo costo energético, proporcionándole a las proteínas y ácidos nucleicos una gran plasticidad y facilidad de asociación y disociación. Cabe mencionar dos puntos: en primer lugar, si esto no fuera así, el costo energético del metabo-

FIGURA 3



lismo sería imposible de obtener a partir de los alimentos y, segundo, los diferentes sistemas en zona crítica tienen propiedades genéricas similares que vale la pena explorar.

### Evolución, estabilidad, conflicto

Los seres vivos muestran una cierta permanencia o estabilidad en lapsos cortos (una coneja siempre tiene conejos) y cambio o evolución en tiempos largos. El cambio mutacional lento del material genético es un factor fundamental tanto para la permanencia o constancia del desarrollo embriológico como para el cambio fenotípico a largo plazo. Pensemos por un momento en el espacio o universo de todas las posibles variantes mutacionales de un organismo dado; este espacio imaginario es esencialmente infinito. Si la manera en que la evolución actúa fuese mediante la búsqueda aleatoria y exhaustiva (a la Darwin) sobre todo el espacio de posibilidades (*espacio fase*), la adaptación evolutiva sería esencialmente imposible, pues la probabilidad de llegar a una adaptación útil en un tiempo finito sería esencialmente nula (la misma probabilidad de que un ejército de monos produzca *La divina comedia* teclando al azar). La evolución biológica es un sistema dinámico que se desarrolla sobre el mencionado espacio de todas las posibles realizaciones genéticas y es evidente que deben existir algunos mecanismos que limiten el espacio fase en donde ocurre la exploración de modo que lo *imaginable* se separe de lo *viable*. En otras palabras, que la parte del espacio fase que se explore sea la zona con el potencial de acomodarse o integrarse fácilmente a las estructuras y procesos del desarrollo morfo-genético ya existente. Un ejemplo burdo: si los delfines sufrieran una presión evolutiva dada, y la exploración del espacio fase tuviese que contemplar la posibilidad de transformarse en cucarachas, este camino sería un desperdicio, pues una cucaracha no puede alcanzarse a partir



de las características de desarrollo morfológico que ya poseen los delfines.

También a nivel del funcionamiento metabólico de los individuos se hacen necesarios los mecanismos de restricción del espacio de posibilidades, uno de ellos es la reducción de la dimensionalidad del espacio físico en el cual se dan los procesos bioquímicos. Por ejemplo, los procesos celulares de replicación del ADN (duplicación de la molécula para dar lugar a dos juegos para las sendas células hijas después de la bipartición celular) y de transcripción genética (copiado del ADN en un molde de ARN) son procesos prácticamente unidimensionales. Si éstos se llevaran a cabo sobre una superficie o en el espacio de tres dimensiones, la probabilidad de síntesis con la precisión y a la velocidad requerida es prácticamente cero. El tránsito del ARN a través del ribosoma durante la síntesis de proteínas también es un proceso unidimensional, como lo son la mayoría de las reacciones bioquímicas asistidas por enzimas catalizadoras. Esta reducción de la dimensionalidad simplifica drásticamente la dinámica bioquímica.

En otras palabras, es necesaria la presencia de restricciones tipo “protectorado” que garanticen la permanencia o preservación de los procesos del desarrollo

embriológico en medio de la dinámica del proceso evolutivo.

La reducción de la dimensionalidad del espacio fase actúa en una gran variedad de fenómenos de la biología; por ejemplo, el promedio de vida, la frecuencia cardíaca, la duración de la gestación, la tasa metabólica y muchos otros rasgos de los organismos varían como una potencia fraccionaria de la masa corporal; de hecho, la potencia es siempre un múltiplo de  $1/4$ . Este fenómeno se encuentra asociado a la estructura y distribución fractal de los sistemas respiratorio y circulatorio, lo que permite alimentar los tejidos de la misma manera, ya sea la masa corporal de un ratón o la de un elefante.

Un sistema, vivo o inerte, que se encuentre en zona crítica y que la alcance mediante un proceso de autoorganización, a diferencia de aquellos que, como el agua, necesitan el ajuste de un parámetro externo para hacerlo (como la temperatura o la presión), se llama sistema con *criticalidad autoorganizada*. La criticalidad autoorganizada tiene propiedades sorprendentes, una de ellas es que presenta rasgos propios del caos determinístico, notablemente la existencia de atractores extraños. Un atractor es el subconjunto del espacio fase, del espacio de posibles estados de un sistema dinámico, hacia el cual





los estados migran de manera natural. Los atractores extraños tienen una dimensión geométrica (de hecho, tienen una dimensión fraccionaria o fractal) menor que la del espacio de todas las posibilidades. De nuevo estamos ante la presencia de otra reducción de la dimensionalidad. Si la vida, como parece ser, se encuentra en la zona crítica, entonces es la dinámica natural del propio sistema la que impone que los seres vivos que existen no sean todos los imaginables, sino sólo aquellos que sean viables bajo las leyes de la fisicoquímica subyacentes a los procesos vivos.

Todo lo hasta aquí presentado sugiere que la naturaleza, en lo que a la biología se refiere, no es un artífice inteligente y genial, sujeto a sus propias leyes, que dispone de un número infinito de posibilidades para realizar obras de arte biológicas

casi perfectas y de una diversidad rayana en el barroquismo. Más bien es un artesano que dispone de un número limitado de herramientas y métodos, sujeto a muchas restricciones y que, obediente de las leyes naturales (afirmamos que no hay una separación real entre las leyes del mundo vivo y las del inerte; tan sólo hay leyes naturales), resuelve los problemas que se le presentan como buenamente puede.

Quizá la presencia de tales limitaciones haga que la vida sea más fácil de estudiar de lo que pareciera a primera vista. Una de las razones del éxito del programa reduccionista en la biología ha sido la aparente e incomprensible complejidad del mundo vivo (lo que ha llevado a generaciones de biólogos a consolarse en el análisis estadístico de los datos de campo y laboratorio, estrategia que ordena y

describe pero que no explica). Lo que aquí hemos expuesto muestra que la intrincada madeja tiene, después de todo, un cabo suelto. Para poder tirar del extremo y desenredar la madeja el pensamiento biológico teórico jugará un papel relevante.

Para cerrar este ensayo recordemos al más grande y primer biólogo teórico, el visionario zoólogo escocés D'Arcy Wentworth Thompson, quien escribió en la introducción de su majestuosa obra *On Growth and Form*: "La morfología no es sólo el estudio de las cosas materiales y de las formas de las cosas materiales sino que tiene un aspecto dinámico bajo el cual se toma en cuenta, en términos de fuerzas, las acciones de la energía. Y aquí bien vale la pena mencionar que, enfrentados con los hechos de la embriología o de los fenómenos de la herencia, el lenguaje comúnmente usado por los libros parece darle demasiada importancia a los elementos *materiales* presentes como si ellos fueran las causas del desarrollo de la variación o de la transmisión hereditaria. La materia por sí sola no produce nada, no cambia nada, no hace nada".

En otras palabras, si bien la materia es importante, pues sin ella no hay universo, desempeña solamente el papel de sustituto de lo verdaderamente trascendente que son los *procesos*. Partículas, genes o individuos no son suficientes para explicar la urdimbre de las acciones colectivas. Es como saber que Romeo y Julieta vivieron y murieron en Verona y no tener idea de la maravillosa trama que fue su transcurrir sobre la Tierra. ~~✂~~

#### Germinal Cocho

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

#### Pedro Miramontes

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

#### IMÁGENES

P. 12: Paul Klee, *King of the sea snail*, 1933. Alfred Ehrhardt, *Atys naucum*, 1932. P. 13: P. Klee, *Nuggi*, 1905; *Monolog des Katzchens*, 1938. P. 14: André Kertész, *Washington Square*, 1954; P. Klee, *Park bei Lu*, 1938. P. 17: A. Ehrhardt, *Las líneas regulares del nivel del agua disminuyendo progresivamente en las*

*cercanías del Ebbe*, 1932; P. Klee, *Classic coast*, 1931. P. 18: P. Klee, *Coastal formation*, 1937. P. 19: Hans Jenny, *Cymatics*. P. 20: Jan Hendrix, *Bitácora (selección de China, Australia e Irlanda)*, 1996-1999.