

# Del caos de los demonios al caos de los biólogos

MARCELINO CEREIJIDO

Yo fui uno de esos niños a quienes les disgusta su nombre: mientras había Ernestos, Elenas, Juanes y Margaritas felices, me avergonzaba llamarme *Marcelino*, en compañía de los Aristóbulos, Ursulas, Macedonios y Perfectas. Pero me fui acostumbrando a que no siempre los nombres se eligen por su significado (uno puede llamarse Hércules y ser un alféñique, o Gloria y ser soporífera) y no hay por qué cambiarlos al mudar de estado, como cuando el bíblico Abram hizo un pacto con Jehová y pasó a llamarse Abraham y su esposa Sarai se transmutó en Sara. Eso me fue preparando para aceptar que hoy se llame *caos* a lo que, como argumentaré más abajo, me parece que no debería llamarse así.

En la *Teogonía* de Hesiodo, *caos* se relaciona con la raíz  $\chi\alpha$  (estar abierto) y alude al espacio vacío. Más tarde derivará de  $\chi\epsilon\omega$  (verter) y será representado como la masa inorgánica y confusa. Los dioses crearon los universos ordenados en los que reinaban, y relegaron al caos a los demonios. De ahí en más, *caos* fue reservado para el bochinche y la ignorancia, para lo que se ubica más allá del territorio de lo ordenado y comprensible, pues en todo punto de la historia hay un límite entre lo que ya se conoce y lo que todavía se ignora. Así, hubo un momento en que las vacas y las ranas pertenecían al orden del mundo conocido, pero las bacterias, los virus, los transposones y los protooncogenes estaban en el caos de lo ignorado. Justamente, los investigadores habitamos ese límite entre dioses y demonios, y nos ganamos la vida tomando una porción de caos, explicándolo y expandiendo así el universo de lo conocido (o, por lo menos, de lo publicado). Por eso, para exponer cómo llegó la biología a los actuales modelos de caos, me iré al siglo XVIII, me situaré en ese límite orden/caos, y me desplazaré con él hasta el presente.

## El equilibrio

El mundo occidental pasó, por así decir, por tres etapas: en la primera, que duró desde la Antigüedad hasta el siglo XVII,

imperaba una visión basada en el *equilibrio*, de *aequa libra*, la balanza quieta, serena, porque no cambia nada en forma neta. Predominaba una estratificación jerárquica e inmutable, que a veces se encuentra ilustrada en frescos en los que, a cierto nivel horizontal, se ve a la masa del pueblo, por encima a los nobles, que tienen más arriba otro nivel con ángeles y santos y, finalmente, allá en lo alto, el nivel supremo ocupado por Dios. En sentido descendente, debajo del pueblo se representa a los animales, después el nivel vegetal, y así, más abajo, se encuentra el mundo inanimado y, en el fondo de todo, el Reino de las Tinieblas. Cada nivel se consideraba fijo por la naturaleza inalterable de sus miembros. Estaba en la naturaleza de los agricultores ser agricultores, y sus hijos y nietos no tendrían otra alternativa que ser agricultores como sus padres y abuelos. Todos ellos habían "nacido para" ser agricultores. Si el rey moría era reemplazado por otro noble, y llegaba a entronizarse una persona de otras tierras, un extranjero en caso de no contar con un noble (behetría). Como parte de esa concepción estática, se pensaba que los continentes, las montañas y los ríos siempre habían sido y permanecerían tal como se los veía en ese momento.

Por supuesto, los modelos biológicos de aquel entonces daban por sentado que las especies biológicas habían sido creadas como tales durante el Génesis relatado por la Biblia, y la gestación de un nuevo ser no requería menos que un milagro.

## La dinámica

En una segunda etapa la visión se centró en el *cambio* y los *procesos*, de modo que además de saber que Fulano *es* rico, se trató de entender cómo *se hizo* rico y cómo *mantiene* su riqueza. Y así se despertó el interés por averiguar cómo se formaron las montañas, cómo aparecen y desaparecen las naciones, cómo enloquece la gente. Las cosas dejaron de considerarse objetos inmutables y pasaron a ser vistas como estados ac-

tuales de *procesos* en continuo cambio, como efectos de alguna causa. Para explicarlos, la filosofía, la historia, la economía, la sociología, la biología y la psiquiatría tuvieron que generar modelos dinámicos, cuya variable fundamental es el tiempo (Blanck-Cerejido y Cerejido, 1988). En el siglo XVIII, y sobre todo en el XIX, se desarrollaron la termodinámica, las teorías sobre formación de los estratos geológicos; las estrellas, las constelaciones y todo el universo pasaron a considerarse etapas de un proceso dinámico iniciado en una hipotética Gran Explosión.

En ese contexto histórico del conocimiento, los organismos se volvieron objeto de estudio de la embriología, las especies biológicas se entendieron como productos de una evolución, las enfermedades dejaron de ser consecuencias de maleficios y pecados y fueron consideradas resultado de procesos fisiopatológicos.

### Las crisis

Las explicaciones que brindaban esos modelos valían para procesos cercanos al equilibrio, pues el funcionamiento alejado de éste introduce distorsiones y se acerca peligrosamente a las crisis. Para visualizarlo pensemos que si diez obreros construyen una casa en dos años, veinte la podrán hacer en uno, cuarenta en seis meses... pero no podríamos extrapolar esa "ley" y concluir que cien millones de obreros la harían en pocos segundos, pues sabemos que al aumentar el número de operarios se llegará a una crisis. Análogamente, podemos imaginar a un observador que mide la temperatura de una olla de presión colocada sobre el fuego, en función del tiempo de calentamiento: llegará un momento en el que la temperatura dejará de seguir una curva sencilla, entrará en crisis, la olla reventará; no hay extrapolación de la curva que permita predecir en cuántos pedazos se partirá, qué forma tendrán, ni dónde diablos irán a parar. En suma: no había coeficientes de corrección que permitieran a los modelos dinámicos seguir explicando las conductas de los sistemas más allá de las crisis que, por lo tanto, fueron consideradas como los umbrales del caos, de la ignorancia.

En el nuevo escenario, la biología pasó a interesarse en las circunstancias en las que el producto de una reacción química da origen a una fibra, a un conglomerado polimérico, es decir, se trató de pasar del caos de las moléculas sueltas que chocan locamente, al orden de la microestructura que, dicho sea de paso, era ya observable con poderosos microscopios electrónicos y espectrómetros que detectaban las interacciones.

### Más allá de la crisis

En una tercera etapa, la actual, el ser humano se percató de que más allá de las crisis no reina el desorden, sino que en cada crisis que se atraviesa, se lleva a cabo una transición hacia otra estructura diferente que funciona de manera distinta (figura 1). Cualquiera que riega el jardín con una manguera advierte

que al aumentar la presión del agua, el chorro va describiendo un arco cada vez mayor, pero que se transforma en un cono hueco, un abanico, dos subchorros separados, etcétera. Análogamente, quien haya sembrado una semilla y observado que el mero ingreso de agua a su estructura le provoca una crisis que inaugura un vegetal, tiene una experiencia simple y directa de estas transformaciones estructurales y funcionales de los sistemas cuando son perturbados y desplazados de su equilibrio más allá de cierto punto crítico. La evolución biológica, por ejemplo, no consistió en un aumento simple y lineal del tamaño de las células primitivas, sino que fue dando origen a gusanos, peces, saurios, reptiles, mamíferos, cuyas estructuras y capacidades no se podrían haber predicho extrapolando las de las células y las especies primitivas.

Observemos que después de atravesar las crisis, esos sistemas no se "caotizan" ni pasan a hacer "cualquier cosa", sino que adquieren estructuras y conductas que también obedecen a leyes explicativas, sólo que esas leyes son diferentes de las que conocían los observadores situados, por así decir, en el centro del sistema, en su punto de equilibrio antes del cambio. Se advierte entonces que el caos existe más bien en la mente de ese observador, como si Amenofis IV y Luis XIV hubieran tratado de usar sus conceptos de "reino" para explicar lo que sucedería en el Egipto y en la Francia actuales. Más aún, se llegó a la conclusión de que toda estructura y todo modo de funcionar tiene su origen en alguna crisis. En las crisis desaparecen fortunas, instituciones, países, culturas, especies biológicas, montañas, ríos y estrellas, *pero también se crean nuevas*. Como decíamos, el mismo universo parece haber sido producido en una descomunal crisis: la Gran Explosión.

Si bien crisis y caos fueron perdiendo así su mal nombre, y ya no equivalen a "desastre" e "ignorancia", el atravesar una crisis no asegura que se está llevando a cabo una transición hacia alguna estructura y forma de funcionar mejor. "*Cambio es una cosa, progreso es otra*", comentaba Bertrand Russell. En chino *crisis* se escribe (nos informan) combinando dos ideogramas: oportunidad y peligro. Para que quede claro: 98% de las especies biológicas que han existido sufrieron crisis que las extinguieron.

La humanidad siempre ha atravesado crisis profundas y las volverá a experimentar. Basta mirar los mapas europeos de los últimos doscientos años para advertir que el Primer Mundo no ha tenido en absoluto una anatomía estática. Londres deriva de *Londinium*, el nombre dado por los romanos a su asentamiento en aquellas tierras, porque la voz celta *london* equivale aproximadamente a "lugar salvaje", y el sabio musulmán Al-Andalusi opinaba que la gente de las comarcas que luego se transformaron en Suecia, Gran Bretaña, Alemania, Holanda, Suiza, jamás saldrían de su embrutecimiento, porque el frío no permitía que les creciera el cerebro. Sin embargo, fue en el seno de aquellos "embotados" que se produjo el Renacimiento y la Revolución industrial, y es allá donde asientan los centros más importantes del saber y del poderío económico actual. También las naciones de nuestra América nacieron hace un par de siglos como resultado de algunas crisis que ni siquiera ocurrieron aquí, sino en la relación entre franceses, españoles e ingleses.

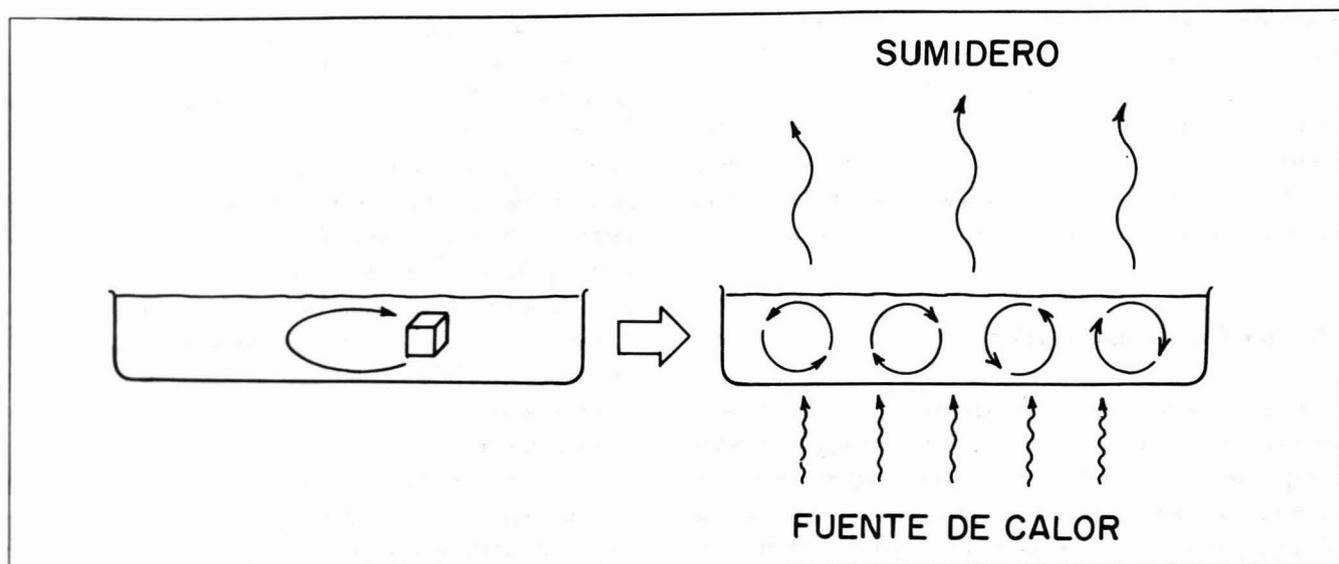


Fig. 1: Más allá de los desequilibrios y las crisis no siempre aguarda el caos, sino que a veces surgen órdenes que no podría haber previsto un observador situado en el equilibrio. Así, en el recipiente de la izquierda el agua está en equilibrio, y el que de pronto las moléculas de agua contenidas en un centímetro cúbico (unas  $10^{22}$ ) se pongan a girar solidariamente como indica la flecha, es un improbable-imposible. Sin embargo, si se pone dicho recipiente entre una fuente de calor y un sumidero como se ilustra a la derecha, llegará un momento en que el agua se ordenará en celdas que comenzarán a girar con probabilidad 1, es decir, lo probable-imposible se transforma en una ley causal

En el contexto biológico, los fisiólogos pasaron de ocuparse del "modelo terminado", es decir, de la neurona, el hepatocito y el ojo que se limita a funcionar, a darse cuenta de que no hay función pura, es decir, que toda función comporta un cambio de estructura. La simple llegada de una hormona no viene a excitar simplemente un receptor estático, sino que provoca fosforilaciones, agrupamientos de subunidades, síntesis de segundos mensajeros, expresión o silencio de baterías de genes.

### Los sistemas complejos

Un genetista desarrolla una nueva variedad de cereal que rinde 300% más de lo que producía la plantita que venían cultivando los indios desde tiempos remotos. Los ensayos, hechos con todo rigor en el ámbito de un invernadero, le dan la razón; se promueve el cultivo del nuevo cereal, con lo que en cinco o diez años se puede llegar a descubrir que, si bien es cierto que en condiciones óptimas crece 300% más, la planta, "integrada a la realidad", es diezmada por organismos con los que el vegetal de los indios mantenía un armonioso equilibrio ecológico, no tolera las sequías, se malogra cuando las lluvias son un tanto más copiosas. El resultado puede ser el hambre, la desertificación, la migración masiva de campesinos a las urbes. Aunque parezca mentira, a veces un vendedor de chicles junto a un semáforo ciudadano puede ser producto de un estudio genético reduccionista, de la no-linealidad, del caos.

Al intentar integrar lo aprendido por las diversas ramas para hacer un esquema científico de la realidad, se descubre que, en la mayoría de los casos, esta realidad es intrínsecamente compleja, "no se deja" explicar y mucho menos "manejar" por los modelos obtenidos mediante la suma de conocimien-

tos aislados. Para decirlo de otra manera: cuando se trata de entender la realidad, el todo es muchísimo más (¡y hasta muy distinto!) que la suma de las partes que las diversas disciplinas habían recortado para estudiar por separado.

¿Cómo se encaraban hasta hace poco tiempo los sistemas complejos? En general se los descomponía. En una conferencia sobre el cerebro, por ejemplo, se podían proyectar diagramas descomunales, compuestos de rectángulos con el nombre de los centros (corteza, tálamo, hipotálamo, núcleo caudado) unidos por flechas que representaban las interacciones entre ellos. Otros rectángulos tenían en cuenta una maraña de factores metabólicos, otros el pH, los *buffers* que lo regulan, la temperatura, la circulación; otra serie para representar la constelación de mediadores químicos y los impulsos eléctricos. La incorporación de procesos y estructuras intracelulares requería a su vez de nuevos enjambres de rectángulos para incorporar la fusión exocítica, los receptores, los segundos mensajeros, la síntesis de proteínas, la replicación, el citoesqueleto. Tener en cuenta la influencia de la información sensorial visual, olfativa, auditiva, gustativa, postural, exigía verdaderos archipiélagos de rectángulos adicionales y, si bien era posible incorporar los datos experimentales recogidos por generaciones de neurobiólogos, era difícil ponderar cómo se comportarían ante las variaciones circadianas. Otros aspectos, tales como la dieta, la edad y el entrenamiento previo eran también determinantes, pero resultaban imposibles de integrar al cuadro.

Ahora bien, cada una de esas flechitas (interacciones) se describe, concebiblemente, con una función matemática alimentada con datos recogidos con los errores inherentes a toda medición. La cándida esperanza de estudiar cada uno de los factores por separado para luego juntar lo aprendido y generar así un modelo que prediga qué va a suceder, fue simplemente

errónea: esos modelos no describen para nada la realidad. Son reduccionistas. En general no sirven.

Entonces, ¿por qué se siguen haciendo? Respuesta: porque se hace lo que se puede y porque tampoco nosotros debemos ubicarnos en el territorio del orden y afirmar que lo que hoy no se entiende no se podrá entender jamás, que ya no se puede tomar un pedazo de caos, investigarlo y proponer una explicación.

### ¿Qué son los sistemas complejos?

Conviene entonces enumerar algunas de las características de esta nueva criatura teórica: *los sistemas complejos*. 1) Están compuestos por un *número muy grande de componentes*. 2) Son *muy heterogéneos*, pues sus componentes son de naturaleza distinta: piensa en un hueso y un nicho ecológico, en un ribosoma y una muela. 3) En sus procesos reina la *no-linealidad*: los sistemas biológicos son fundamentalmente máquinas químicas, es decir, reacciones que son intrínsecamente muy no-lineales y sufren crisis a poco que se alejen del equilibrio. 4) *Tienen procesos de distinta naturaleza*: químicos (oxidación de las grasas), eléctricos (potenciales de acción), circulatorios (funcionamiento cardíaco), mecánicos (contracción muscular), menstruaciones, inflamaciones, locomoción, vuelo, hibernación, tumorigénesis, procesos conscientes e inconscientes, que obedecen a leyes diversas. 5) *Un parámetro puede estar afectado por múltiples causas*: piensa en la regulación de la glucemia, presión arterial, postura, hidratación, gestación. 6) *Una misma causa puede provocar multitud de efectos*: recuerda la reacción de alarma, fatiga, sueño, hambre, sed. 7) *Progresan a lo largo de crisis tras las cuales cambian su estructura y función*: baste imaginar el pasaje de huevo a mórula, gástrula, embrión, feto, niño, adolescente, adulto, viejo, cadáver. 8) *Están estructurados en niveles jerárquicos, cada uno de los cuales tiene una organización significativa*: las estructuras de la vida no son como las industriales, en las que la microestructura de una biela, un engranaje, una columna o un puente es irrelevante, pues podrían ser de acero, plástico, cerámica, madera, con tal de que cumplan su función. En los sistemas biológicos la situación es muy distinta, pues están organizadas en todos sus niveles, desde el molecular revelado por la cristalografía, pasando por organelos, células, tejidos, órganos, organismos, poblaciones, ecosistemas, hasta llegar a la biosfera. 9) La descripción de cada nivel *requiere de disciplinas y leyes especiales*, representadas por la química, la hemodinámica, la psicología, la sociología. 10) *Las estructuras son configuraciones pasajeras que adoptan los procesos*: son en realidad accidentes congelados. 11) En principio, el número de estados combinatoriamente posibles a que podrían acceder tras las crisis es enorme, sin embargo, *las estructuras sólo pueden adoptar unas pocas configuraciones*: en principio, un huevo fecundado de mamífero puede originar un número astronómico de células, pero sólo genera un organismo de unas  $10^{15}$  células y se detiene; "sólo" produce entre veinte mil y cien mil proteínas distintas; hay homeoboxes que controlan que los genes no se expresen

de cualquier manera, sino que lo hagan siguiendo un programa coordinado para construir un ojo, una pata, un torso; sólo se forma un número "pequeño" de tipos celulares distintos (fibroblastos, eritrocitos, neuronas). Análogamente, una mona preñada puede abortar, generar un feto anencefálico o un monito normal, pero no puede dar a luz un canguro ni una berenjena. 12) *Se mantienen apostados al borde de las crisis* en las que finalmente se precipitan: el cosquilleo de una pluma provoca un estornudo, la llegada de unos microgramos de hormona tiroidea le hace perder la cola a un axolote, el movimiento horizontal de una mosca hace brincar a un sapo, la llegada de un potencial de unos pocos milivolts hace flexionar una pierna. 13) *Interaccionan fuertemente con el medio*. Termodinámicamente hablando son abiertos (intercambian materia y energía). Justamente es la interacción con el medio lo que los propulsa a evolucionar. 14) *Se adaptan*. Van cayendo en estados o configuraciones estables, reacias a cambiar cuando se las perturba dentro de ciertos límites: un gato regula su hidratación, un muchacho mantiene su temperatura, un señor adapta su conducta (dietas, gimnasia) para mantenerse sano y joven (o parecerlo). 15) *Tienen propiedades emergentes*: cada nivel jerárquico resulta del trabajo de los niveles inferiores, pero pasa a tener propiedades que aquéllos no tenían. De las reacciones moleculares que desencadenan y controlan los genes no se puede predecir que darán origen a un corazón que late, ni a un cerebro que piensa.

### La "constancia" de los sistemas biológicos

Si registramos la glucemia con mucha precisión, veremos que tiene un valor aceptablemente estable, pero que, así y todo, no es constante, sino que presenta pequeñas variaciones más o menos irregulares. Esas irregularidades se deben a que, en cada momento, la glucemia refleja la función de una multitud de mecanismos fisiológicos, tales como la absorción intestinal de glucosa, la captación por las células de todo el organismo, su interconversión en glucógeno en hígado y músculos, la función pancreática, la tiroidea, la suprarrenal, la variación de los niveles de sodio fuera y dentro de la célula que modifican la cinética de los acarreadores sodio-glucosa. Además, cada uno de los mecanismos que controlan la glucemia necesita de cierto desvío para "despertarse" y entrar en función: es necesario que el nivel de glucosa en sangre se eleve un poco para que el páncreas se active y la haga descender, por el contrario, la activación de la suprarrenal está condicionada a que la glucemia baje un poco. Ésta es, desde luego, una situación inherente a todos los parámetros, biológicos o no, controlados por circuitos de retroalimentación. Análogamente, si registramos otras variables fisiológicas (el nivel de calcio en plasma, el electroencefalograma, el electrocardiograma, el potencial eléctrico de las membranas celulares, la temperatura) constataremos que todos ellos tienen irregularidades parecidas a las que acabamos de mencionar.

Cuando se trata no ya de niveles constantes, sino productos del trabajo cíclico de algún órgano, por ejemplo del corazón, observamos que existe también cierta variabilidad. Ari L.

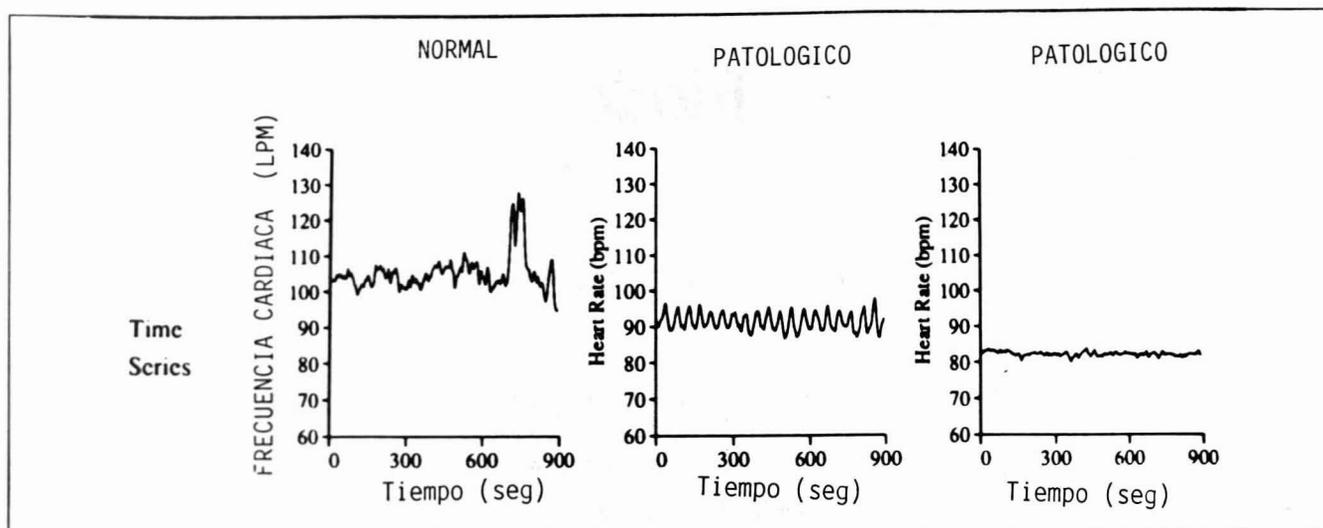


Fig. 2: De izquierda a derecha, registros de la frecuencia cardiaca (latidos por minuto) en un sujeto normal, un cardiópata y un cardiópata grave (simplificado de Goldberg, 1991)

Goldberger hizo un análisis espectral de las variaciones del ritmo cardiaco y observó que fluctúan de una manera compleja, aun en sujetos normales en reposo (figura 2). Más aún, la forma de esta fluctuación resulta similar a lo largo de varias escalas de tiempo, fenómeno que es típico de los sistemas caóticos. Cuando Goldberger hizo esas mismas determinaciones en sujetos con ciertas afecciones cardiacas, recogió trazados más regulares, "mejores", y si la afección era muy grave, *premortem* digamos, el trazado resultaba aún más "ordenado", en el sentido de que no presentaba la variabilidad de los sujetos normales. En una palabra, la variabilidad del trazado no se debe a "ruido", sino a una situación fisiológica. El cambio conceptual es aquí ostensible: hasta hace poco tiempo, con el concepto de salud basado en el equilibrio, uno hubiera dicho que la persona cuya actividad cardiaca es como la que se muestra en la figura 2c gozaba de mejor salud que la del registro 2a.

Estas regularidades en lo que hasta hace poco hubiera sido considerado simple "ruido", no se limita a los niveles fisiológicos ni a las funciones cíclicas que acabamos de mencionar, sino que se observa también en la propagación de epidemias, en la progenie de los camarones a lo largo de sucesivas generaciones, en la distribución de árboles en los bosques y en cuanto sistema se lo ha buscado.

*Y bien, ¿te sigue pareciendo adecuado hablar de caos?*

Si bien los sistemas biológicos son complejos y no se puede predecir a ciencia cierta cómo reaccionarán ante una perturbación, al "caos" biológico se le están encontrando demasiadas regularidades como para considerar que es el reino de la ignorancia y del desorden.

En otros artículos de este número de *Universidad de México* te enterarás de bifurcaciones, no linealidades, singularidades, *feedbacks* positivos, fractales, atractores extraños; de apellidos

ilustres como Poincaré, Prigogine y Mandelbrot, y de lo mucho que se está aprendiendo de las estructuras disipativas y las conductas caóticas. En mi opinión, los nuevos modelos son muy frescos, innovadores y fértiles, pero indican que el caos ya no es tan caos que digamos, pues exhiben muchas regularidades estructurales y funcionales. Por eso, lo importante no es perseguirnos unos a otros con etiquetas y nomenclaturas, sino entender cómo y por qué fueron cambiando los modelos con que se describe la vida. ♦

#### Lecturas recomendadas

- Black-Cerejido, F., y M. Cerejido, *La vida, el tiempo y la muerte*, Fondo de Cultura Económica, México, 1988.
- Cerejido, M., *Orden, equilibrio y desequilibrio*, Universidad de Zacatecas, México, 1995.
- , "Enfoques termodinámicos de la vida", en *Segundo Coloquio del Departamento de Matemáticas del CINVESTAV* (J. J. Rivaud, comp.), Morelos, 1981, pp. 27-41.
- , "Termodinámica y origen de la vida", en *Correspondencia: homenaje a Oparin* (Artís, Casanueva y Chávez, comp.), Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1983, pp. 91-105.
- , *Ciencia sin seso locura doble*, Siglo XXI, México, 1995.
- , y C. A. Rotunno, *Introduction to the Study of Biological Membranes*, Gordon & Breach, Londres, 1970.
- Eigen, M., "Molecular Self-organization and the Early Stages of Evolution", en *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1971, vol. 4, p. 148.
- Glass, L., y M. C. Macker, *From Clocks to Chaos: the Rhythms of Life*, Princeton University Press, 1988.
- Goldberger, A. L., "Is the Normal Heartbeat Chaotic or Homoestatic?", en *News in Physiological Sciences*, 1991, vol. 6, pp. 87-91.
- Morowitz, H., *Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal Physics*, Academic Press, Nueva York, 1968.
- Prigogine, I., *Thermodynamics of Irreversible Processes*, Charles C. Thomas Press, Springfield, 1955.
- , y G. Nicolis, "Biological Order, Structure, and Instabilities", en *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1971, vol. 4, p. 107.