

ENCUENTROS CON LA
CIENCIA
Del macrocosmos al microcosmos



Los contenidos de este libro se publican bajo la licencia
Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 3.0
de **Creative Commons**
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>)

www.encuentrosconlaciencia.es

La complejidad de la naturaleza: Fractales, caos y jugando a hacer montones de arena

Miguel Ángel Medina Torres. *Profesor Titular de Biología Molecular y Bioquímica. Universidad de Málaga*

¿Por qué, después de más de cuarenta años de férrea hegemonía sobre el Este de Europa, la Unión Soviética cayó con el «telón de acero» en unos pocos meses de 1989? ¿Por qué la Bolsa internacional vivió un «lunes negro» en octubre de 1987, con un desplome de los valores de más de 500 puntos? ¿Cómo un adolescente canadiense jugando con su ordenador pudo producir en febrero de 2000 uno de los más graves colapsos de Internet, que causó pérdidas económicas millonarias? ¿Cómo un conjunto relativamente sencillo de moléculas inertes dieron lugar a la primera célula viva hace cerca de 4.000 millones de años? ¿Por qué y cómo las células individuales empezaron a establecer alianzas para generar seres vivos pluricelulares? ¿Cómo puede la selección natural darwiniana explicar la aparición de una estructura tan sofisticada como el ojo? ¿Es una mera casualidad que las formas arborescentes sean ubicuas en la naturaleza? ¿Qué es la vida? ¿Qué es la mente? ¿Por qué se equivoca tanto el «hombre del tiempo»? Estas y otras preguntas NO serán respondidas en este capítulo, pero ilustran la *complejidad* del mundo. Se trata de mostrar que «complejo» no tiene por qué equivaler a «complicado» y que la geometría fractal, la teoría del caos, las teorías de sistemas dinámicos y otras están haciendo emerger nuevo enfoques holistas para estudiar estas y otras cuestiones. Les presentamos las nuevas ciencias de la complejidad.

El triunfo de la ciencia reduccionista y sus limitaciones

Por circunstancias históricas, el modelo de ciencia que ha prevalecido es el que se asienta conceptualmente en el principio de la navaja de

Occam y el sistema analítico cartesiano, y procedimentalmente en el empirismo.

El monje franciscano y filósofo Guillermo de Occam estableció en el siglo XIV el principio conocido como navaja de Occam, que establece que «es vano hacer con más lo que puede hacerse con menos». En otras palabras, no hay que hacer más asunciones que las necesarias. Su aplicación al método científico consiste en la elección de las hipótesis de partida que contengan el menor número de asunciones no probadas y en la búsqueda de la aproximación más sencilla a la resolución de un problema. El racionalismo cartesiano establece un método para la aplicación de este principio: proceder a un análisis previo de un problema, esto es, a la «descomposición» de un problema complejo en sus partes integrantes (más sencillas de resolver) para, una vez solucionados los problemas parciales, tratar de acceder a la resolución del problema general mediante síntesis, es decir, asumiendo que la suma de las soluciones parciales nos permitirá aproximarnos a la solución global buscada. Finalmente, el empirismo establece que el origen y el límite del conocimiento humano está en la experiencia, de forma que, tal como propugna el empirista del siglo XVI Francis Bacon, el modo de proceder para generar conocimiento científico es observar y experimentar.

Así pues, la forma prevalente de hacer ciencia es esencialmente reduccionista. No cabe duda de la enorme eficacia y la gran productividad de la ciencia reduccionista. Es más, se puede afirmar que la enorme progresión que la ciencia ha experimentado desde mediados del siglo XIX a comienzos del siglo XXI ha sido posible gracias al empleo de enfoques reduccionistas. Sin embargo, estos enfoques no son suficientes y cada vez se hace más patente la necesidad de explorar caminos alternativos. Por una parte, está plenamente comprobado que la suma de soluciones parciales que aportan los enfoques reduccionistas raramente es suficiente para la comprensión global de los sistemas complejos. Por otra parte, la acumulación de conocimientos a lo largo de la historia de la humanidad, acelerada exponencialmente durante los últimos cien años, ha forzado la necesaria compartimentación para posibilitar la formación de especialistas capaces de avanzar en particulares ramas del saber. La lista de especialidades es extensísima y

abarca todas las escalas naturales de tamaño, desde la astronómica a la submicroscópica. Cada rama, a su vez, se divide en distintas subáreas de especialización. En definitiva, la ultraespecialización domina el panorama de la ciencia contemporánea. De esta forma, la necesidad de la especialización llevada a su extremo conduce a la subdivisión de la ciencia (y del conocimiento en general) en compartimentos cada vez más reducidos, en dimensiones y objetivos y cada vez más aislados entre sí. Pero el conocimiento sólo puede ser entendido como algo unitario.

La complejidad de la naturaleza

La Figura 1 simboliza la complejidad de la naturaleza. Hoy en día sabemos que sistemas tan simples como los compuestos de sólo dos o tres variables independientes pueden exhibir comportamientos extraordinariamente complejos en el tiempo y en el espacio. Todo apunta a algo que todavía la mayoría de los investigadores no quieren reconocer: que hace falta cambiar de enfoque filosófico, que la comprensión de los sistemas complejos no puede llegar desde el reduccionismo sino desde un estudio integrado de todo el sistema en su complejidad global. Afortunadamente, hay serios indicios de que las cosas están cambiando. El editor jefe de la revista *Nature*, Philip Campbell, recientemente señalaba: «Los biólogos y otros científicos han empezado a pensar en los sistemas y redes como tales (...) Se puede anticipar que tal análisis de sistemas (...) se convertirá en una nueva norma de la investigación biológica».

En esta dirección, tienen mucho que aportar las diferentes aproximaciones metodológicas y conceptuales que suelen integrarse en las denominadas teorías de la complejidad. En sentido amplio, dentro de éstas se pueden considerar integradas las contribuciones de las teorías de la información, teoría general de sistemas dinámicos, la termodinámica no lineal, así como los diversos enfoques de los estudios de los fenómenos de autoorganización, criticalidad autoorganizada, vida en la frontera del caos, sinérgica, pléctica, teoría de evolución general, teorías de nodos y redes y un cada vez más largo etcétera. Sin

embargo, incluso los más firmes partidarios de estas aproximaciones holistas hemos de ser conscientes de que las teorías de complejidad aún tienen que demostrar su valor y utilidad a la inmensa mayoría de los científicos. Probablemente, a las teorías de la complejidad todavía les haga falta mucha más información empírica para poder superar la suspicacia de quienes piensan que no van más allá de aportar conclusiones excesivamente vagas y generales para tener alguna utilidad real. Y es más que probable que la Biología pueda contribuir decisivamente a aportar la información empírica requerida para que las teorías de complejidad lleguen a impregnar el quehacer investigador de la mayoría de los científicos. De acuerdo con el bioquímico neoyorquino Gerald Maurice Edelman (premio Nobel en 1972 por descubrir la estructura de los anticuerpos), «la complejidad es el problema central de la Biología del presente siglo».

La geometría fractal de la naturaleza

¿Qué son los fractales? En los años sesenta del pasado siglo, Benoit Mandelbrot construyó una nueva geometría –la geometría fractal– y postuló que era la propia de la naturaleza. Sin embargo, los antecedentes se pueden encontrar en la segunda mitad del siglo XVIII, en parte de la labor científica de Lichtenberg. George Christoph Lichtenberg, crítico de arte y literatura, escritor satírico y autor de unos famosísimos aforismos, fue también matemático, físico experimental y astrónomo. Se trata del primer autor del que consta que se preguntó científicamente por la forma del rayo, el trazo sinuoso que ilumina el cielo una noche de tormenta marcando el «camino que sigue la descarga» desde el punto en que se origina hasta el lugar en tierra donde «cae». En 1777, Lichtenberg descubrió que descargas de electricidad estática pueden hacer que finas partículas se dispongan generando figuras con patrón radial y «ramificado» o «arborescente». Este fenómeno es el principio básico de la fotocopia xerográfica, y las denominadas «figuras de descarga de Lichtenberg» (que asemejan la forma del rayo) han cobrado recientemente interés cuando se ha constatado que constituyen el primer ejemplo documentado de estructura fractal real obtenida en experimentación científica.

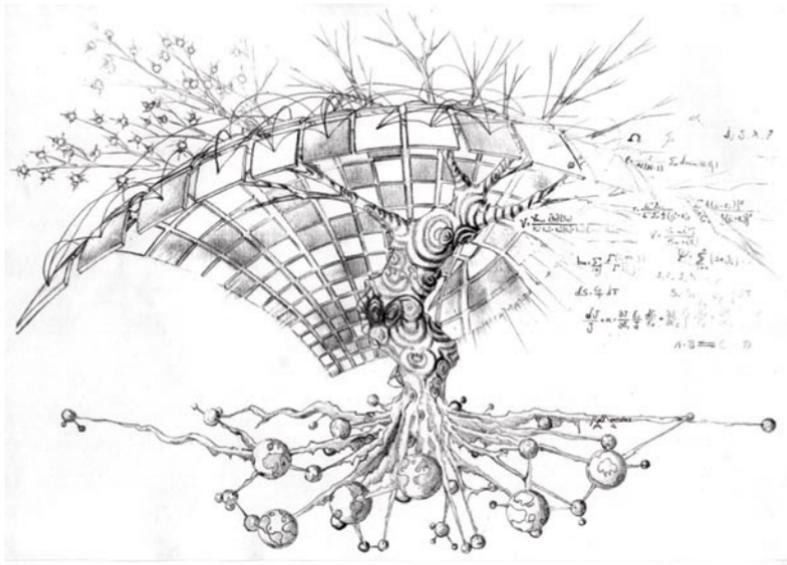


Figura 1. **Representación simbólica de la complejidad de la naturaleza.**

Bastante más tarde, en 1913, el gran físico Jean Baptiste Perrin (premio Nobel en 1926 por sus estudios acerca de la estructura discontinua de la materia) formuló la pregunta-reto *¿Cuánto mide la costa de Bretaña?* La respuesta científica la encontró otro físico, Lewis Fry Richardson, tres décadas después, aunque permaneció inédita hasta la publicación póstuma de sus cuadernos de notas en los años sesenta. Fry cultivó la afición al análisis de los mapas, y ello le llevó a hacer todo tipo de medidas, incluida la estimación de las distancias entre dos puntos siguiendo la línea de costa y empleando mapas con distintas escalas. De esta forma, se dio cuenta de que la contestación a la pregunta-reto de Perrin es «Depende». De manera más precisa, «la longitud de una costa depende de la escala de medida». Aunque Mandelbrot señala que, cuando en los sesenta él sentó las bases de la nueva geometría fractal desconocía el trabajo pionero de Fry Richardson, reconoce (en un gesto de honestidad intelectual) la perspicacia de Fry al representar los logaritmos de las medidas en función de los logaritmos de las escalas (Figura 2), generando rectas de pendiente negativa, tanto más inclinadas (con mayor pendiente) cuanto más sinuosa es la costa ana-

lizada. Mandelbrot identifica la sencilla relación funcional que liga las pendientes a de las rectas de Fry con su dimensión fractal D : $D=1-a$. Es decir, Mandelbrot concluye que las costas son fractales y las pendientes de las rectas de Fry son estimadores de su dimensión (fractal), la cual aumenta con su sinuosidad.

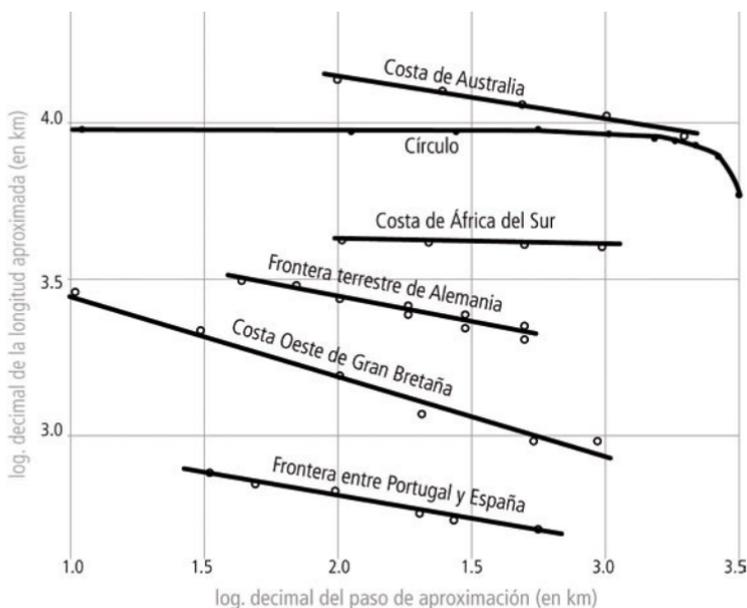


Figura 2. **Representación doble logarítmica de la relación funcional del cambio de tamaño de las costas en función de la escala de medida** tal cómo lo estudió Fry Richardson.

Pero, volvamos a la pregunta con la que se iniciaba este apartado: ¿qué son los fractales? Los fractales matemáticos puros son «objetos», representaciones geométricas de conjuntos que se generan por la repetición de un mismo patrón estructural a distintas escalas, como ilustran el famoso conjunto triádico de Cántor y la curva de von Koch (Figura 3). Se dice que los objetos fractales son autosemejantes y su dimensión fractal es normalmente un número no entero. No todos los objetos fractales son tan «sencillos» como la curva de von Koch. El más conocido fractal matemático «sofisticado» es el conjunto multitud de Mandelbrot (Figura 3).

Como los antecedentes de los estudios de Lichtenberg y Fry Richardson ilustran, los fractales no son una mera curiosidad geométrica, ya que las estructuras fractales son ubicuas en la naturaleza, desde la mencionada forma del rayo y las costas sinuosas a la estructura de los copos de nieve, la forma de ciertas coliflores, el patrón de los anillos de Saturno, las grandes cuencas fluviales, las formas de las neuronas, la estructura arborescente de nuestro tracto respiratorio, el entramado de nuestro sistema circulatorio o los patrones de crecimiento de depósitos salinos y otros fenómenos de agregación limitada por la difusión. Estas estructuras se caracterizan por su robustez, acompañada desde el punto de vista arquitectónico y de la ingeniería por una evidente ligereza y economía de recursos.

El desarrollo de la geometría fractal no sólo ha permitido explorar las características estructurales de conjuntos matemáticos hasta hace poco catalogados como «patológicos», y de infinidad de objetos y estructuras reales difícilmente reducibles a las geometrías clásicas, sino que además, en poco tiempo, ha contribuido al desarrollo de una ingente cantidad de aplicaciones en muy diversos ámbitos de la ciencia, la técnica, las artes y las industrias, algunas de las cuáles quedan mencionadas en la Tabla 1.

Aplicaciones de los fractales

(Tabla 1)

En TIC*, ingenierías y matemáticas

- Caracterización de la geometría de objetos fractales
- Sistemas de "archivado" fractal
- Compresión de imágenes sin pixelización
- Diseño de antenas, microcircuitos, etc
- Arquitectura fractal

En ciencias físicas

- Análisis fractal del relieve y de la superficie de materiales
- Modulación de sistemas "complejos" en mecánica de fluidos
- Estudio del fenómeno de agregación limitada por difusión

En Biología

- Descripción de modelos poblacionales
- Análisis fractal de "líneas de sutura"
- Análisis de procesos pulsátiles
- Análisis de la complejidad de secuencias génicas
- Análisis fractal del "frente de crecimiento" de un tumor

En Artes

- Imitación fractal y arte fractal
- Estudio de la "fractalidad" de composiciones musicales
- Creación de música fractal

*TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación

La noción científica del caos y sus implicaciones

El concepto científico de caos guarda poca relación con el significado que cotidianamente se da a dicha palabra. En ciencia, el caos alude a un régimen dinámico especial caracterizado por su impredecibilidad. Aunque el estudio científico del caos se ha desarrollado en el último cuarto de siglo, los estudiosos del caos suelen reconocer como antecedente la resolución del problema-reto de «los tres objetos» por el último matemático universal, Henri Poincaré, hace más de cien años.

Suele mencionarse como estudio pionero del caos el realizado por el meteorólogo Lorenz a principios de los años sesenta del siglo XX cuando, al emplear grandes sistemas de ecuaciones diferenciales considerando las múltiples variables que afectan al tiempo atmosférico para simular su comportamiento, y así poder hacer mejores y más fiables predicciones, se dio cuenta de que la dinámica -la evolución con respecto al tiempo- de sus simulaciones manifestaba una extraordinaria sensibilidad a las condiciones iniciales. Dicho en otras palabras, por muy próximas que fueran las condiciones iniciales en distintas simulaciones, pasado un cierto tiempo sus dinámicas empezaban a divergir y terminaban generando predicciones muy distintas entre sí. Esta remarkable propiedad es la que el propio Lorenz popularizó años más tardes con la imagen metafórica del «efecto mariposa». Lorenz usó ecuaciones deterministas, es decir, carentes de componentes aleatorias (azar) que pudieran justificar la impredecibilidad de la evolución de sus simulaciones. Así pues, el caos no es fruto del azar.

Pero no hay que pensar que sólo se produce caos en sistemas complejos caracterizados por gran cantidad de variables. Muy al contrario, incluso sistemas con una única variable independiente pueden generar dinámicas caóticas. De hecho, el matemático Ian Stewart nos enseña en su libro *¿Juega Dios a los dados?* que ¡cualquiera puede generar caos con una simple calculadora! Para ello, basta con iterar una ecuación tan sencilla como $x(n+1) = kx(n) - 1$ para determinados valores del parámetro k . No se trata de un mero juego recreativo, sino que tiene notables aplicaciones en el estudio científico de sistemas dinámicos, como es el caso de una población natural. En los años setenta, el ecólogo Robert May, simulando la dinámica de poblaciones mediante la

iteración de una ecuación logística, obtuvo diversos tipos de dinámica, incluyendo la caótica.

Hay que advertir que, si bien las trayectorias específicas de un sistema dinámico en régimen caótico son impredecibles, al mismo tiempo tienden hacia regiones del espacio de fases -el espacio definido por las variables que controlan el comportamiento del sistema- de límites definidos ¡y geometría fractal! Son los llamados atractores extraños, como el atractor de Lorenz representado en la Figura 4.

En resumen, el caos «canónico» se caracteriza por tres propiedades: 1) es determinista (no estocástico); 2) su dinámica manifiesta sensibilidad a las condiciones iniciales; 3) en sus dinámicas son característicos los atractores extraños.

Es particularmente interesante el hecho de que la evolución impredecible del sistema en régimen caótico eventualmente pueda conducir su dinámica por «islas transitorias» de orden. Y, lo que es más notable, si el sistema consigue «escapar» del atractor extraño, su dinámica puede evolucionar hacia otros regímenes caracterizados por atractores que mantienen el sistema en estados invariantes con el tiempo (atractores puntuales, estados estacionarios) o en estados de evolución cíclica (atractores ciclos límites). En estos dos sentidos, pueden entenderse expresiones como «el caos lleva la semilla del orden» o «puede emerger orden a partir del caos».

Entre las muchas aplicaciones del caos al desarrollo científico y tecnológico, hay un ejemplo sorprendente por contraintuitivo: analizando en detalle a distintas escalas de tiempo los electrocardiogramas, el Dr. Leon Glass y otros han comprobado que la dinámica cardíaca de las personas sanas es esencialmente caótica, y que dicha dinámica se pierde, con aparición de atractores no caóticos (como el atractor puntual o el ciclo límite), en el caso de patología cardíacas. Así pues, el caos está asociado a la salud y el «orden» a la enfermedad y, eventualmente, a la muerte. Aunque contraintuitiva, esta idea encaja perfectamente con la noción termodinámica de vida y muerte: un sistema vivo está termodinámicamente alejado del equilibrio y sólo alcanza el equilibrio (el orden «más inmutable») cuando deja de estar vivo.

Pero, desde el punto de vista conceptual, el principal impacto que ha supuesto para la ciencia el «descubrimiento» del caos es que su mera existencia impone a escala macroscópica un límite al conocimiento científico sólo comparable al que representa a escala microscópica el principio de incertidumbre de Heisenberg. En palabras de Ian Stewart, con la emergencia del caos «el comportamiento a largo plazo está completamente indeterminado». Por tanto, como remarca el premio Nobel Ilya Prigogine, asistimos en ciencia al «fin de las certidumbres».

Aproximaciones al estudio científico de la complejidad

No se debe confundir caos con complejidad. Los sistemas complejos se caracterizan por estar integrados por «partes constituyentes» con un nivel de conectividad intermedio entre las mismas. Son sistemas cuyo comportamiento como un todo no puede reducirse a la suma de los comportamientos de sus partes individuales. Una simple analogía nos permitirá explicarnos: la molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, pero el «ente» agua es algo distinto al oxígeno y al hidrógeno, y sus propiedades no pueden explicarse meramente en función de las propiedades de sus átomos constituyentes. Por ello, el estudio científico de un sistema complejo sólo puede hacerse atendiendo al sistema completo en su integridad, aunque ello exija un enfoque «de grano grueso». En lenguaje no técnico, si queremos evitar que el árbol no nos deje ver el bosque, no nos queda más remedio que elevarnos y/o alejarnos para tener una imagen completa del bosque, aunque con ello sacrifiquemos visión de detalle.

Uno de los grandes impulsores del estudio científico de la complejidad y de su divulgación, el físico y premio Nobel Murray Gell-Mann pone el énfasis en los sistemas complejos adaptativos, es decir, aquellos con capacidad de «integrar» la información ambiental y de generar respuestas a la misma, permitiéndoles «adaptarse» a los cambios de una forma que remeda a los procesos de aprendizaje. A lo largo del siglo XX, se han formulado independientemente distintas propuestas de

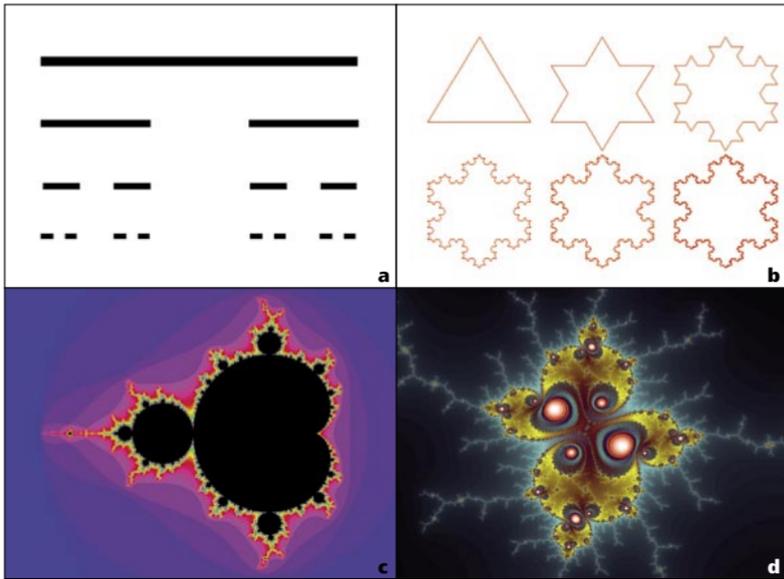


Figura 3. **Diversos fractales matemáticos.** a) Secuencia de generación del conjunto triádico de Cantor. b) Secuencia de generación de la curva de von Koch. c) Conjunto multitud de Mandelbrot. d) Un estilizado fractal matemático

estudio de la complejidad, con diversos enfoques y lenguajes distintos (a veces, fuente de confusión que dificulta una síntesis en un cuerpo de doctrina unitario). Por ejemplo, la termodinámica de los procesos alejados del equilibrio, con la que Ilya Prigogine, a partir de los años treinta, «redescubre» el factor tiempo para la ciencia; o la sinérgica, estudio de la «acción de conjunto», propuesta por Hermann Haken; o el enfoque interdisciplinar que se practica en el Instituto de Santa Fe, con Gell-Mann en posición de «abanderado».

Una noción destacada en el estudio de la complejidad es su posición entre el orden y el caos. Desde el punto de vista informacional, los sistemas ordenados tienen un bajo contenido de información y una elevada compresibilidad. Por el contrario, los sistemas caóticos (como, por otro lado, los sistemas meramente aleatorios) muestran un alto

contenido de información con muy escasa o nula compresibilidad. Pues bien, la complejidad se sitúa en una posición intermedia, tanto en su contenido de información, cuanto en su grado de compresibilidad.

Otra característica notable de los sistemas complejos adaptativos es la emergencia en ellos de orden mediante procesos de autoorganización. En relación con ello, uno de los más destacables esfuerzos de sintetizar y sistematizar el estudio científico de la complejidad lo constituye la noción de criticalidad autoorganizada, formulada por el físico Per Bak, prematuramente desaparecido. Los sistemas complejos que manifiestan criticalidad autoorganizada presentan diversas características comunes: 1) En ellos pueden darse eventos «catastróficos» o avalanchas; 2) las avalanchas se producen a todas las escalas de tiempo; 3) por tanto, la distribución de avalanchas en el tiempo presenta estructura «fractal» (técnicamente, se habla de ruido $1/f$); 4) Y las frecuencias de las avalanchas en función de la escala de medida



Figura 4. **Atractor extraño de Lorenz.** Los atractores extraños son las regiones del espacio de fases hacia las que tienden las dinámicas de sistemas que entran en régimen caótico. La forma está perfectamente definida y delimitada; en cambio, en su interior, las trayectorias del sistema son impredecibles. Los atractores extraños representan, pues, dos de las propiedades de los sistemas caóticos: determinismo e impredecibilidad. Geométricamente, los atractores extraños son objetos con dimensión fractal.

siguen leyes de potencia negativas (se dice que son "libres de escala"). Bak demostró en los años noventa que el estudio científico de las dinámicas de formación y desmoronamiento de montones de arena es un excelente sistema modelo para el estudio de sistemas que exhiben criticalidad autoorganizada. De hecho, para Bak la ciencia de la criticalidad autoorganizada sería el auténtico fundamento teórico del comportamiento de los sistemas complejos, tal como explica y justifica en su libro *How Nature Works*.

Un aspecto particularmente interesante de los sistemas complejos es el estudio de su evolución. En esta área ha contribuido muy significativamente el biólogo teórico Stuart Kauffman con su análisis de redes genéticas booleanas. Kauffman propone que en la evolución de los sistemas complejos no sólo interviene el motor de la «mutación-selección-adaptación» del neodarwinismo sino que también juega un papel muy destacado la propia dinámica del sistema. En concreto, los fenómenos de autocatálisis y los procesos de autoorganización posibilitarían la emergencia de un orden gratuito.

Los sistemas complejos están formados por un cierto número de elementos con cierta conectividad intermedia entre ellos. De hecho, por doquier tenemos muestras de que vivimos en un mundo conectado. Pues bien, es posible estudiar las conexiones entre los componentes de un sistema empleando la teoría de redes. En los últimos años, se ha demostrado que muchas redes naturales, sociales y humanas presentan una estructura topológica «libre de escala», muy distinta de la esperable de una red aleatoria.

Por otra parte, vivimos en un mundo en el que son ubicuos los fenómenos de sincronización, una de las manifestaciones de la autoorganización de los sistemas complejos en el espacio y en el tiempo. Pues bien, también los fenómenos de sincronización pueden ser estudiados en el marco conceptual de la dinámica de los sistemas complejos.

Como biólogo «militante», no puedo terminar esta sección sin mencionar que los seres vivos representan, quizá, los casos más interesantes de sistemas complejos y un apasionante reto para su estudio desde las perspectivas holistas que promueven las ciencias de la complejidad.

Recapitulando

En este capítulo, se ha presentado al lector una breve panorámica de cómo se puede abordar científicamente el estudio de la complejidad de la naturaleza. Los principales mensajes que pueden extraerse pueden resumirse como sigue:

1. La ciencia triunfante contemporánea es, esencialmente, reduccionista, presenta una fuerte dependencia tecnológica y está compartimentada en múltiples especialidades.
2. Pero el análisis o la mera descripción de fenómenos, procesos y sistemas complejos exigen el empleo complementario de aproximaciones sistémicas, holísticas.
3. Cada vez se hace más acuciente la necesidad de superar la artificial dicotomía ciencias/humanidades y de promover la cooperación entre las disciplinas.
4. El estudio científico de los sistemas complejos tiende a ir
 - a. Del reduccionismo al holismo
 - b. Del análisis de las partes a la comprensión del todo
 - c. De lo disciplinar a lo multidisciplinar; de aquí a lo interdisciplinar; y, en una última etapa, a lo transdisciplinar.
5. Fractales, caos y complejidad son términos claves en las emergentes ciencias de los sistemas dinámicos complejos.

Al comienzo de este capítulo se mencionaba la navaja de Occam. Ahora, a modo de conclusión (necesariamente provisional), me atrevería a parafrasear a Occam y enunciar:

El mundo es muy complejo, pero los principios y leyes que lo rigen (y, por tanto, su descripción científica) no tienen por qué serlo.

Nota al pie.

Agradecimiento: Gracias a Raúl Montañez Martínez por dibujar expresamente para este capítulo su Figura 1 y por permitirme reproducirla.