

Fuente:

Simon, H. A., *Las ciencias de lo artificial*.

México: Pomares/UAM-C, 2006.

7

CONCEPCIONES ALTERNATIVAS DE LA COMPLEJIDAD

LOS capítulos precedentes de este libro se ocupaban de varios tipos de sistemas artificiales. Los ejemplos estudiados —concretamente, los sistemas económicos; la empresa comercial, la mente humana, los modernos proyectos de ingeniería y los planes sociales— van de los medianamente a los altamente complejos (no necesariamente en el orden en que los he nombrado). Estos dos capítulos finales tratan el tema de la complejidad desde un punto de vista más general, para ver qué nos puede decir sobre la estructura y el modo de operar de éstos y de otros grandes sistemas que tienen una notable importancia en el mundo actual.

CONCEPCIONES DE LA COMPLEJIDAD

Durante este siglo la complejidad y los sistemas complejos han sido el foco de atención en diversas etapas. Un primer brote, tras la Primera Guerra Mundial, dio a luz al término *holismo* y el interés por los *Gestalts* y la *evolución creativa*. En un segundo brote importante, tras la Segunda Guerra Mundial, los términos favoritos fueron *información*, *respuesta*, *cibernética* y *sistemas generales*. En el momento actual, la complejidad suele relacionarse con caos, sistemas adaptativos, algoritmos genéticos y autómatas celulares.

Aun cuando los tres momentos comparten el interés por la complejidad, cada uno de ellos ha puesto especial atención sobre distintos

aspectos de lo complejo. El interés por la complejidad tras la Primera Guerra Mundial ponía el acento en la idea de que el todo trasciende la suma de las partes, lo que le daba un marcado sabor antirreduccionista. La oleada posterior a la Segunda Guerra Mundial fue más bien neutral en lo referente al reduccionismo, y se centró en los roles de la respuesta y la homeostasis (autoestabilización) en el mantenimiento de los sistemas complejos. El interés actual por la complejidad se dirige principalmente a los mecanismos que crean y sostienen la complejidad y a las herramientas analíticas para describirla y analizarla.

Holismo y reduccionismo

Holismo es la designación moderna de una idea muy antigua. En palabras de su autor, el estadista y filósofo sudafricano J. C. Smuts:

[El holismo] considera los objetos naturales como totalidades [...] Contempla la naturaleza como un conjunto de cuerpos y cosas discretas y concretas [...] [las cuales] no pueden ser completamente reducidas a sus partes; y [...] que siendo más que las sumas de sus partes, el mero ensamblaje mecánico de sus partes no las produce ni da cuenta de su comportamiento y características.¹

Del holismo pueden darse interpretaciones más o menos fuertes. Aplicado a los sistemas vivos, la aseveración de que «el mero ensamblaje mecánico de sus partes no los produce ni da cuenta de su comportamiento y características» implica un vitalismo que es del todo antitético a la biología molecular moderna. Aplicado a la mente en particular, sirve como argumento para defender tanto la afirmación de que las máquinas no pueden pensar, como la de que para pensar se requiere más que la mera actividad y organización de las neuronas. Aplicado a sistemas complejos en general, postula nuevas propiedades de sistema y relaciones entre subsistemas que no tenían lugar en los componentes del

sistema; por lo tanto, defiende el principio de emergencia como un principio «creativo» y rechaza las explicaciones mecánicas del mismo.

En una interpretación laxa, la emergencia simplemente significa que las partes de un sistema complejo mantienen relaciones mutuas que no se dan entre las partes aisladas. Así, sólo puede haber atracciones gravitacionales entre cuerpos cuando dos o más cuerpos interactúan entre sí. Podemos aprender algo sobre las (relativas) aceleraciones gravitacionales de las estrellas binarias, pero no de las estrellas aisladas.

Asimismo, al estudiar las estructuras sólo de proteínas individuales, nada presagia el modo en que una molécula de proteína que cumpla la función de enzima proporciona una plantilla en la cual dos o más moléculas pueden encajar y reaccionar de tal modo que queden unidas. La plantilla, una propiedad física real de la enzima, no tiene ninguna función hasta que no se sitúa en el entorno de otras moléculas de un cierto tipo.

A pesar de que la función de la plantilla es «emergente», ya que no se da en la molécula de la enzima aislada, el proceso obligatorio, así como las fuerzas implicadas, permite una explicación íntegramente reduccionista en términos de las propiedades físicas y químicas conocidas de las moléculas que participan en él. Por consiguiente, esta forma laxa de la emergencia no plantea problema alguno incluso para el reduccionista más radical.

La «emergencia laxa» reviste diversas formas. A la hora de describir un sistema complejo, a menudo nos parece conveniente introducir nuevos términos teóricos, como la masa inerte en mecánica o el voltaje en la teoría de circuitos, con el fin de nombrar las cantidades que no son directamente observables pero que pueden definirse por las relaciones entre las cantidades que sí lo son.² Podemos usar esos términos para evitar hacer referencia a detalles de los subsistemas de componentes y referirnos tan sólo a sus propiedades agregadas.

Ohm, por ejemplo, formuló su ley de la resistencia eléctrica construyendo un circuito formado por una batería que conducía la corriente

¹ J. C. Smuts, «Holism», *Encyclopaedia Britannica*, 14.ª ed., vol. 11 (1929), pág. 640.

² H. A. Simon, «The Axiomatization of Physical Theories», *Philosophy of Science* 37 (1970), 16-26.

te a través de un cable y un amperímetro que calculaba la potencia magnética inducida por la corriente. Al cambiar la longitud del conductor, se modificaba la corriente. La ecuación que relacionaba la longitud del conductor (resistencia) con la potencia registrada por el amperímetro tenía dos constantes, independientes de la longitud del conductor pero que variaban cuando se cambiaba la batería por otra. Estas constantes fueron etiquetadas como *voltaje* y *resistencia interna* de la batería, a la que no se analizaba y se consideraba como «caja negra». El voltaje y la resistencia interna no se miden directamente, sino que son términos teóricos que pueden inferirse de la resistencia y de la corriente calculadas con la ayuda de la ley de Ohm.

Mientras que a menudo los detalles de los componentes pueden ser ignorados al estudiar sus interacciones en el sistema de la totalidad, otras veces puede describirse detalladamente el comportamiento a corto plazo de los subsistemas individuales sin prestar atención a las interacciones (más lentas) entre los subsistemas. En economía, se suele estudiar la interacción de mercados estrechamente relacionados —por ejemplo, los mercados de mineral de hierro, hierro en lingotes, acero en láminas y de los productos del acero— suponiendo que todas las demás relaciones de oferta y demanda permanecen constantes. En el siguiente capítulo se desarrollará esta casi independencia de los sistemas jerárquicos respecto de los detalles de los subsistemas que los componen, así como la independencia a corto plazo de los subsistemas respecto de los movimientos más lentos del sistema total.

En virtud de esta interpretación laxa de la emergencia, es posible mantenerse fiel al reduccionismo en principio (y yo me mantendré fiel a él) a pesar de que no sea fácil (a menudo ni siquiera factible computacionalmente) inferir estrictamente las propiedades de la totalidad a partir del conocimiento de las propiedades de las partes. De esta forma pragmática, se pueden construir teorías casi independientes para cada nivel sucesivo de complejidad, pero al mismo tiempo construir teorías puente que muestren cómo cada nivel superior puede ser explicado en virtud de los elementos y relaciones del nivel inmediatamente inferior.

Este es, en efecto, el método seguido tradicionalmente por las ciencias al ir subiendo desde las partículas elementales, a través de átomos

y moléculas, hasta llegar a las células, los órganos y los organismos. Sin embargo, la historia reciente se ha desarrollado, con la misma frecuencia, en la dirección opuesta: de arriba abajo. Ya hemos visto, en el capítulo primero, que en ocasiones las teorías científicas se aguantan por los pelos.

La cibernética y la teoría general de sistemas

Los años de la Segunda Guerra Mundial, así como el período inmediatamente posterior, asistieron a la aparición de lo que Norbert Wiener llamó «cibernética»: una combinación de la teoría del servomecanismo (sistemas de control de retroalimentación), de la teoría de la información y de ordenadores con programa almacenado, una combinación que abre perspectivas absolutamente nuevas sobre la complejidad. La teoría de la información explica la complejidad organizada en virtud de la reducción de la entropía (desorden) que se logra cuando los sistemas (por ejemplo los organismos) absorben la energía de fuentes externas y la convierten en patrón o estructura. En la teoría de la información, tanto la energía como la información y el patrón corresponden a la entropía negativa.

El control por retroalimentación muestra cómo un sistema puede orientar su actividad hacia la consecución de fines y adaptarse a un entorno cambiante,³ y de este modo deshace el misterio de la teleología. Lo que se requiere es la capacidad para descubrir el fin, para detectar las diferencias entre la situación actual y el fin, así como para determinar las acciones que pueden reducir tales diferencias: precisamente las capacidades que aporta un sistema como el programa General Problem Solver [Resolvidor general de problemas]. No se tardó en utilizar este descubrimiento para construir pequeños robots capaces de maniobrar por una habitación de forma autónoma.⁴ A medida que se disponía de

³ A. Rosenblueth, N. Wiener y J. Bigelow, «Behavior, Purpose and Teleology», *Philosophy of Science* 10 (1943), 18-24.

⁴ W. Grey Walter, «An Imitation of Life», *Scientific American* 182(5) (1950):42.

los ordenadores, se fueron construyendo sistemas con niveles de complejidad hasta entonces inimaginables. Y gracias a su capacidad para interpretar y ejecutar los programas que ellos mismos tenían almacenados en su interior, los ordenadores dieron pie al estudio de la inteligencia artificial.

Estos avances incentivaron tanto el estudio de sistemas complejos como «totalidades», especialmente de los sistemas adaptativos orientados a un fin, como, simultáneamente, la explicación reductiva de las propiedades del sistema en términos de mecanismos. El holismo fue confrontado con el reduccionismo de un modo que hasta entonces no había sido posible, una confrontación que sigue vigente hasta hoy en el debate filosófico acerca de sistemas artificiales.

Durante estos años de posguerra, surgieron una serie de propuestas para el desarrollo de una «teoría general de sistemas» que, haciendo abstracción de las propiedades específicas de los sistemas físico, biológico o social, fuera aplicable a todos ellos.⁵ Por encomiable que sea tal propósito, no puede dejar de parecernos que unos sistemas tan diferentes difícilmente pueden tener en común propiedades que no sean triviales. La metáfora y la analogía serán de mucha ayuda en algunos casos, pero también pueden confundirnos en otros. Todo depende de si las similitudes que capta la metáfora son significativas o superficiales.

Aunque una teoría general de sistemas sea un objetivo demasiado ambiguo, no por ello ha de ser vano el empeño de buscar propiedades en común entre amplias *clases* de sistemas complejos. Las ideas que se engloban bajo la designación de cibernética constituyen, si no una teoría, al menos un punto de vista que ha resultado fructífero en un extenso campo de aplicaciones.⁶ Ha sido muy útil, por ejemplo, a la hora de estudiar el comportamiento de sistemas adaptativos en términos de

⁵ Véanse concretamente los anuarios de la Sociedad para la Investigación General de Sistemas. Algunos exponentes prominentes de la teoría general de sistemas fueron L. Von Bertalanffy, K. Boulding, R. W. Gerard y, todavía en activo, J. G. Miller.

⁶ N. Wiener, *Cybernetics*. Nueva York: Wiley, 1948. Para un precursor imaginativo, véase A. J. Lotka, *Elements of Mathematical Biology*. Nueva York: Dover Publications, 1951, publicado por vez primera en 1924 como *Elements of Physical Biology*.

respuesta y homeostasis y de aplicar a estos conceptos la teoría de la información selectiva.⁷ Los conceptos de respuesta y de información proporcionan un marco de referencia para estudiar una extensa gama de situaciones, del mismo modo que lo proporcionan las nociones de evolución, relativismo, método axiomático y operacionalismo.

La principal contribución de esta segunda ola de investigación sobre la complejidad no estriba tanto en la idea global de una teoría general de sistemas cuanto en los conceptos específicos sobre los que llamó la atención. Esta opinión se ilustra en el siguiente capítulo, que se fija en las propiedades de aquellos sistemas complejos particulares que tienen una estructura jerárquica y saca las consecuencias que para el comportamiento de los sistemas tiene una noción fuerte de la jerarquía (o de la cuasi-descomponibilidad, tal como yo la llamo).

EL INTERÉS ACTUAL POR LA COMPLEJIDAD

El tercer brote de interés por la complejidad, aún vigente en la actualidad, comparte muchas de las características del segundo. Lo motiva en gran parte la creciente necesidad de entender y enfrentarse a algunos de los sistemas a gran escala mundial: el medio ambiente, en primer lugar, la sociedad global que nuestra especie ha creado, en segundo lugar, y los organismos, en tercer lugar. Pero tal motivación por sí sola no podía fijar la atención sobre la complejidad por mucho tiempo si no se ofrecían nuevas formas de pensarla. Han surgido nuevas ideas que iban más allá de las herramientas y los conceptos que habían aparecido en la segunda oleada, acompañadas del descubrimiento de importantes algoritmos matemáticos y computacionales. Estas ideas llevan etiquetas como *catástrofe*, *caos*, *algoritmos genéticos* y *autómatas celulares*.

Como suele pasar, las-etiquetas presentan una cierta tendencia a adoptar una vida propia. El tono apocalíptico de «catástrofe» o «caos» tiene mucho que ver con la época de ansiedad en la cual fueron acuña-

⁷ C. Shannon y W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949; W. R. Ashby, *Design for a Brain*. New York: Wiley, 1952.

dos estos conceptos. No obstante, su valor como conceptos no depende tanto de la retórica que evocan como de su capacidad de ofrecer respuestas concretas a todo lo relacionado con la complejidad. En cuanto a los conceptos que se acaban de nombrar, no se ha producido todavía un veredicto final sobre ellos. Voy a comentar brevemente cada uno de ellos, en su doble vertiente de alternativas y complementos al enfoque de la complejidad jerárquica que desarrollaré en el siguiente capítulo.

Teoría de catástrofes

La teoría de catástrofes, que apareció en escena allá por 1968,⁸ causó un gran revuelo y prácticamente desapareció del mapa pocos años más tarde. Esta teoría se basa en un corpus matemático sólido que se encarga de la clasificación de sistemas dinámicos no lineales en función de sus modos de comportamiento. Los eventos catastróficos ocurren en un tipo especial de sistema. Este puede adoptar dos (o más) estados estables distintos (equilibrios estáticos, por ejemplo, o ciclos periódicos); pero cuando el sistema se encuentra en uno de estos dos estados, una leve variación en un parámetro del sistema puede causar su repentino cambio al otro estado —o a un estado inestable en el que las variables aumentan sin límite—. El matemático R. Thom construyó una clasificación topológica de sistemas de dos variables y de tres variables en función de los tipos de catástrofes que podían o no sufrir.

No es difícil pensar en sistemas naturales que muestran un comportamiento de este tipo —comportamiento estable seguido de un cambio repentino hacia el desequilibrio o hacia otro equilibrio muy distinto—. Un ejemplo que suele citarse es el del perro que, ante una amenaza, o pasa al ataque repentinamente, o es presa del miedo y huye. Se han estudiado ejemplos más complejos: por citar uno, una población de orugas que infesta un bosque de pinos. Las orugas se reproducen rá-

⁸ Véase R. Thom, *An Outline of a General Theory of Models*. Reading, MA: Benjamin, 1975.

pidamente y no tardan en alcanzar un equilibrio de densidad máxima; pero el lento crecimiento continuo de pinos altera de modo gradual el límite de la población de orugas hasta hacerla explotar cuando se excede el punto crítico de la densidad de los pinos.⁹

En cuanto a las circunstancias que lo crean, el mecanismo de la catástrofe es eficaz y la metáfora, evocativa, pero en la práctica sólo se ha encontrado un número limitado de situaciones en que el modelo conduzca a un nivel de análisis que permita ir más allá. La mayoría de las aplicaciones que inicialmente estimularon la imaginación de la gente, como el perro que ataca o que huye, no eran más que explicaciones *a posteriori* de fenómenos que ya eran hartos conocidos. Por esto, tanto para la opinión pública como en la bibliografía sobre la complejidad, la teoría de catástrofes actualmente goza de una relevancia mucho menor que la que tuvo veinticinco años atrás.

Complejidad y caos

La teoría del caos también es una teoría matemática, que en este caso tiene una larga historia que se remonta hasta Poincaré.¹⁰ Los sistemas caóticos son sistemas dinámicos deterministas que, en caso de producirse modificaciones en sus condiciones iniciales, aunque sean infinitesimales, pueden sufrir perturbaciones radicales en su trayectoria. Por tanto, aunque sean sistemas deterministas, su comportamiento preciso en el tiempo es impredecible, pues pequeñas perturbaciones causan enormes cambios en sus trayectorias. A pesar de todo el esfuerzo por parte de matemáticos franceses en la tradición de Poincaré para que el tema de los sistemas caóticos no muriera, éstos se han mostrado tan in-

⁹ Para más detalles sobre el modelo de las orugas y los pinos, véase T. F. H. Allen y T. B. Starr, *Ecology: Perspectives for Ecological Complexity*. Chicago, Illinois: University of Chicago Press, 1982, y las referencias que allí se citan. En el siguiente capítulo veremos cómo este mismo ejemplo puede ser descrito como un sistema casi descomponible.

¹⁰ H. Poincaré, *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*. París: Gauthier-Villars, 1892.

tratables desde una aproximación matemática que el progreso en la materia no pasó de ser modesto hasta bien superada la mitad del siglo XX. La posibilidad de utilizar ordenadores que mostraran y exploraran el comportamiento caótico de estos sistemas ha sido fundamental para el avance de la teoría.

Gradualmente, los investigadores en un buen número de ciencias empezaron a sospechar que fenómenos importantes que trataban de entender eran, en este sentido técnico, caóticos. Uno de los primeros fue el meteorólogo E. N. Lorenz, quien a principios de los sesenta comenzó a explorar la posibilidad de que el tiempo meteorológico fuera un sistema caótico —la posibilidad de que el batir de alas de una mariposa situada en Singapur pudiera causar una tormenta en Nueva York—. Al poco tiempo, la turbulencia de fluidos en general fue estudiada en términos de caos; del mismo modo que se examinó en qué medida era imputable al caos el comportamiento complejo de una amplia gama de sistemas físicos y biológicos. Fue a finales de los setenta cuando empezaron a aparecer pruebas experimentales sólidas que confirmaban que algunos sistemas específicos se comportan de forma caótica.¹¹

El crecimiento de la atención dispensada al caos debe verse en el contexto de nuestra comprensión general de los sistemas dinámicos. Durante mucho tiempo hemos tenido una teoría bastante general de sistemas de ecuaciones diferenciales *lineales* y de sus soluciones cerradas. Con sistemas de ecuaciones *no lineales*, la solución era menos satisfactoria. Bajo algunas condiciones de frontera simples, se conocía la solución de un número importante de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales no lineales que capturan las leyes de varios tipos de movimiento ondulatorio. Pero más allá de estos casos particulares, el conocimiento se limitaba a los métodos para analizar cualitativamente el comportamiento local y dividir en regiones discretas el espacio de estados admisibles. En cada una de esas regiones ocurrirían tipos específicos de com-

¹¹ Una excelente selección de la bibliografía del caos, tanto matemática como experimental, hasta mediados de los ochenta, puede encontrarse en P. Cvitanović (ed.), *Universality in Chaos*. Bristol: Adam Hilger, 1986.

portamiento (por ejemplo, el movimiento hacia el equilibrio, la salida del equilibrio inestable, el movimiento de estado estacionario en ciclos límite).¹²

Así es como era tratado corrientemente en los libros de texto el análisis no lineal, y más allá de estas generalizaciones cualitativas mundanas, los sistemas no lineales complejos tenían que ser estudiados principalmente por simulación numérica con ordenadores. La mayoría de los grandes ordenadores y superordenadores de la última mitad de siglo han estado ocupados simulando numéricamente el comportamiento de los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales que describen la dinámica de los aviones, de las pilas atómicas, de la atmósfera y los sistemas turbulentos en general. Como los sistemas caóticos no solían ser tratados en los libros de texto típicos, la teoría entonces corriente de sistemas no lineales proporcionaba poca ayuda a la hora de tratar fenómenos como la turbulencia excepto a un nivel agregado y muy aproximado.

Bajo estas circunstancias, a finales de los setenta y principios de los ochenta nuevos descubrimientos sobre el caos generados por ordenador despertaron un gran interés y entusiasmo en una variedad de campos cuyos fenómenos ya se sospechaba que eran caóticos y ahora se esperaba que se pudieran comprender mejor con la nueva teoría. Los cálculos numéricos en sistemas no lineales simples revelaron insospechadas invariantes («números universales») que predecían, para muchas clases de estos sistemas, en qué punto pasarían de un comportamiento ordenado a otro caótico.¹³ Hasta que no se dispuso de ordenadores de alta velocidad que las revelaran, tales regularidades eran invisibles.

Ahora se ha logrado un entendimiento profundo de muchos aspectos del caos, pero decir que «entendemos» no implica que podamos predecir. El caos condujo al descubrimiento de una nueva, y generalizada,

¹² Una fuente típica es A. A. Andronov, E. A. Leontovich, I. I. Gordon y A. G. Maier, *Qualitative Theory of Second-Order Dynamic Systems*. Wiley, Nueva York: 1973.

¹³ M. J. Feigenbaum, «Universal Behavior in Nonlinear Systems», *Los Alamos Science* 1 (1980):4-27. Este y otros artículos clásicos sobre el caos están reeditados en P. Cvitanović, ed., *op. cit.*

noción del equilibrio —el llamado «atractor extraño»—. En la teoría no lineal clásica, un sistema podía llegar a un equilibrio estable o bien oscilar permanentemente en un ciclo límite, como la órbita de un planeta. Sin embargo, un sistema caótico también podría entrar en una región del espacio de su estado, el atractor extraño, en la que se quedaría permanentemente.

Dentro del atractor extraño, el movimiento no cesaría jamás, ni tampoco sería predecible, y aun siendo determinista, mostraría un patrón aleatorio. Quiere decir esto que pequeños cambios en las direcciones de entrada al atractor extraño, o ligeras modificaciones una vez dentro de él, conducirían el sistema a trayectorias totalmente distintas. Una bola de billar dirigida exactamente sobre un ángulo de 45° en una mesa de billar «ideal» cuadrada rebotará en los lados sucesivos de la mesa y, después de volver al punto de partida, repetirá indefinidamente su trayectoria rectangular. Pero si se disminuye o aumenta el ángulo de 45° en x grados, la bola no volverá jamás al punto de partida sino que seguirá una trayectoria que la acabará llevando a cualquier otro punto de la mesa. La superficie entera de la mesa se ha convertido en un atractor extraño para el comportamiento caótico, y una variación ligera en el ángulo inicial producirá una trayectoria cada vez más divergente.

La teoría del caos quizás no ha mantenido el ritmo frenético de desarrollo que experimentó desde principios de los sesenta hasta finales de los ochenta, pero durante este periodo se ha consolidado como un marco conceptual y una herramienta matemática esencial para el estudio de una clase de sistemas que tienen una gran importancia en el mundo real en un buen número de disciplinas científicas. Los mecanismos del caos son más generales que los de la teoría de catástrofes, pero su campo de aplicación también es mayor. Por tanto, es de esperar que el caos seguirá jugando un papel más importante que las catástrofes en el futuro del estudio de los sistemas complejos.

Racionalidad en un mundo catastrófico o caótico

¿Cuáles son las implicaciones de las catástrofes y el caos para los sistemas que hemos estado estudiando en los seis capítulos anteriores: las

economías, la mente humana y los sistemas complejos diseñados? A pesar de que se han hecho algunos intentos para descubrir el caos en las series temporales económicas, los resultados hasta ahora no han sido concluyentes. No me consta ninguna demostración clara de la existencia de caos en el cerebro, pero existe una creciente evidencia de que el caos juega un papel, aunque todavía no esté muy claro cuál, en el funcionamiento del corazón normal y del corazón deficiente. Los diseñadores frecuentemente construyen sistemas (por ejemplo aviones y barcos) que producen y se enfrentan con éxito a la turbulencia y quizás a otros tipos de caos.

Sobre la base de las pruebas que tenemos, no debemos suponer ni que todos los sistemas con que nos encontramos en el mundo son caóticos, ni que lo son sólo algunos pocos. Por lo demás, tal como muestra el ejemplo del avión, el término ominoso de «caótico» no debe leerse como «intratable». La turbulencia aparece con frecuencia en situaciones y artefactos hidráulicos y aerodinámicos. En tales situaciones, aunque el futuro no es predecible en sus detalles, es ciertamente tratable en tanto que fenómeno agregado. Y si la trayectoria de los tornados y huracanes es notablemente inestable, es lo suficientemente estable a corto plazo como para que podamos ser advertidos a tiempo para refugiarnos de ellos.

Desde Newton, los astrónomos han sido capaces de calcular el movimiento de un sistema de dos cuerpos que ejercen una recíproca atracción gravitacional. Con tres o más cuerpos, nunca obtuvieron más que aproximaciones sobre el movimiento y, de hecho, tenemos hoy razones para creer que, en general, los sistemas gravitacionales con tres o más cuerpos, incluido el sistema solar, son caóticos. Pero no hay razón alguna para anticipar conclusiones funestas a partir de este caos; la presencia del caos simplemente implica que los astrónomos verán frustrados sus intentos de predecir a muy largo plazo las posiciones exactas de los planetas. Todo lo más, provocará una perplejidad que, si bien será igualmente frustrante, no será tan perjudicial como las dificultades con que se encuentran los meteorólogos a la hora de predecir el tiempo.

Por último, ha habido un progreso substancial en el diseño de mecanismos de control capaces de «dominar» el caos llevando los sistemas caóticos, dentro de sus atractores extraños, a pequeñas parcelas con las

propiedades deseadas, de modo que el caos se transforma simplemente en ruido tolerable. Estos mecanismos ofrecen un ejemplo, en consonancia con lo tratado en capítulos precedentes, de la sustitución de la predicción por el control.

Complejidad y evolución

Buena parte de la investigación reciente en sistemas complejos se centra en la emergencia de la complejidad, esto es, de la evolución del sistema. Dos aproximaciones computacionales a la evolución que han reclamado especial atención son los algoritmos genéticos, estudiados por primera vez por Holland,¹⁴ y los algoritmos computacionales para autómatas celulares que simulan la multiplicación y competición de los organismos participantes en el llamado «juego de la vida».

Algoritmos genéticos

Desde un punto de vista evolutivo, un organismo puede ser representado por una lista o vector de rasgos (sus genes). La evolución evalúa este vector en términos de aptitud para la supervivencia. De generación en generación, la distribución de frecuencia de rasgos y sus combinaciones entre los miembros de una especie cambia a través de la reproducción sexual, la recombinación [*crossover*], la inversión [*inversion*] y la mutación. La selección natural hace que los rasgos y las combinaciones de rasgos que contribuyen a una mayor adecuación se multipliquen más rápidamente que los rasgos y combinaciones que conducen a una adecuación menor, y que finalmente los sustituyan.

Programando esta abstracción en un ordenador moderno podemos construir un modelo computacional del proceso de la evolución. La simulación, a su vez, se puede utilizar para estudiar los índices relativos

¹⁴ J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

del crecimiento de la adecuación bajo distintos supuestos sobre el modelo, incluyendo los supuestos sobre los índices de mutación y de salto evolutivo. En el siguiente capítulo nos fijaremos en el caso especial de evolución que se da en sistemas jerárquicos, que parece ser el tipo de sistema predominante en el mundo natural.

Autómatas celulares y el juego de la vida

El ordenador se usa no sólo para calcular las estadísticas de la evolución sino también, a un nivel abstracto, para desarrollar simulaciones de procesos evolutivos. Este ámbito de investigación se remonta, de hecho, al segundo brote de interés por la complejidad, tras la Segunda Guerra Mundial, cuando John von Neumann, basándose en algunas ideas de Stanislaw Ulam, definió abstractamente (pero no implementó) un sistema que era capaz de reproducirse a sí mismo. La idea la mantuvieron en vida Arthur Burks y otros, pero no fue hasta bien entrado el periodo actual de actividad cuando Christopher Langton creó un programa computacional que simulaba un autómata celular que se reproducía a sí mismo.¹⁵ Los programas computacionales pueden crear objetos simbólicos de distintos tipos y aplicar reglas para realizar su replicación o destrucción como función de sus entornos (los cuales incluyen otros objetos cercanos). Con una selección apropiada de los parámetros del sistema, estas simulaciones pueden ofrecer demostraciones vívidas de sistemas que evolucionan y se reproducen a sí mismos. Esta línea de exploración se encuentra aún en un estado de desarrollo muy temprano, depende en gran medida de la simulación computacional y carece de un cuerpo substancial de teoría formal. Pasará bas-

¹⁵ A. W. Burks (ed.), *Essays on Cellular Automata*. Champaign-Urbana: University of Illinois Press, 1970; C. G. Langton (ed.), *Artificial Life*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings, vol. 6. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1989; C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rassmussen (eds.), *Artificial Life II*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings, vol. 10. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1992.

tante tiempo antes de que podamos evaluar su potencial, pero ya nos ha ofrecido un resultado fundamental y esperanzador: los sistemas que se reproducen a sí mismos son una realidad.

CONCLUSIÓN

La complejidad es vista, cada vez más, como una característica clave del mundo en que vivimos y de los sistemas que coexisten en nuestro mundo. No constituye una novedad para la ciencia intentar comprender sistemas complejos: los astrónomos están en ello desde hace milenios, y biólogos, economistas, psicólogos y otros han seguido su ejemplo desde hace algunas generaciones. Lo que es nuevo en la actividad presente no es el estudio de sistemas complejos particulares, sino el estudio del fenómeno de la complejidad en sí misma.

Si, tal como parece, la complejidad (como la ciencia de sistemas) constituye una materia demasiado general como para tener mucho contenido, entonces clases particulares de sistemas complejos que poseen algunas propiedades fuertes, y que proporcionan un buen soporte para teorizar y generalizar, podrían servir como focos de atención. Esto parece cada vez más lo que está ocurriendo, en la medida en que el caos, los algoritmos genéticos, los autómatas celulares, las catástrofes y los sistemas jerárquicos son utilizados como algunos de los puntos focales actualmente visibles. En el siguiente capítulo examinaremos con más detalle este último.

8

LA ARQUITECTURA DE LA COMPLEJIDAD: LOS SISTEMAS JERÁRQUICOS

EN este capítulo me gustaría examinar algunas de las cuestiones que he aprendido sobre determinados tipos de sistemas complejos que se hallan presentes en varias disciplinas científicas.¹ Aunque los conceptos que deseo presentar se desarrollaron en el contexto de fenómenos concretos, las formulaciones teóricas que les corresponden no suelen hacer referencia a sus detalles estructurales sino que, por el contrario, aluden esencialmente a la complejidad de los sistemas analizados, sin especificar las características exactas de su complejidad. Como consecuencia de su naturaleza esencialmente abstracta, dichas teorías pueden tener cierta relevancia —la palabra *aplicación* sería demasiado osada— para distintos tipos de sistemas complejos presentes tanto en las ciencias sociales como en la biología o la física.

Al presentar dichas teorías evitaré pues detenerme en detalles técnicos que, por lo general, pueden encontrarse fácilmente en otras fuentes, y procederé a describir cada teoría en el contexto particular en el que surgió para pasar luego a exponer algunos ejemplos de sistemas complejos de disciplinas distintas a las de la aplicación inicial y para los cuales el marco teórico presentado resulta asimismo pertinente. A lo largo de dicha exposición me referiré también a áreas del conocimiento en las que no soy necesariamente un experto, y puede que ni siquiera un iniciado.

¹ Este capítulo es una revisión de un artículo con el mismo título, y ha sido reimpresso con el permiso de *Proceedings of the American Philosophical Society* 106 (Diciembre 1962): 467-482.