

Complejidad y Ciencias Sociales

Esteban Ruiz Ballesteros y José Luis Solana Ruiz (Editores)



un
i Universidad
Internacional
de Andalucía
A

Complejidad y Ciencias Sociales. Esteban Ruiz Ballesteros y José Luis Solana Ruiz (Editores).

Sevilla: Universidad Internacional de Andalucía, 2013. ISBN 978-84-7993-231-2. Enlace: <http://hdl.handle.net/10334/3620>



El concepto de complejidad y su constelación semántica

José Luis Solana Ruiz

Introducción: objetivos y estructura del texto

El presente texto tiene como objetivo fundamental estudiar y exponer los significados que se le han atribuido al término complejidad en las llamadas «teorías de la complejidad»; de manera más precisa: indagar y exponer los significados con que el concepto de complejidad ha sido utilizado por autores y corrientes teóricas que se han servido de manera significativa de dicho concepto o que han hecho del mismo, o del adjetivo *complejo*, un núcleo esencial, incluso definitorio, de su proyecto investigador y de sus objetos de estudio.

Como veremos, el concepto de complejidad aparece asociado –desde el mismo momento en que fue utilizado de manera explícita, por parte de Warren Weaver, como denominación de determinados tipos de problemas científicos– con otros conceptos (en particular con el de organización) con los que ha establecido distintas relaciones semánticas según los autores y las corrientes de pensamiento.

Por ello, nuestro análisis del concepto de complejidad conlleva necesariamente un análisis paralelo de la constelación semántica en la que este se inscribe, es decir, del conjunto de términos asociados o relacionados con el concepto de complejidad, en cuyo sistema de relaciones semánticas los significados de nuestro concepto se han especificado y han evolucionado.

En la primera de las tres partes que componen este texto, presento un recorrido histórico por las distintas generaciones de teorías de la complejidad y paso luego a exponer los significados que el concepto de complejidad y los conceptos relacionados con este tienen en varias de esas teorías.

No he pretendido hacer un recorrido histórico pormenorizado y completo por las distintas teorías de la complejidad ni exponer, aunque fuese de manera sintética, las principales ideas y tesis de esas teorías, objetivos que hubiesen excedido con creces los límites del presente texto¹. El recorrido que llevo a cabo está orientado –

¹ Para introducirse en las «teorías de la complejidad» el lector interesado puede leer en castellano las siguientes obras: Pagels 1988, Capra 1996,

ese es su objetivo– a poner de relieve y subrayar las principales líneas de evolución conceptual y de desarrollo teórico trazadas por el concepto de complejidad y las nociones vinculadas al mismo.

Soy consciente de que mi recorrido por las distintas generaciones de las teorías de la complejidad es incompleto (he dejado sin citar a autores y corrientes de pensamiento), y del carácter básico de mis exposiciones de las ideas y teorías científicas en las que el concepto de complejidad y su constelación semántica se enmarcan.

El recorrido histórico que efectúo no tiene más pretensión que la de ofrecer al lector una especie de mapa que le permita conocer y ubicar históricamente los autores y las corrientes científicas cuyas ideas relacionadas con la complejidad van a ser analizadas y expuestas en los apartados siguientes. Por lo que se refiere a mi exposición de las teorías de esos autores y corrientes científicas, esta solo tiene como fin aportar el marco teórico mínimo necesario para entender los significados que los autores y las corrientes estudiadas otorgan al concepto de complejidad.

En las otras dos partes que componen el texto, me ocupo de dos de las líneas actuales más importantes de las teorías de la complejidad: el pensamiento complejo de Edgar Morin y las ciencias de la complejidad. A diferencia de lo que ocurre con las denominaciones de las teorías y corrientes científicas que expongo en la primera parte (cibernética, teoría de sistemas, termodinámica...), esas dos líneas actuales incluyen ambas explícitamente a la complejidad o al adjetivo *complejo* en su denominación.

Al tratarse de dos líneas vigentes y en desarrollo en la actualidad, haré una exposición más extensa y detallada tanto de los significados que confieren al concepto de complejidad como de algunas de sus principales teorías (la teoría de la organización de Morin y la teoría de los sistemas complejos adaptativos gestada en

Segarra 2001, Marro 2008, Solé 2009, Rodríguez Zoya 2011. Estas obras, que coinciden en varios o algunos de los asuntos que tratan (los cuales, no obstante, son abordados por sus autores desde perspectivas distintas, lo que resulta enriquecedor para el lector), se ocupan de temas diferentes y, a mi juicio, proporcionan en su conjunto una introducción rigurosa a las teorías, los conceptos y las herramientas de investigación que se relacionan con la complejidad.

el marco de las ciencias de la complejidad). Finalmente, extraeré algunas conclusiones del recorrido histórico-conceptual realizado.

1. Significados del término complejidad y teorías de la complejidad: un recorrido histórico

1.1. De la lengua común a las teorías científicas

1.1.1. Etimología y significados comunes del término complejidad

El concepto de complejidad no es una categoría técnica acuñada desde cero, sino un término del lenguaje común que, como tal, tiene un conjunto de significados históricamente adquiridos y fijados. Esos significados comunes, como no podía ser de otro modo, han condicionado el modo como el término ha sido integrado y utilizado en los discursos eruditos (filosóficos y científicos) y las posibilidades de evolución del mismo en las constelaciones teórico-conceptuales elaboradas en el marco de esos discursos.

El término *complexe* surgió en el siglo XIV en la lengua francesa a partir del latín *complexus* (palabra que resulta de la conjunción de *cum* y de *plecti*, *plexi*, *plectere*, *plexum*) y se utilizaba con los significados de enrollar los cabellos (rizar, trenzar), entrelazar, tejer, enlazar, abrazar, contener una cosa dentro de otra.

En su origen, el verbo *plectere* remite al trabajo del cesterero que trenza ramitas en forma de un círculo en el que el principio y el final (*arché* y *télos*) no se distinguen (Weinmann 1990: 34-35). El prefijo *com* añade a *plectere* el sentido de una dualidad en la que dos elementos se enlazan íntimamente, pero sin anular la dualidad. *Complectere* se utilizaba tanto para referirse al combate entre dos contendientes como al entrelazamiento de dos amantes.

En el siglo XVI, *complexe* fue retomado como adjetivo para calificar lo compuesto por diversos elementos heterogéneos que mantienen entre sí numerosas y diversas relaciones y que, por ello, resultan difíciles de captar, de aprehender. Se habló, así, con ese significado, de una personalidad, una sociedad, un sentimiento y un pensamiento complejos (*complexes*).

El sustantivo *complexité* apareció a mediados del siglo XVIII, para referirse a algo juzgado como complejo generalmente en contraposición a algo valorado como no complejo (como simple).

Desde mediados del siglo XVIII hasta principios del siglo XX, el calificativo *complexe* se introduce y utiliza en varios ámbitos científicos (lingüística, semiótica, matemáticas, música, psicología, química, biología, geometría, economía, medicina). Se habla así, por ejemplo, de complejo de Golgi, complejo de Edipo, complejo ganglio-pulmonar, número complejo. En muchos de esos casos, el término *complejo* remite a un elenco de elementos diversos que, merced a su interdependencia, constituyen un conjunto o todo más o menos coherente.

En castellano, según el *Diccionario* de la Real Academia Española, el significado del término *complejidad* es remitido a los significados del término *complejo*, pues la complejidad se define como «cualidad de complejo». El término *complejo* tiene tres significados fundamentales, que son de interés de cara a nuestra clarificación y comprensión conceptual de la complejidad: 1) compuesto de elementos diversos; 2) complicado: enmarañado, difícil, compuesto de un gran número de piezas; 3) conjunto o unión de dos o más cosas. La complejo, pues, presenta un carácter tanto objetivo (unión de elementos diversos) como subjetivo (difícil de comprender).

Como se verá, varios de los significados más técnicos o eruditos que, en el ámbito de las ciencias naturales y sociales, cobrará la noción de complejidad o se vincularán con la misma (multiplicidad de elementos relacionados, retroacción, sistema, incertidumbre) entroncan con los significados etimológicos o comunes del sustantivo *complejidad* y del adjetivo *complejo*.

1.1.2. Teorías de la complejidad: principales etapas o generaciones

Se han distinguido varias etapas, corrientes o generaciones en el desarrollo histórico de las «teorías de la complejidad», de los planteamientos teóricos relacionados con la idea de complejidad. Expondré a continuación dos de esas clasificaciones históricas.

Herbert A. Simon (1996) distingue tres «etapas», «brotes», «momentos» u «oleadas» relacionadas con la complejidad y los sistemas complejos, en cada una de las cuales se ha puesto la atención en «distintos aspectos de lo complejo» (Simon 1996: 201-202).

Un primer brote se originó tras la Primera Guerra Mundial, puso el acento en la idea de que el todo trasciende la suma de las partes, tuvo un marcado carácter antirreduccionista y reivindicó el holismo². Un segundo brote, surgido tras la Segunda Guerra Mundial, estuvo vinculado a la cibernética y a la teoría de los sistemas generales. Finalmente, Simon distingue un tercer brote, vigente en la actualidad, en el que aparecen nuevas ideas, conceptos y herramientas para pensar y abordar la complejidad y los sistemas complejos, tales como la teoría del caos, la teoría de las catástrofes, los sistemas complejos adaptativos, los algoritmos genéticos y los autómatas celulares.

Como Simon (1996: 216) señala, la complejidad ha sido vista cada vez más por la ciencia «como una característica clave del mundo en que vivimos y de los sistemas que coexisten en nuestro mundo». En esta línea de reflexión, lo novedoso no es tanto el estudio de sistemas complejos particulares, pues no constituye una novedad para la ciencia intentar comprender ese tipo de sistemas³, sino «el estudio del fenómeno de la complejidad en sí mismo».

Más recientemente, Michel Alhadeff-Jones (2008), inspirándose en Simon (1996) y en Le Moigne (1996), considera que de 1940 a nuestros días es posible distinguir la emergencia cronológica de al

² El holismo fue formulado a finales de la década de 1920 por el estadista y filósofo sudafricano J. C. Smuts («Holism», *Encyclopaedia Britannica*, vol. 11, 1929). Según Smuts, el holismo es la consideración de los objetos naturales como «totalidades» que «no pueden ser completamente reducidas a sus partes» y que son, por ello, «más que la suma de sus partes», en el sentido de que «el mero ensamblaje mecánico de sus partes no las produce ni da cuenta de su comportamiento y características» (cit. en Simon 1996: 202). El holismo defiende el principio de emergencia, según el cual un sistema complejo manifiesta propiedades nuevas que no tienen sus componentes.

³ Los átomos, por ejemplo, que fueron considerados como partículas elementales, pasaron a ser tratados esencialmente como sistemas complejos (Simon 1996: 219).

menos tres generaciones de teorías de la complejidad, es decir, de teorías que han contribuido al estudio de fenómenos entendidos como complejos y, de manera más específica, al estudio de lo que Warren Weaver (véase posteriormente) denominó como «complejidad organizada».

1.1.3. Primera generación de teorías de la complejidad

Una primera generación de teorías de la complejidad estaría constituida por las teorías de la información y la comunicación, por las primeras investigaciones con autómatas celulares (*cellular automata*) y con redes neuronales (*neural networks*), y por la cibernética y el análisis operacional.

Las teorías de la información y de la comunicación se desarrollaron a partir de la teoría matemática de la comunicación formulada por Claude Shannon (1949). El primer autómata celular fue diseñado por John von Neumann en la década de 1940. Las redes neuronales, con las que los defensores del modelo conexionista del cerebro pretendían obtener un análogo de este órgano, fueron impulsadas por los trabajos de Warren McCulloch y Walter Pitts (1943). En 1951 Marvin Minsky construyó la primera red neuronal. Posteriormente, a finales de la década de 1950, Frank Rosenblatt construiría su *Perceptron* (dispositivo con conexiones de tipo neuronal capaz de percibir, reconocer e identificar elementos de su entorno).

La cibernética (del griego κυβερνήτης, que significa «timonel») tiene su génesis en los trabajos y estudios conjuntos que realizaron Wiener, Rosenblueth y Bigelow a mediados de la década de 1940. Definida por Wiener (1948: 35) como «la teoría del control y de la comunicación en máquinas y animales», designa a partir de la década de 1950 un vasto campo de investigación centrado en el estudio de circuitos o mecanismos de control de distinto tipo, fundamentalmente mecánicos y biológicos, pero también psicológicos y sociales.

Los grupos de análisis operacional (*operations analysis groups*), equipos pluridisciplinares (*mixed teams approaches*) compuestos por profesionales provenientes de distintos campos científicos (matemáticos, psicólogos, biólogos, sociólogos), fueron constituidos

por las fuerzas armadas británicas y estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial para la resolución de determinados problemas tácticos y estratégicos. Tras la finalización del conflicto bélico, los grupos de análisis operacional se institucionalizaron bajo la denominación de investigación operacional (*Operational Research*), campo de estudios centrado en el desarrollo de algoritmos que permitan enfrentar los procesos de decisión multidimensionales que conllevan incertidumbre (Churchman, Ackoff y Arnoff 1957; Beer 1959).

1.1.4. Segunda generación de teorías de la complejidad

Por lo que a la segunda generación de teorías de la complejidad compete, de esta formarían parte, entre otras, las siguientes ciencias y teorías: ciencias de la computación, ciencias de la gestión e inteligencia artificial, teorías de los sistemas, teorías de la auto-organización (*self-organization*), cibernética de «segundo orden» (*cybernetics of cybernetics*) de Heinz von Foerster (1974), estudio de las dinámicas no lineales (estructuras disipativas, catástrofes, caos y fractales).

En el seno de las ciencias de la computación se gestaron las nociones de complejidad computacional y complejidad algorítmica (*algorithmic complexity*).

Las ciencias de la gestión y de la inteligencia artificial –campo en el que las ciencias de la computación confluyeron con las ciencias económicas, la Psicología y la Lógica– se desarrollan de manera paralela a la institucionalización de la investigación operacional y de las aplicaciones de la cibernética en el campo de la gestión. Para su desarrollo fueron fundamentales los trabajos de Simon (1947) sobre los procesos de toma de decisión (*decision-making processes*) en el seno de organizaciones administrativas y sobre la resolución de problemas heurísticos (*heuristic problem solving*) (Simon y Newell 1958).

La *General System Theory* (teoría general de los sistemas) fue propuesta como proyecto de trabajo por el biólogo Ludwig von Bertalanffy (1968), quien llevó a cabo sus primeros avances; posteriormente, fue impulsada y desarrollada por otros *sistemistas*,

como George Klir, Kenneth Boulding, Anatol Rapoport, Russell Ackoff y Ervin Laszlo. Los trabajos de Forrester (1961) sobre la dinámica de los sistemas (*system dynamics*) y los de Churchman (1968) sobre la aproximación a los sistemas (*system approach*) favorecieron el desarrollo de técnicas para estudiar los componentes y las relaciones de los sistemas.

Las teorías sobre la auto-organización surgieron durante la década de 1950 en el marco de la cibernética, la teoría de sistemas y la teoría de los autómatas (el cibernético W. Ross Ashby ya se había ocupado de la cuestión de la auto-organización a finales de la década anterior). A comienzos de la década de 1960 la problemática de la auto-organización viviente emergió como problema clave en tres influyentes simposios sobre *Self-Organizing Systems* (Yovits y Cameron, ed. 1960; Yovits, Jacobi y Goldstein, ed. 1962; y von Foerster y Zopf ed. 1962). Los trabajos sobre la auto-organización viviente fueron continuados durante los años setenta del siglo XX por varios autores, como Henri Atlan (1970 y 1972). También durante esos años, Francisco Maturana y Humberto Varela (1972) lanzaron su propuesta de la *auto-poiesis* (producción por parte del sistema de los componentes que lo constituyen) como propiedad definitoria de los sistemas vivientes.

Junto a esas corrientes ligadas a la cibernética y a los estudios de la auto-organización viviente, se desarrolló también otra corriente relacionada con la auto-organización, esta ligada a la Escuela de Bruselas capitaneada por el premio Nobel de Química Ilya Prigogine (1947 y 1971). En este caso, la auto-organización se desarrolla en el ámbito de la termodinámica de los procesos irreversibles y de la teoría de las estructuras disipativas. El proceso de surgimiento y configuración de esas estructuras es descrito y explicado como un proceso de auto-organización.

La dinámica no lineal experimentó un importante impulso durante la década de los setenta, propiciado en buena medida por el desarrollo de la informática y, con ello, del incremento de las posibilidades técnicas de estudiar sistemas no lineales mediante simulaciones informáticas.

La conocida como teoría de las catástrofes fue elaborada por el matemático René Thom (1975). Con el término *catástrofe* Thom se refiere a las discontinuidades (transición discontinua, salto de un estado a otro, rupturas de equilibrio) que se pueden presentar en la evolución de un sistema.

La teoría del caos surgió a finales de la década de 1970 y se estableció como tal durante la segunda mitad de la década siguiente. Aunque el nacimiento o interés actual por lo que terminaría denominándose como «caos determinista» tuvo su origen en el *paper* del meteorólogo Edward Lorenz, por entonces investigador en el MIT, titulado «Deterministic Nonperiodic Flow» (1963), no obstante, no fue hasta mediados de la década de 1970, tras los trabajos de David Ruelle y Floris Takens (1971), cuando el caos comenzó a cobrar relevancia en la comunidad científica. El término *chaos* fue introducido por Tien-Yien Li y James A. Yorke en un artículo que publicaron en 1975.

La teoría de los fractales fue presentada por Benoît Mandelbrot a mediados de la década de 1970. Según Mandelbrot (1975/1984: 171), los objetos fractales, que solían considerarse como «patología matemática», han de ser considerados como «la expresión de la robusta complejidad de la realidad». El hecho de que halla sistemas caóticos con atractores extraños y de que estos tengan una estructura fractal conecta la teoría del caos con la geometría de los fractales.

1.1.5. Tercera generación de teorías de la complejidad

La tercera generación de teorías sobre la complejidad que Alhadeff-Jones establece estaría constituida por dos líneas. Por un lado, están las investigaciones que se realizan en el marco de lo que se ha dado en llamar y se conoce como ciencias de la complejidad (*Sciences of Complexity*)⁴. Entre esas investigaciones destacan los

⁴ Esta expresión se acuña a raíz de la creación en 1984 del *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity* (Nuevo México, Estados Unidos), a la que contribuyeron varios premios Nobel de distintas disciplinas (los físicos Murray Gell-Mann, principal impulsor del Instituto, y Philip Anderson; los economistas Kenneth Arrow y Brian Arthur), así como varios investigadores (entre otros: George Cowan, experto en química de elementos radiactivos;

estudios sobre sistemas complejos adaptativos (*Complex Adaptive Systems*), los planteamientos de Chris Langton (1997) sobre la Vida Artificial (*Artificial Life* o *ALife*), las tesis de Per Bak (1991 y 1996) sobre criticalidad auto-organizada (*self-organized criticality*), y los trabajos de John H. Holland (1995) con algoritmos genéticos (*genetic algorithm*), de Stuart Kauffman (1993, 1995 y 2000) con redes booleanas (*boolean networks*) y de Stephen Wolfram (2001) con autómatas celulares.

El algoritmo genético, originariamente denominado «plan adaptativo», fue desarrollado en la década de 1960 por Holland y sus colegas de la Universidad de Michigan. Las redes booleanas aleatorias, prefiguradas por Alan Turing en una serie de escritos de finales de la década de 1930 que permanecieron inéditos hasta 1968, fueron propuestas inicialmente por Kauffman, en 1969, como modelo para comprender una serie de fenómenos genéticos (Kauffman desconocía los textos de Turing).

En las ciencias de la complejidad el ordenador (entendido no solo como *hardware*, sino sobre todo como *software*: programas y algoritmos informáticos) constituye la herramienta de investigación clave y fundamental, tanto por la capacidad de los ordenadores para manejar grandes cantidades de datos como, en especial, por las potencialidades que ofrecen para simular o modelar sistemas o fenómenos complejos cuyo estudio experimental resulta imposible o harto difícil.

La otra línea de la tercera generación de teorías sobre la complejidad la trazan el pensamiento complejo de Edgar Morin (con su obra magna *El método*, publicada en seis volúmenes, 1977-2001) y, en estrecho vínculo con este, la propuesta sistémica o sistemista de Jean-Louis Le Moigne (1979/1984 y 1990) de modelización de la complejidad (*Programme Européen MCX «Modélisation de la complexité»*).

el biólogo Stuart Kauffman; Christopher Langton, experto en sistemas de computación; y el matemático John Conway). El *Santa Fe Institute* está dedicado a la búsqueda de los principios universales, de las reglas o pautas fundamentales, comunes a sistemas complejos adaptativos (un embrión, una sociedad, un ecosistema...) de muy distinta naturaleza (Lewin 1992: 23 y 36).

Como hemos visto, las reflexiones y teorías sobre la complejidad han surgido originariamente en el ámbito de las ciencias matemáticas, físicas, biológicas e informáticas. Solo posteriormente han ido pasando, por distintas vías, a las Ciencias Sociales y las Humanidades. En ese paso, la obra de Edgar Morin ha desempeñado un papel fundamental. También los planteamientos *sistemistas* de Niklas Luhmann (1968, 1974 y 1996) han contribuido a la introducción y difusión de la noción de complejidad en las ciencias sociales y, de manera particular, en los estudios jurídicos y la ciencia de la administración, ámbitos donde el pensamiento complejo de Morin ha tenido una menor repercusión.

1.2. La complejidad y los conceptos asociados a esta en las dos primeras generaciones de teorías sobre la complejidad

Más allá de los autores y las corrientes teóricas que he referido en los puntos anteriores, los analistas que han estudiado la génesis y el desarrollo de las teorías de la complejidad coinciden en designar al texto «Science and Complexity» de Warren Weaver, publicado en 1948 en la *American Scientist*, como el texto que introduce en el ámbito de las ciencias naturales el abordaje de determinadas cuestiones en términos de complejidad⁵. Resulta adecuado, pues, que comencemos nuestras indagaciones históricas sobre la noción de complejidad ocupándonos de dicho texto.

1.2.1. Simplicidad, complejidad desorganizada y complejidad organizada

En su texto fundacional Weaver plantea en términos de «simplicidad», «complejidad», «desorganización» y «organización» determinados problemas científicos.

Según él, antes del siglo XX la Física se había ocupado sobre todo de «problemas de la simplicidad» (*problems of simplicity*),

⁵ La propuesta de una epistemología no cartesiana de las ciencias formulada por Gastón Bachelard (1934) ha sido considerada también por varios autores como un precedente de las reflexiones sobre la complejidad. Bachelard discutió y negó la existencia de fenómenos o realidades simples, entendiendo por «simple» lo no relacionado. Todo fenómeno es «un tejido de relaciones», un compuesto, un todo compuesto de relaciones entre componentes.

del estudio de la correlación entre dos variables. A partir del siglo XX, un poco antes si se tienen en cuenta las aportaciones de J. W. Gibbs, las ciencias físico-matemáticas comenzaron a abordar problemas o situaciones de complejidad desorganizada, esto es, problemas o situaciones en los que el número de variables es muy grande (no estaban solamente implicadas dos, tres o cuatro variables, sino varios miles o incluso millones de ellas) y en los que cada una de las variables tiene un comportamiento irregular (*erratic*) o totalmente desconocido.

Para abordar esos problemas de complejidad desorganizada los científicos desarrollaron técnicas y teorías basadas en la teoría de la probabilidad y en métodos estadísticos (como la mecánica estadística), que permiten obtener promedios, frecuencias medias. En los problemas o las situaciones de complejidad desorganizada, a pesar del comportamiento errático de cada variable individual o del desconocimiento de su comportamiento, el sistema como un todo posee un determinado orden y propiedades medias analizables.

Entre los problemas de la simplicidad y los de la complejidad desorganizada queda una región de problemas, situaciones y fenómenos que presentan aspectos diferenciales importantes⁶.

En primer lugar, se trata de problemas que tienen que ver con el manejo de un número considerable de variables, en comparación con el número de variables involucradas en los problemas de la simplicidad, pero pequeño en comparación con las elevadas o incluso astronómicas cantidades de variables implicadas en las situaciones de complejidad desorganizada.

Pero no es ese su aspecto más importante. La relevancia de los problemas metodológicos que existen en esa región intermedia no reside principalmente en el hecho de que impliquen un número moderado de variables. Lo relevante es que dichos problemas o situaciones muestran

⁶ Weaver no plantea el asunto de la simplicidad y la complejidad en términos de «modelos», como erróneamente cree Carlos Reynoso (2006: 30): «El creador de la distinción entre modelos mecánicos, estadísticos y sistémicos (o complejos) fue sin duda Warren Weaver (1948)». Plantea dicho asunto fundamentalmente en términos de «problemas» (a veces también de «situaciones»); no habla de tres «modelos», sino de tres «problemas»: *Problems of Simplicity*, *Problems of Disorganized Complexity* y *Problems of Organized Complexity*.

la *organización* como característica esencial, es decir, los factores que involucran están interrelacionados, estrechamente ligados, en un todo orgánico (*organic whole*). Se trata, por ello, de problemas de complejidad organizada (*organized complexity*)⁷.

Los problemas de complejidad organizada son, por tanto, problemas que implican tratar simultáneamente con un importante número de factores que están interrelacionados en un todo orgánico.

Una amplia gama de problemas biológicos, médicos, psicológicos, económicos y políticos son problemas de complejidad organizada, presentan esa característica de la complejidad organizada. En las ciencias de la vida, por ejemplo, los problemas importantes casi nunca presentan un carácter de simplicidad. Los fenómenos biológicos importantes pocas veces pueden explicarse y comprenderse aislando algunas variables y estudiando su correlación mientras se mantiene constante el resto de posibles variables implicadas. Ello se debe a que esos fenómenos biológicos suelen estar formados por un número elevado de factores sutilmente interconectados, de manera que constituyen conjuntos complejos organizados (*complexly organized whole*). Debido a esto, las variaciones que se producen en alguno de esos factores generan simultáneamente cambios en otros y la medición cuantitativa de sus valores resulta difícil o imposible.

A juicio de Weaver, los problemas de complejidad organizada no son abordables con los métodos científico-matemáticos utilizados para resolver los problemas de la simplicidad ni con las técnicas estadísticas adecuadas para los casos de complejidad desorganizada. Si durante el siglo XIX la ciencia conquistó los problemas de la simplicidad y en el siglo XX los de la complejidad desorganizada, deberá ahora afrontar el reto de realizar un tercer avance que le permita abordar adecuadamente los problemas de complejidad organizada⁸.

⁷ Según Alhadeff-Jones (2008), Weaver «identifica la emergencia sucesiva de tres formas de concebir la complejidad de los problemas abordados en el campo científico». No es así. Lo que Weaver identifica son tres modalidades de problemas, de los cuales dos tienen que ver con dos formas de complejidad (desorganizada y organizada) y el otro con la simplicidad.

⁸ La posibilidad de extender el tratamiento y el conocimiento científico al ámbito de los problemas y las situaciones de complejidad organizada no

Weaver señala dos nuevos avances, originados en parte por intereses bélicos, que pueden contribuir al desarrollo de nuevos métodos de análisis aplicables al estudio de los problemas de complejidad organizada y a la resolución de los mismos: los dispositivos informáticos y la constitución de equipos de análisis y operaciones compuestos por especialistas procedentes de distintas disciplinas (matemáticos, físicos, ingenieros, pero también biólogos, psicólogos y sociólogos).

1.2.2. Sistemas complejos, organización, información y *feedback*

Los cibernéticos pusieron de relieve el importante papel que los mecanismos de *feedback* y la información tienen en los procesos de organización y funcionamiento de determinados sistemas.

Norbert Wiener desarrolló la cibernética en relación con el control y la corrección del tiro de los cañones antiaéreos. Para mejorar la puntería de las baterías antiaéreas, ideó la introducción de un circuito de información relacionado con estas. A partir de información sobre la posición futura del avión que se quiere abatir (predicha en función de sus posiciones anteriores) y sobre el margen de error de los tiros fallidos, el mecanismo de puntería del cañón va acercando los disparos a su objetivo, reduciendo así paulatinamente el margen de error, hasta conseguir abatirlo. El circuito de información funciona mediante *feedback*, retroacción o retroalimentación. La información sobre las acciones en curso realimenta al sistema permitiéndole introducir correcciones, perfeccionar su comportamiento y alcanzar el fin previsto (vemos,

significa para Weaver que de ese modo la ciencia pueda ampliar sus dominios a la totalidad de las realidades (físicas, biológicas y humanas) y convertirse en la única herramienta para resolver todos los problemas. Para Weaver, la ciencia es un modo de resolver problemas, pero no el modo de resolver todos los problemas. La ciencia es, ciertamente, una herramienta de conocimiento poderosa con un historial de éxitos impresionante, pero no puede conocer todas las realidades. Los problemas que la ciencia puede abarcar son aquellos en los que predominan factores que están sujetos a las leyes básicas de la lógica y que son mensurables en alto grado, pero hay partes esenciales de la vida humana que son «alógicas» y que tienen un carácter no cuantitativo. La ciencia se ocupa de problemas cuantitativos que tienen un carácter puramente lógico («science deals with quantitative problems of a purely logical character»).

pues, cómo los dispositivos de tiro se rigen por un comportamiento teleológico, orientado hacia un fin, hacia una meta: impactar en el avión, en el blanco). Se dice, así, que el efecto (tiro, disparo) retroactúa sobre la causa (mecanismo disparador), de manera que se establecen bucles o circuitos de causalidad circular (el efecto, es decir, la información sobre este, sobre el disparo realizado, es causa del ajuste que efectúa el mecanismo disparador).

Por otra parte, Wiener vinculó la organización con la información y esta –mediante el concepto de cantidad de información– con la entropía. Según él mismo señala (Wiener 1948: 211) una de las lecciones importantes de su libro *Cibernética* es que toda organización mantiene su coherencia merced a la disposición de medios para la adquisición, el uso, la retención y la transmisión de información⁹. Wiener, de manera simultánea a Fischer y Shannon, desarrolló una teoría estadística sobre la cantidad de información, en la que la entidad unitaria de información se entiende como la información «transmitida a modo de decisión simple entre alternativas igualmente probables» (1948: 33). A su juicio, la cantidad de información podía tomarse como medida del grado de organización de un sistema y, de manera inversa, la entropía como medida del grado de desorganización (Wiener 1948: 34).

Por su parte, Ashby (1956: 16-17), a mediados de la década de los cincuenta del siglo XX y en línea con las tesis de Weaver, señalaba que hasta entonces los científicos se habían dedicado fundamentalmente a estudiar «sistemas que son intrínsecamente simples o susceptibles de ser analizados en componentes simples». Es decir, sistemas con pocos componentes o distinciones (estados, variables, conexiones...) y que pueden estudiarse en detalle variando sus componentes «de uno a uno por vez», estudiándolos de manera aislada.

⁹ Wiener (1948: 42 y 49) llamó la atención sobre la relevancia de la información y la comunicación como mecanismos de organización social. El sistema social mantiene su coherencia y cohesión mediante un sistema de comunicaciones, y los procesos circulares de retroalimentación (*feedback*) desempeñan un papel importante en su organización. Por ello, no es posible comprender adecuadamente las sociedades sin un estudio de sus medios de comunicación.

Ese método de estudiar un sistema (una nómina de variables) variando de uno en uno sus componentes resulta con frecuencia imposible de aplicar a sistemas complejos. Como ejemplos de sistemas complejos cita, entre otros, el cerebro con su enorme número de neuronas y de conexiones entre estas, y el comportamiento de un gas, cuyo número de partículas (nómina de variables) es tan grande que impide que estas puedan ser observadas y controladas en detalle.

Ashby caracteriza a los sistemas complejos por dos rasgos: 1) son sistemas de gran tamaño, esto es, con un elevado número de variables (componentes o distinciones); y 2) son sistemas muy «dinámicos e interconectados».

Por causa del primer rasgo, las partes (distinciones: variables, conexiones...) de un sistema complejo no pueden ser objeto de especificación individual (el observador carece de medios para observarlas y calcular su comportamiento de forma completa), por lo que el sistema habrá de ser abordado «estadísticamente».

Debido al segundo, la alteración de una variable del sistema repercute como causa en la variación que experimentan otras variables; y es precisamente por ello que resulta con frecuencia imposible estudiar un sistema complejo mediante el método de variar de uno en uno sus componentes.

Al decir de Ashby (1956: 16-17), la cibernética –que «se esfuerza por estructurar una disciplina rigurosa de lo complejo»– tiene entre sus virtudes la de ofrecer métodos para el enfoque científico de los sistemas complejos. Ashby pensaba que la cibernética podía proporcionar nuevos métodos efectivos para el estudio y el control de los sistemas complejos.

1.2.3. Organización, sistema y limitaciones del proceder analítico

En clara sintonía con las tesis de Weaver, Bertalanffy (1968: 34) escribe que «un problema fundamental planteado a la ciencia moderna es el de una teoría general de la organización». Considera que el concepto de sistema y la elaboración de una teoría general

de los sistemas son fundamentales para el desarrollo de esa teoría general de la organización.

Bertalanffy, ante el hecho de que varias disciplinas denominan y conciben sus objetos como «sistemas», planteó el proyecto de elaborar una teoría general de los sistemas que se ocupase de las características «formales» de estos, es decir, de las características que presenta un sistema o una determinada modalidad de sistemas por ser tales, por ser sistema o sistemas de un determinado tipo. Mediante el estudio de los «isomorfismos» (similitudes estructurales entre sistemas de distinto tipo: físicos, biológicos, sociales), la teoría general de los sistemas aspiraba a derivar y formular un conjunto de principios comunes válidos para los sistemas en general (Bertalanffy 1968: 32). Así planteada, la teoría general de los sistemas tiene una clara naturaleza interdisciplinaria y Bertalanffy pensó que, una vez que se desarrollase adecuadamente, podría articular la «unidad de la ciencia».

Bertalanffy vincula el estudio de los sistemas al problema de la emergencia («el todo es más que la suma de sus partes»). Merced a las relaciones que las partes mantienen en un sistema, pueden aparecer en el sistema, considerado este como totalidad, propiedades «nuevas» o «emergentes», es decir, características propias del todo como tal que no tienen las partes consideradas en sí de manera aislada.

Además, vincula el estudio de los sistemas a las limitaciones del proceder analítico, limitaciones debidas en parte al fenómeno de la emergencia: «El problema de los sistemas es esencialmente el problema de las limitaciones de los procedimientos analíticos en la ciencia» (Bertalanffy 1968: 17).

El proceder analítico consiste en descomponer los fenómenos (todos) en sus unidades elementales (partes, «unidades atómicas»). Está basado, pues, en la reducción y la elementalidad; y, además, asume una «concepción mecanicista», entendida esta como la «tendencia a la división de los fenómenos en elementos y cadenas causales independientes, descuidando las interrelaciones» (Bertalanffy 1968: 55). Opera del siguiente modo: primero, se reduce y descompone el todo en sus partes constituyentes; luego,

cada una de esas unidades son investigadas independientemente unas de otras, de manera aislada; finalmente, se suman las características reveladas de cada parte para explicar el fenómeno objeto de estudio (el todo).

Bertalanffy reconoce la utilidad del proceder analítico y los espléndidos resultados de este, pero señala también que su aplicación depende de que se den las dos siguientes condiciones. La primera, que no existan interacciones entre las partes o que dichas interacciones sean «débiles», es decir, que las características de las partes no dependan de sus relaciones con otras partes; solo así pueden ignorarse las interacciones que los componentes del sistema mantienen entre sí. La segunda, que las relaciones que describen el comportamiento de las partes sean lineales (ecuaciones lineales); solo así se satisface la condición de *aditividad*, es decir, solo así los procesos parciales pueden superponerse para obtener el proceso global.

El proceder analítico presenta limitaciones cuando no se dan esas condiciones; resulta, pues, inadecuado para estudiar sistemas que tienen las dos siguientes propiedades. La primera, la existencia de interacciones «fuertes» o «no triviales» entre sus partes o componentes, en virtud de las cuales estos adquieren propiedades «constitutivas», esto es, propiedades que dependen de las relaciones específicas que se dan dentro del sistema como un todo complejo y que, en consecuencia, no pueden explicarse solo a partir de las propiedades que los componentes muestran cuando están aislados. Si esto es así, entonces, para entender las propiedades constitutivas de las partes, no basta con conocer solo las partes, sino que hay que conocer también las relaciones entre las partes. La segunda característica que presentan los sistemas inabordables mediante el proceder analítico consiste en que las relaciones que describen el comportamiento de las partes de esos sistemas son no lineales.

Bertalanffy aspiraba a que su teoría general de los sistemas fuese una «ciencia lógico-matemática», una ciencia capaz de elaborar modelos matemáticos de los fenómenos que estudiase. Para ello, recurrió a las ecuaciones diferenciales como herramienta matemática para el modelado y estudio de los sistemas. Consciente de que dichas ecuaciones son difíciles de resolver si son lineales y de que si son no lineales solo pueden resolverse en casos

especiales, consideró necesario el empleo de computadoras para llevar a cabo los cálculos matemáticos necesarios y para simular casos que no pueden ser objeto de experimento.

1.2.4. Comportamiento complejo: auto-organización entre el orden y el desorden

«La termodinámica –escribe Prigogine 1979: 201– es, sin ninguna duda, la ciencia de los sistemas complejos». No obstante, Prigogine (1987) prefiere hablar de «comportamiento complejo» mejor que de «sistemas complejos», pues un mismo sistema puede mostrar tanto comportamientos simples como complejos.

Mientras que en la termodinámica clásica (termodinámica del equilibrio) la disipación de energía y de materia (por ejemplo, la transferencia de calor) es en condiciones de equilibrio una fuente de desorden, en la termodinámica prigoginiana (termodinámica no lineal de los procesos irreversibles alejados del equilibrio) la disipación puede ser en condiciones de no equilibrio una fuente de orden, de generación de estructuras.

En estados alejados del equilibrio, un proceso irreversible (disipación de energía) puede representar un papel constructivo y constituir una fuente de orden. En esas circunstancias, las fluctuaciones pueden amplificarse, bifurcarse y conducir al sistema a un nuevo estado de estabilidad. El sistema se organiza, establece un orden determinado, una determinada configuración o estructuración, en virtud de las interacciones que establecen sus componentes.

Es importante tener en cuenta que la estructura que emerge como patrón espacio-temporal estable, es una configuración dinámica, un proceso dinámico. El surgimiento y mantenimiento de la estructura precisa de un aporte continuo de energía, de un flujo de energía (cuya intensidad, además, debe mantenerse entre determinados valores o condiciones límite) y de la *disipación* de parte de esa energía por parte de la estructura que se crea. Es por ello que Prigogine denomina *estructuras disipativas* a esas configuraciones macroscópicas que emergen en sistemas alejados del equilibrio y que resultan de la amplificación y estabilización de una fluctuación (para ejemplificar y explicar el proceso de configuración de estructuras disipativas, Prigogine se ha servido

de manera reiterada de las células de convección de Bénard y de las reacciones químicas de Belusov-Zhabotinsky).

El proceso de configuración de estructuras disipativas es descrito por Prigogine como un proceso de auto-organización del sistema. El modo como Prigogine y sus seguidores entienden la auto-organización presenta diferencias con el modo como esta es entendida por otros autores y corrientes que también se han ocupado de la misma (segunda cibernética, auto-organización viviente, criticalidad auto-organizada). No obstante, las distintas tradiciones sobre la auto-organización comparten, en mayor o menor grado según los casos, un conjunto de ideas comunes o afines.

La auto-organización implica la interconexión o interrelación de varios elementos. Como consecuencia y resultado del establecimiento de esas interrelaciones, se produce la emergencia de una estructura global y sistémica, la cual es posible merced a la estabilización de las relaciones que los elementos han establecido. El proceso de auto-organización implica, por tanto, una relación entre niveles, un nivel micro de interacciones entre elementos y un nivel macro de emergencia de una estructura. Esa relación entre los dos niveles (micro y macro) es no lineal. Las correlaciones dinámicas que se establecen entre los componentes del sistema se crean de manera espontánea, es decir, no están determinadas por controles o presiones externas al sistema ni por las leyes o las reglas que internamente pueden llegar a regir el sistema. La auto-organización se produce en sistemas alejados del equilibrio; en esta situación, las fluctuaciones pueden amplificarse y dar lugar a una estructura (configuración dinámica).

Según Prigogine (1987: 118), algunos de los componentes esenciales del comportamiento complejo son: la aparición de bifurcaciones en situaciones alejadas del equilibrio con incidencia de no linealidades, la aparición de rupturas de simetrías más allá del punto de bifurcación, y la formación y el mantenimiento de correlaciones de alcance macroscópico que dan lugar a configuraciones estructurales (estructuras disipativas).

Además, Prigogine (1987) considera que en el comportamiento complejo se da una relación entre dinámica determinista y probabilidades. Tanto el azar como la necesidad, las fluctuaciones como las leyes deterministas, son aspectos esenciales y como tales imprescindibles en la descripción de los sistemas y procesos que manifiestan comportamiento complejo (sistemas no lineales alejados del equilibrio y procesos de auto-organización en condiciones muy alejadas del equilibrio). Cerca de un punto de bifurcación, las fluctuaciones (elementos al azar) juegan un papel clave; entre bifurcaciones, dominan los aspectos deterministas (1979: 23 y 165-166)¹⁰.

El comportamiento complejo es un comportamiento intermedio entre el desorden completo y el orden absoluto (la completa uniformidad), de manera que exige la participación de «dos manifestaciones antagónicas»: «la aleatoriedad de corto alcance, como elemento innovador, para que se pueda explorar el espacio de estados; y el orden de gran alcance, para que el sistema pueda mantener un régimen colectivo en áreas macroscópicas del espacio y a lo largo de intervalos temporales macroscópicos» (Prigogine 1987: 291).

1.2.5. No linealidad, caos y fractalidad

Se ha debatido y existe discrepancia sobre si la teoría del caos forma o no parte de la teoría de la complejidad. Mientras unos autores vinculan estrechamente complejidad y caos, otros desvinculan de manera radical la teoría del caos y las teorías de la complejidad. «La complejidad y el caos», señala Chris Langton (en Lewin 1992: 23), «dan vueltas persiguiéndose intentando averiguar si son lo mismo o cosas diferentes». En opinión de Ian Stewart (1997: 487), la teoría de la complejidad, que tiene como «núcleo filosófico» el concepto de emergencia, es una teoría «recíproca» de la teoría del caos. La complejidad y el caos se hallan relacionados en tanto que los dos son «parte inherente de la teoría de la dinámica no lineal».

¹⁰ Según Reynoso (2006: 110), Prigogine «equipara» la complejidad con la aleatoriedad, de manera que la complejidad prigoginiana es solo «complejidad algorítmica». Esta interpretación de las tesis de Prigogine es claramente falaz. Como hemos visto, para Prigogine el comportamiento complejo resulta de la relación entre orden (leyes deterministas) y desorden (aleatoriedad, azar); de ninguna manera se reduce solo a aleatoriedad.

Las dinámicas o los procesos no lineales incumplen tres propiedades (proporcionalidad, superposición y unicidad de las soluciones de las ecuaciones) que, como veremos seguidamente, caracterizan en lo sustancial a las dinámicas y procesos lineales.

En las dinámicas lineales, los valores de los cambios que experimenta una determinada variable guardan proporcionalidad con los valores que los han causado. Si esos resultados los representamos gráficamente en un eje de coordenadas, se alinean todos ellos en una línea recta; de ahí el término «lineal». Así, si se suma (o resta) una cantidad al principio del proceso, el final del mismo se modifica en esa misma cantidad. Pequeñas modificaciones en los valores iniciales ocasionan pequeñas (proporcionales) modificaciones en los valores finales; y grandes modificaciones en los valores iniciales dan lugar a grandes modificaciones en los valores finales. Por el contrario, en las dinámicas no lineales se producen cambios que no son proporcionales¹¹, modificaciones en los valores de una determinada variable a resultados de las cuales el sistema experimenta cambios desproporcionados a la acción que se ejerce (a esos cambios de valor se les conoce como puntos de mayor apalancamiento o puntos críticos). De ese modo, pequeñas modificaciones pueden tener grandes consecuencias.

En segundo lugar, las dinámicas lineales cumplen el principio de superposición o *aditividad* (obtención aditiva del resultado final), en virtud del cual podemos obtener un valor para el todo sumando (o restando) los valores de sus partes. De ese modo, el todo es igual a la suma de las partes. Las dinámicas no lineales violan este principio. La suma de los valores de las partes no nos permite obtener el valor del todo.

¹¹ Pondré un ejemplo sencillo y simplificado, que creo puede ser suficientemente ilustrativo. Una función del tipo $f(x)=2x/1.75$, para un valor de 0.1 genera como resultado 0.11; para un valor de 0.2, un resultado de 0.22; para un valor de 0.3, genera 0.34 como resultado; para 0.4 resulta 0.45; para 0.5, 0.57; para 0.6, 0.68; etcétera. Vemos cómo los cambios en los valores iniciales tienen como resultado cambios proporcionales en los valores resultantes. En cambio, una función como $f(x)=3.99 \cdot x \cdot (1-x)$ genera, con los mismos valores aplicados a la anterior (0.1, 0.2, 0.3, etc.), los siguientes resultados: 0.35, 0.63, 0.87, 0.95, 0.99, 0.87, etc. Como puede verse, esta secuencia no mantiene proporcionalidad; así, un cambio del valor 0.1 al 0.2 (de + 0.28) ocasiona un efecto mayor que un cambio del valor 0.4 al 0.5 (que de hecho es negativo: - 0.12).

Por último, las dinámicas lineales presentan una tercera característica que también incumplen los procesos no lineales. La característica en cuestión tiene que ver con las ecuaciones que describen las dinámicas lineales y consiste en que dichas ecuaciones presentan una única solución. En cambio, en las dinámicas no lineales –en especial cuando la tasa de no linealidad es alta– las ecuaciones que las describen presentan más de una solución posible, muestran bifurcaciones en sus soluciones, entre las que el sistema adoptará una de las posibles.

Hay sistemas dinámicos no lineales que son caóticos. Pero, a la hora de hablar de caos, es necesario distinguir entre sistemas matemáticos y sistemas físicos, así como, en relación con esta distinción, entre la realidad y nuestros modelos sobre la misma, pues muchas de las confusiones que existen y que se han difundido sobre el caos son debidas, precisamente, al hecho de no trazar ni mantener esas distinciones.

Un sistema matemático caótico es un sistema dinámico que tiene, entre otras, las tres siguientes propiedades fundamentales: dependencia sensitiva, determinismo y no linealidad. Por su parte, un sistema físico al que denominamos caótico es un sistema físico al que actualmente se considera que la mejor manera de representarlo es un modelo matemático caótico (Smith 2007: 247).

La distinción es necesaria porque, si nos ceñimos a las exigencias matemáticas de comprobación, es muy difícil demostrar que un sistema físico sea caótico. No obstante, si no olvidamos ni desdibujamos esa distinción, podemos describir un sistema físico como caótico si ello nos resulta útil¹².

¹² «No podemos tener la esperanza de defender la afirmación de que un sistema físico es caótico a menos que descartemos la carga de la prueba de los matemáticos y, con ella, el significado más común del caos. No obstante, si nuestros mejores modelos sobre un sistema físico parecen caóticos, es decir, si son deterministas, si parecen recurrentes y si indican dependencia sensitiva mostrando el rápido crecimiento de pequeñas incertidumbres, estos hechos nos proporcionan una definición de trabajo sobre qué significa que un sistema físico es caótico. Es posible que algún día encontremos una descripción mejor de ese sistema físico que no contenga estas propiedades, pero eso ocurre con todas las ciencias» (Smith 2007: 240).

Realizada la anterior advertencia y sin echarla nunca en olvido, podemos definir un sistema caótico como un sistema dinámico determinista cuyas trayectorias (comportamientos, estados), por presentar dicho sistema dependencia sensitiva a las condiciones iniciales y no linealidad, pueden cambiar de manera imprevisible a largo plazo en función de pequeñas diferencias en las condiciones iniciales del sistema, con lo que dichas trayectorias resultan difíciles o imposibles de predecir.

El sistema es determinista porque su comportamiento viene dado o generado por una ecuación cuya aplicación no requiere números aleatorios. Un sistema *matemático* es aleatorio o estocástico y, por tanto, no es determinista, cuando para aplicar la regla que lo genera se requieren números aleatorios. Si un sistema *matemático* no precisa números aleatorios en la aplicación de la regla que lo genera, entonces es determinista (Smith 2007: 74).

La dependencia sensitiva del sistema a sus condiciones iniciales significa que la trayectoria futura del sistema cambia de manera muy relevante en función de las pequeñas diferencias que puedan existir en los valores iniciales del sistema. En consecuencia, pequeñas variaciones en el estado inicial del sistema provocarán cambios muy grandes en los estados futuros del mismo. Dos trayectorias de un sistema que comienzan en condiciones iniciales muy, muy próximas, no permanecen cercanas, sino que se separan exponencialmente al cabo del tiempo. De ese modo, la dinámica del sistema, predecible en tiempos cortos, se torna impredecible a largos intervalos de tiempo. Esta imprevisibilidad que el sistema presenta con respecto a sus trayectorias futuras y la incertidumbre que genera sobre las mismas hacen que el sistema pueda parecer aleatorio. Pero el caos matemático y el azar son fenómenos radicalmente diferentes que no deben confundirse.

Cuando los sistemas dinámicos se representan en un espacio de fases¹³, sus trayectorias (sus estados) pueden converger hacia un punto del espacio de fases que se conoce como atractor, el cual genera una cuenca de atracción. Existen atractores de distinto tipo: de punto fijo (detención del sistema en un punto), periódico

¹³ Denominado también espacio de estados. Es el espacio en el que queda especificado completamente el conjunto de estados de un sistema dinámico.

(el sistema entra en un ciclo repetitivo y cerrado del que no sale), de torus o semiperiódico (el sistema se hace cíclico, pero tras cada ciclo no retorna con exactitud al mismo punto de partida) y extraños.

En el caso de estos últimos, la trayectoria del sistema nunca vuelve al mismo punto de partida (en esto hay coincidencia con los atractores semi o cuasiperiódicos) y, además, las sendas cercanas en la cuenca de atracción divergen de manera exponencial separándose cada vez más. Pero como el crecimiento exponencial del sistema no puede ser infinito (todo sistema tiene límites para su crecimiento), a partir de un determinado punto el sistema, en lugar de seguir creciendo, se pliega sobre sí mismo. De este modo, el sistema presenta en su desarrollo un recorrido de estiramiento y plegamiento. Con el tiempo, el sistema –con sus trayectorias de ida y vuelta, y sin que estas se corten jamás– llena completamente un subespacio del espacio de fases. Se produce, así, una especie de «empaquetamiento» de las trayectorias del sistema.

Ese espacio puede tener una dimensión fraccional, no entera¹⁴, en cuyo caso el atractor extraño tendrá una estructura fractal. Los atractores caóticos pueden ser o no atractores extraños, es decir, atractores con estructura fractal. Por tanto, hay atractores caóticos que son extraños y otros que no lo son (y un atractor extraño puede ser caótico o no caótico) (Smith 2007: 246).

¹⁴ Las formas geométricas euclidianas, que carecen de irregularidad y fragmentación, tienen como dimensiones números enteros: 0 para el punto, 1 para la línea, 2 para la superficie y 3 para el volumen. En el caso de objetos matemáticos o naturales con irregularidad y fragmentación, sus dimensiones no son números enteros, sino fracciones. La dimensión fractal es la medida del grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico o de un objeto natural. Junto a dicha dimensión, la autosimilitud o autosimilaridad –estricta o aproximada– es otra de las características fundamentales de los fractales. Consiste en el hecho de que las partes o los detalles del objeto fractal son estructural y visualmente similares a la configuración global de este. Como ocurre en los hologramas, la configuración del todo aparece de algún modo en las partes.

1.2.6. Exceso de relaciones, contingencia y reducción de la complejidad

Como señalé, Niklas Luhmann es, junto a Edgar Morin, el científico social que más relevancia ha otorgado a la noción de complejidad en sus reflexiones y análisis. Para elaborar sus teorías, Luhmann ha recurrido a la teoría de sistemas, la teoría de la comunicación, la cibernética de segundo orden de Heinz von Foerster, la teoría de la organización, la lógica de operaciones de George Spencer Brown, la lógica polivalente de Gotthard Gunther y la teoría de la autopoiesis de Humberto Maturana y Francisco Varela.

Luhmann (1976, 1978, 1980 y 1996: 133-151) vincula la noción de complejidad con las ideas de relación, posibilidad, contingencia y probabilidad. Un sistema tendrá más complejidad cuanto más capacidad presente para establecer relaciones y más posibilidades tenga de ser de otro modo (las relaciones conllevan posibilidades para ser de otra manera).

La existencia de una multiplicidad de relaciones posibles supone la existencia de relaciones contingentes, no necesarias (que son, pero que podrían dejar de ser, no haber sido o haber sido de otro modo). De ese modo, la complejidad, como multiplicidad de relaciones posibles, aparece claramente vinculada con la contingencia y la modalidad.

En su teoría sistémica Luhmann prioriza las relaciones como elementos constitutivos de los sistemas. Un sistema es sobre todo una estructura de relaciones (de dos tipos: relaciones entre sus componentes y relaciones del sistema con su medio o entorno), y es tal en tanto que mantiene la estructura de relaciones que configuran su identidad. La teoría de sistemas es para Luhmann fundamentalmente un método de análisis de relaciones.

Ante el exceso de posibilidades y relaciones que la complejidad de la realidad supone, los sistemas vivientes están obligados a seleccionar algunas de esas posibilidades y relaciones diciendo «no» a otras; están obligados, pues, a reducir la complejidad; esta solo puede ser abordada y tratada si se reduce de algún modo. Todo sistema conlleva una reducción de la complejidad, la estabilización

estructural de un conjunto de relaciones posibles seleccionadas previo descarte de otras que también eran posibles.

1.2.7. Organización colectiva y propiedades emergentes

Para finalizar nuestro recorrido conceptual, quiero llamar la atención sobre algunas propuestas actuales de la Física teórica que se sirven de la idea de complejidad y de algunos de los conceptos vinculados a la misma, como los de organización y emergencia. Es el caso de Robert B. Laughlin (2005), quien en 1989 fue galardonado con el premio Nobel, compartido con otros físicos, por el descubrimiento de una nueva forma de fluido cuántico con excitaciones fraccionalmente cargadas (efecto cuántico Hall).

Laughlin reconoce a Ylya Prigogine y a Philip Anderson como autores que lo inspiran. Según Anderson (1972), en «la frontera de la complejidad» «el lema no es el reduccionismo, sino la emergencia. Los fenómenos complejos emergentes bajo ningún concepto violan las leyes microscópicas, sin embargo, no aparecen como consecuencias lógicas de estas leyes». Ello es así porque «a cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas».

Para Laughlin, la esencia de determinadas realidades físicas reside en la organización colectiva que las constituye, merced a la cual se generan propiedades emergentes, propiedades propias del todo que no tienen las partes, sus componentes (así, por ejemplo, algunos metales, cuando están a temperaturas extremadamente bajas, son capaces de generar un campo magnético, algo que no pueden hacer por separado los átomos que los componen).

El mundo natural está formado por elementos primitivos y, al mismo tiempo, está gobernado por «estructuras de organización complejas y estables» que surgen de los elementos, por principios de organización que – al resultar de la cooperación entre elementos– son fenómenos colectivos.

A juicio de Laughlin, las leyes de la naturaleza surgen «de la autoorganización colectiva». No es la organización la que se deriva de las leyes, sino estas de aquella. Las partículas cuánticas, que

no se rigen por las leyes de Newton, cooperan (entrelazamiento cuántico) y se transforman (se organizan) dando así lugar a (emergiendo así) realidades que, estas sí, se rigen por las leyes de Newton. Las leyes de Newton no son leyes «fundamentales», sino leyes «emergentes», pues son consecuencia de «un fenómeno colectivo o de organización» (la agregación de materia cuántica que forma fluidos y sólidos macroscópicos).

En determinados casos, «podemos *probar* que la organización puede adquirir un significado y una vida propios y trascender las partes que la conforman. Entonces, lo que la física tiene que decirnos es que el postulado de que el todo es más que la suma de las partes es en realidad un fenómeno físico. La naturaleza está gobernada por una base de reglas microscópicas, pero también por principios de organización generales fuertes. Algunos de esos principios son conocidos, pero la mayoría está aún por ser descubierta» (Laughlin 2005: 175).

«En verdad», escribe Laughlin (2005: 106-107), «asistimos a una transformación fundamental en nuestra forma de ver el mundo, según la cual el objetivo de entender los fenómenos naturales descomponiéndolos en sus partes más pequeñas se ve reemplazado por el propósito de comprender cómo se organiza la naturaleza». Esta necesidad de abordar el estudio de los principios de organización y los procesos de emergencia colectivos no significa para él un rechazo del reduccionismo (clasificación de los fenómenos dividiéndolos en componentes cada vez más pequeños), sino una revelación y un reconocimiento de sus limitaciones.

2. Edgar Morin: una teoría compleja de la organización

La elaboración de una teoría compleja de la organización física, biológica y antropológica es uno de los ejes principales de la obra de Morin. En su opinión, la organización solo puede concebirse adecuadamente de manera compleja.

Para construir su teoría compleja de la organización, recurre a muchas de las ideas y nociones creadas por las corrientes teóricas y los autores de las dos primeras generaciones de teorías sobre la

complejidad (teoría de sistemas, cibernética primera y segunda, termodinámica prigoginiana, autopoiesis...).

De ese modo, recoge e integra en su producción teórica varios de los significados con que los autores de esas dos generaciones anteriores han utilizado el concepto de complejidad (sistema, organización, emergencia, reconocimiento de las limitaciones del proceder analítico y de las explicaciones mecanicistas, no linealidad, multiplicidad de interacciones, mezcla íntima entre orden y desorden, auto-organización). En sus reflexiones sobre la complejidad Morin intenta articular, distinguiendo varios «órdenes de complejidad», algunos de los principales significados que se le han atribuido al concepto de complejidad.

Pero Morin añade, además, un nuevo significado al concepto de complejidad, este de carácter lógico: la dialógica. Morin califica como complejo el hecho de que un fenómeno presente aspectos a la vez complementarios, concurrentes y antagonicos.

Para abordar la complejidad en sus distintas manifestaciones, Morin propone un conjunto de principios intelectivos que vendrían a conformar los ejes de un «paradigma de la complejidad» o –de manera más modesta y posiblemente más acertada– las estrategias cognitivas de un «pensamiento complejo» (para profundizar en esos principios, véase Solana 2001: 190-223). Esos principios o estrategias de conocimiento nos ayudan a enfrentar los retos que la complejidad plantea al conocimiento y a realizar análisis complejos (no simplificadores ni reductores) de los fenómenos humanos¹⁵.

¹⁵ En sus obras, Morin ha aplicado los principios de su pensamiento complejo y su teoría de la organización al análisis y la comprensión de una amplia diversidad de fenómenos de muy distinta dimensión y naturaleza. Así, su pensamiento complejo está puesto en acción, opera, en sus análisis sobre la naturaleza, la vida, el conocimiento, la ciencia, la relación entre lo biológico y lo cultural, la razón, los principios éticos, el amor, el desarrollo social, la educación y la enseñanza, la extinta Unión Soviética y su hundimiento, la democracia, la identidad de Europa, el proceso de mundialización, el conflicto árabe-israelí, el fútbol..., por citar solo algunos temas generales, cada uno de los cuales podría desglosarse en asuntos más concretos, en relación a los cuales Morin ha aplicado igualmente los principios de intelección del pensamiento complejo.

2.1. Complejidades y dialógica

¿Qué entiende Morin por complejidad?, ¿qué es para él lo complejo? En primer lugar, entiende lo complejo como lo que no es simple ni simplificable: «La complejidad es una noción cuya primera definición no puede ser sino negativa: la complejidad es lo que no es simple» (Morin 1982: 318). ¿Qué es lo simple para Morin?:

«El objeto simple es el que se puede concebir como una unidad elemental indescomponible. La noción simple es la que permite concebir un objeto simple de forma clara y neta, como una entidad aislable de su entorno. La explicación simple es la que puede reducir un fenómeno compuesto a sus unidades elementales, y concebir el conjunto como una suma del carácter de las unidades. La causalidad simple es la que puede aislar la causa y el efecto, y prever el efecto de la causa según un determinismo estricto. Lo simple excluye a lo complicado, lo incierto, lo ambiguo, lo contradictorio» (Morin 1982: 318).

Catalogados esos elementos (objeto, noción, explicación, causalidad) como «simples», los elementos que se les pueden contraponer (la necesidad de asociar el objeto a su entorno o a su observador, el hecho de que el objeto sea un sistema organizado y presente propiedades emergentes, las causalidades no lineales, la indeterminación y la incertidumbre), que a diferencia de los anteriores plantean dificultades y retos de carácter epistemológico, pueden ser calificados –así lo hace Morin– como «complejos».

Desde el punto de vista cuantitativo, como «fenómeno cuantitativo», la complejidad aparece vinculada a la existencia de cantidades extremas de unidades e interacciones, las cuales desafían nuestras posibilidades de cálculo. Pero Morin (véase, por ejemplo, 1980: 413-414) no equipara ni reduce la complejidad a la complicación. Lo complicado (es decir, lo embrollado, lo enmarañado, el entrelazamiento de miríadas de inter-retroacciones que no pueden ser descritas dado el número de operaciones necesarias para ello) es solo un aspecto de la complejidad.

La complejidad es un tejido de «constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados», una «*diversidad organizada*» que,

como tal, «presenta la paradoja de lo uno y de lo múltiple» (1980: 418 y 1990a: 32). Así, por ejemplo, los sistemas vivientes autoorganizadores (células, cerebro, etc.) combinan un gran número de unidades (por ejemplo, del orden de cien mil millones de neuronas en el cerebro humano) para configurar con ellas una totalidad organizada.

Morin (1990a: 60) asocia también la complejidad con los procesos y las situaciones en que se da una mezcla íntima e indisoluble de orden y desorden. Mientras que en los sistemas semi-aleatorios estadísticos el orden y el desorden son separables (pues mientras el segundo reina en el nivel de las unidades elementales, el primero rige en el de las grandes poblaciones), en los sistemas organizados el orden es inseparable de los desórdenes, de los fenómenos aleatorios y los procesos de desorganización que acontecen en esos sistemas.

Vemos, pues, cómo Morin asume, conjunta e integra varios de los significados de la complejidad que históricamente se habían asociado a este término¹⁶. A esos significados añade uno nuevo, este de carácter lógico: el establecimiento de relaciones dialógicas.

La existencia de una relación dialógica entre dos nociones significa que dicha relación es, a la vez, «complementaria, concurrente y antagónica» y, consiguientemente, ambivalente e incierta. Este «a la vez» no significa un «siempre y bajo todo o cualquier punto de vista», sino que conlleva e implica un cambio de punto de vista. Es decir, es bajo uno u otro ángulo determinado como los términos o fenómenos dialógicamente relacionados aparecen ora como complementarios, ora como concurrentes, ora como antagonistas. Bajo determinado

¹⁶ Contrariamente a lo que Reynoso (2006: 179 y 309) asevera, Morin no restringe la complejidad a numerosidad, azar e indeterminación. Para Morin, la numerosidad, la existencia de cantidades extremas de unidades e interacciones, es solo un aspecto de la complejidad (la complejidad como «fenómeno cuantitativo»). Morin también vincula la complejidad, y de manera fundamental, a la organización y la auto-organización, a la producción de cualidades sistémicas y emergentes, al cuestionamiento del reduccionismo, a las relaciones dialógicas. Los problemas de complejidad que Morin aborda no son solo, por expresarlo con términos de Warren Weaver (1948), *problems of disorganized complexity*, sino también *problems of organized complexity*. Los dos primeros volúmenes de *El método* tienen, precisamente, a la problemática de la organización, en distintas dimensiones, como eje central. La errada opinión de Reynoso evidencia un conocimiento superficial y muy deficiente de la obra de Morin.

punto de vista aparece la complementariedad existente entre dos fenómenos o dos principios y, *bajo otro punto de vista*, se nos muestra su oposición.

La complementariedad significa la necesidad de los dos conceptos para explicar y concebir determinadas realidades. En virtud de ella, las alternativas dualistas clásicas pierden su antagonismo absoluto. El pensamiento complejo sustituye el «o bien/o bien» propio del pensamiento simplificador por un «ni/ni» y un «y/y», por un «a la vez esto y aquello» (Morin 1980a: 318).

La concurrencia, posee un doble sentido. Significa «correr juntos sin confundirse», es decir, que los dos fenómenos o procesos «corren al mismo tiempo», operan de modo paralelo; y, también, *poder* «entrar en competición» (Morin 1980a: 154). El antagonismo conlleva la oposición y la repulsión entre los dos fenómenos en cuestión; oposición que puede agudizarse hasta la destrucción mutua.

Finalmente, es necesario decir que Morin apunta la necesidad de sostener una concepción gradualista de la complejidad en la que se distingan y establezcan varios órdenes, niveles o grados de complejidad. Así, habla de baja, mediana y alta complejidad, y de «muy alta complejidad» o «hipercomplejidad» (sobre las diferencias entre baja complejidad e hipercomplejidad, véase Solana 2001: 196-199).

2.2. Teoría de la organización

En opinión de Morin (1989: 265), las ciencias actuales han mostrado que la organización es «el fenómeno clave de nuestro universo». La organización es la capacidad que, *de facto*, tiene nuestro Universo y por ende la naturaleza para (auto) producir entidades consistentes, más o menos estables, dotadas de cualidades y propiedades emergentes. De ese modo, la naturaleza recobra sus virtudes organizadoras y productoras, puede volver a ser concebida como *physis*.

El concepto moriniano de organización está ligado, de modo inseparable, a los conceptos de orden, desorden e interacción, con los que configura lo que Morin denomina como «el tetragrama» o –en tanto que las nociones que lo constituyen están relacionadas

mediante bucles– el «bucle tetralógico». Los términos que lo forman (y las realidades o fenómenos a los que estos refieren) cobran sentido unos en relación a los otros y han de ser pensados en conjunto como términos a la vez complementarios, concurrentes y antagónicos, es decir, han de ser concebidos de manera dialógica. El tetragrama es «*el principio inmanente de transformaciones y de organización*» de la *physis*; la *physis* «emerge, se despliega, se constituye, se organiza» a través de «juegos tetralógicos» (Morin 1977: 75).

2.2.1. Sistema y organización

Para explicar lo que entiende por organización, Morin recurre a la idea de sistema¹⁷. Las características propias del concepto de sistema que nuestro autor elabora valen para todo lo que está organizado, constituyen «los universales organizacionales» (Morin 1977: 162), las cualidades que toda organización, por ser tal, posee.

Debido a que la idea moriniana de organización surge a partir de la complejización de la idea sistémica o sistemista de sistema, ambas ideas resultan inseparables y se implican o encabalgan conceptualmente. De hecho, las plasmaciones de esas ideas que hallamos en las obras de Morin presentan bastantes coincidencias, las cuales saltan a la vista cuando se cotejan los conceptos morinianos de organización y sistema. Morin define la organización como:

«la disposición de relaciones entre componentes o individuos que produce una unidad compleja o sistema, dotado de cualidades desconocidas en el nivel de los componentes o individuos. La organización une de forma interrelacional elementos o eventos o individuos diversos que a partir de ahí se convierten en los componentes de un todo. Asegura solidaridad y solidez relativa a estas uniones, asegura, pues, al sistema una cierta posibilidad de duración a pesar de las perturbaciones aleatorias. La organización, pues: *transforma, produce, reúne, mantiene*» (Morin 1977: 126).

La organización liga, une y transforma los elementos en un sistema o totalidad y, de ese modo, produce y mantiene el sistema, asegura

¹⁷ El sistema es «el concepto complejo de base» de la organización, el concepto complejo «más simple» necesario para concebir la organización; es «la unidad de complejidad» (Morin 1977: 176-177).

su permanencia, existencia e identidad tanto a nivel estructural como a nivel fenoménico. La organización es «formación transformadora», pues, al unir elementos para *formar* un todo, estos, en tanto que partes de un todo, son *transformados*, pierden unas cualidades y adquieren otras; la organización «forma (un todo) a partir de la transformación (de los elementos)»; es, pues, morfogenésica (da forma).

Si agrupamos y sintetizamos varios de los rasgos con los que Morin caracteriza a un sistema¹⁸, cabe elaborar la siguiente definición: el sistema es una unidad global compleja (una totalidad, un todo), organizada y organizadora, de interrelaciones entre diversos/múltiples constituyentes (elementos, partes, acciones o individuos), que posee cualidades o propiedades nuevas (emergencias) irreductibles a las propiedades de sus componentes considerados de forma aislada o yuxtapuesta.

Las concomitancias entre las dos nociones son evidentes. El concepto de sistema está, por medio del concepto de interrelación, vinculado al de organización: «el sistema es el carácter fenoménico y global que toman las interrelaciones cuya disposición constituye la organización del sistema» (Morin 1977: 126); «toda interrelación dotada de cierta estabilidad o regularidad toma carácter organizacional y produce un sistema» (Morin 1977: 127).

Pero, aunque las ideas de sistema y de organización sean inseparables y se solapen conceptualmente, no obstante, son «relativamente distinguibles» (Morin 1977: 127). Mientras que la idea de sistema «remite a la unidad compleja del todo interrelacionado, a

¹⁸ El sistema es «un todo organizador irreductible a sus constituyentes» (Morin 1977: 121); puede concebirse como «unidad global organizada de interrelaciones entre elementos, acciones o individuos» (Morin 1977: 124). «El sistema posee algo más que sus componentes considerados de forma aislada o yuxtapuesta: su organización, la unidad global misma (el «todo»), las cualidades y propiedades nuevas que emergen de la organización global» (Morin 1977: 129). El sistema es «unidad compleja organizada» (Morin 1977: 176); «un sistema es una unidad global, no elemental, puesto que está constituida por partes diversas interrelacionadas. Es una unidad original, no originaria: dispone de cualidades propias e irreductibles, pero debe ser producido, construido, organizado. Es una unidad individual, no indivisible: se puede descomponer en elementos separados, pero entonces su existencia se descompone. Es una entidad hegemónica, no homogénea: está constituido por elementos diversos, dotados de caracteres propios que tiene en su poder» (Morin 1977: 128).

sus caracteres y sus propiedades fenoménicas»; la de organización «remite a la disposición de las partes dentro, en y por un todo» (Morin 1977: 127). Si la organización es «el rostro interiorizado del sistema (interrelaciones, articulaciones, estructura)»; el sistema es «el rostro exteriorizado de la organización (forma, globalidad, emergencia)» (Morin 1977: 173).

2.2.2. El sistema y la transacción sujeto-objeto

A juicio de Morin, la noción de sistema ha estado sometida a una alternativa simplificadora. Por un lado, los enfoques lastrados de realismo ingenuo asumen los sistemas como objetos reales al margen del sujeto –al que obvian– y creen que reflejan propiedades reales de los objetos empíricos. En el lado contrario, los enfoques más formalistas e idealistas se limitan a entender los sistemas solo como esquemas teóricos o modelos heurísticos que se aplican sobre los fenómenos, pero que carece de realidad; de ese modo, obvian la problemática de la relación de nuestras construcciones teóricas con la realidad que pretenden describir o explicar. Morin quiere salir de esta alternativa excluyente, reduccionista y simplificadora (realismo ingenuo o formalismo idealista). Para él (véase Morin 1977: 164-169 y 1982: 209-210), el concepto de sistema solo puede ser construido «en y por la transacción sujeto/objeto», y no eliminando uno u otro. El sistema no es un modelo ideal, ni un reflejo de lo real, sino que oscila entre estos dos polos constituyéndose como «un concepto de doble entrada»: una entrada «física, fenoménica, empírica»; y una entrada «psíquica», «formal, ideal». Es en el vaivén continuo, pendular y embuclante de uno a otro de estos dos polos como se constituye el concepto de sistema, con lo que este posee un «carácter psicofísico».

Por una parte, los sistemas son físicos, están enraizados en la *physis*. El sistema es físico «por sus condiciones de formación y de existencia (interacciones, coyuntura ecológica, condiciones y operaciones energéticas y termodinámicas)» (Morin 1982: 209). Pero, por otra parte, el aislamiento y la definición de un sistema es siempre un acto subjetivo, depende de la decisión, la elección y las abstracciones operadas por el observador/conceptuador. Que algo sea considerado como ecosistema, sistema o subsistema depende del punto de vista que, en función de sus intereses, sus finalidades y

su sobredeterminación sociocultural, adopte el observador¹⁹. Ningún sistema puede aislarse de manera absoluta y radical del sujeto que lo concibe ni, consiguientemente, de su entendimiento, lógica, cultura y sociedad. El sujeto, pues, coproduce cognitivamente al sistema, pero, claro está, no lo crea ontológicamente.

2.2.3. Orden, desorden e interacciones

El concepto de orden que Morin articula es más rico que la idea de ley del determinismo, pues, además de esta, incluye las ideas de constreñimiento, estabilidad, constancia, regularidad, repetición, estructura e invariancia.

El orden es fundamental para la constitución de organizaciones, pero estas son también productoras de orden (Morin 1982: 101). El orden requiere de la organización (que no es reducible a la idea de orden), pues solo se expande «cuando la organización crea su propio determinismo y lo hace reinar en su entorno» (Morin 1977: 75). Como hemos visto, una organización constituye un conjunto o «todo» no reductible a sus partes, porque dispone de constreñimientos y de cualidades emergentes que retroactúan sobre las partes. Tales constreñimientos, emergencias y retroacciones constitutivas de la organización posibilitan el establecimiento de constancias, estabildades, regularidades..., es decir, de orden.

Por lo que al concepto de desorden respecta, Morin incluye dentro del mismo una multiplicidad de significados y fenómenos: agitaciones, dispersiones, colisiones, inconstancias, irregularidades, inestabilidades, desviaciones perturbadoras y transformadoras de

¹⁹ El sistema «requiere un sujeto que lo aísla en el bullicio polisistémico, lo recorta, lo califica, lo jerarquiza. No solo remite a la realidad física en lo que ésta tiene de irreductible al espíritu humano, sino también a las estructuras de este espíritu humano, a los intereses selectivos del observador/sujeto, y al contexto cultural y social del conocimiento científico» (Morin 1977: 167).

un proceso, choques, encuentros aleatorios o azarosos²⁰, eventos²¹, accidentes²², desorganizaciones, desintegraciones, ruido.

El desorden, mediante las interacciones a las que da lugar, está presente en el origen de las organizaciones y, aunque las amenace sin cesar con la desintegración, no solo se opone al orden, sino que coopera con este para crear la organización: «los encuentros aleatorios, que suponen agitación, y por tanto desorden, fueron generadores de las organizaciones físicas (núcleos, átomos, estrellas) y del (o de los) primer(os) ser(es) viviente(s). El desorden coopera para la generación del orden organizacional» (Morin 1982: 103).

Finalmente, el concepto de interacción es necesario puesto que «la mayor parte de los sistemas no se constituyen de «partes» o de «constituyentes», sino de *acciones* entre unidades complejas, constituidas a su vez por *interacciones*» (Morin 1982: 204). Las interacciones suponen elementos, seres u objetos materiales, que puedan encontrarse, y, a su vez, son también «acciones recíprocas que modifican el comportamiento o la naturaleza de los elementos, cuerpos, objetos y fenómenos que están presentes o se influyen» (Morin 1977: 69). No todas las interacciones son azarasas; muchas obedecen a leyes, determinaciones y constreñimientos, es decir, son fruto de un determinado orden establecido.

El orden y la organización son inconcebibles sin interacciones. La organización es producto de las interacciones entre elementos. Ningún fenómeno puede ser concebido aparte de las interacciones que lo han constituido y de las interacciones en las que necesariamente participa. El orden no es exterior a las cosas, sino producto de las interacciones entre los elementos y fenómenos regidos, a su vez, por ese orden. Bajo determinadas condiciones, las interacciones se convierten en interrelaciones (asociaciones, uniones, combinaciones, etc.) y son generadoras de formas y de organización.

²⁰ «El azar denota la impotencia de un observador para operar predicciones ante las múltiples formas de desorden» (Morin 1977: 96).

²¹ «el evento denota el carácter no regular, no repetitivo, singular, inesperado de un hecho físico para un observador» (Morin 1977: 96).

²² «El accidente denota la perturbación que provoca el encuentro entre un fenómeno organizado y un evento, o el encuentro evenencial entre dos fenómenos organizados» (Morin 1977: 96).

2.2.4. El debate sobre el determinismo y la aleatoriedad

Para las concepciones deterministas de la realidad, la incertidumbre que causa un fenómeno aleatorio procede de la debilidad de los medios y recursos cognitivos del espíritu humano, de la ignorancia. Insuficiencia, debilidad e ignorancia que impedirían reconocer el determinismo y el orden inmutable ocultos tras los aparentes azares y desórdenes, y cuya subsanación nos permitiría acceder a ese orden oculto tras el «aparente» desorden. Para el determinismo, la realidad última, velada, verdadera, «en-sí», del Universo es el orden absoluto.

A juicio de Morin, esta tesis determinista no pasa de ser un postulado «metafísico», «ontológico» o «trascendente» sobre «la realidad profunda existente detrás de los fenómenos», sobre las «cosas en sí» o «noúmenos» al margen del sujeto. Ahora bien, «el campo real del conocimiento» no es el de una realidad en-sí al margen del sujeto, sino la indisoluble relación sujeto-realidad:

«es preciso que reconozcamos el campo real del conocimiento. El campo real del conocimiento no es el objeto puro, sino el objeto visto, percibido y coproducido por nosotros. El objeto del conocimiento no es el mundo, sino la comunidad nosotros-mundo, porque nuestro mundo forma parte de nuestra visión del mundo, la cual forma parte de nuestro mundo. Dicho de otro modo, el objeto del conocimiento es la fenomenología, y no la realidad ontológica. Esta fenomenología es nuestra realidad de seres en el mundo» (Morin 1982: 108).

Si, como hace Morin, nos ubicamos en este «campo real del conocimiento», en el espacio fenomenológico, entonces el postulado nouménico de un determinismo universal (la afirmación de un orden «absoluto, incondicional, eterno») pierde todo interés, pues nunca ha sido probado y no podría serlo «ni empíricamente, ni lógicamente, ni matemáticamente» (Morin 1990b: 206). Habrá, pues, que «abandonar la oposición ontológica azar/necesidad» (Morin 1982: 122)²³.

²³ «Es preciso, pues, que abandonemos una oposición ontológica/metafísica para considerar una problemática metodológica: la del conocimiento de un universo cuyo observador jamás podrá eliminar el desorden y del cual jamás se podrá eliminar al observador.— Así, es preciso que superemos la alternativa simplona azar/necesidad, orden/desorden. Es preciso que entremos en el campo de nuestra realidad, que no solo comprende la observación, la

Pero lo anterior en modo alguno significa que para Morin el azar sí pueda ser probado y establecido como realidad absoluta. No puede serlo ni como «azar original», es decir, como azar «absoluto, incondicional, eterno», ni incluso, como ha mostrado Gregory Chaitin, como «azar particular». El azar es incierto; no podemos aseverar que lo que percibimos como aleatorio no sea algo determinado, pero cuyas determinaciones ignoramos; no podemos probar que el azar no sea fruto de nuestra ignorancia, ni estar seguros de que lo que se nos aparece como desorden no albergue un orden oculto que desconocemos. Destronado el orden-rey Morin no hace del desorden un nuevo principio absoluto del Universo. El desorden y el azar no existen «en-sí», sino que son relativos, solo existen en relación con la organización y el observador/conceptuador: «el desorden no puede ser planteado como un absoluto ontológico. Debe necesariamente ser relacionado, en tanto que alea, a un observador/conceptuador, y en tanto que accidente/perturbación/ruido, a un problema de organización» (Morin 1982: 122).

Morin (1982: 123) se sitúa «en el punto de vista real del hombre-social-que-vive-en-el-mundo», ubicación que implica desmarcarse tanto de la deificación reificadora del determinista punto de vista del demonio laplaceano, como de la idólatra ideología del neo-dios Azar. Y desecha ambas concepciones por exiguas, aporéticas y estériles. Lo que es «solo real» es «la conjunción del orden y del desorden» (Morin 1977: 95). No podemos probar, pues, que «la realidad última u oculta» de nuestro Universo sea el orden o el azar (el desorden). Determinismo universal y azar absoluto no son más que dos postulados, opuestos, pero igualmente metafísicos, ontologizados e indemostrables. Con respecto a «la realidad última del orden y del desorden» siempre habrá incertidumbre:

«No se puede saber si la incertidumbre que nos aporta un fenómeno que nos parece aleatorio procede de la insuficiencia de los recursos o de los medios del espíritu humano, insuficiencia que le impide encontrar el orden oculto tras el aparente desorden, o bien si procede del carácter objetivo de la realidad misma. No sabemos si el azar es un desorden objetivo o, simplemente, el fruto de nuestra ignorancia» (Morin 1982: 104).

experimentación, la concepción, sino también al observador/experimentador/conceptuador» (Morin 1982: 124).

Por tanto, Morin ni exorciza ni deifica al azar. Para él, la idea de desorden es ineliminable y necesaria para concebir nuestro Universo y su evolución. Lo que fenomenológicamente tenemos es la «copresencia» dialógica de la necesidad y del azar, de lo determinado y lo aleatorio, del orden y del desorden; el campo real del conocimiento «comporta la presencia ineliminable de determinismos y aleas, de orden y de desórdenes, en los fenómenos micro, macro, astrofísicos, biológicos, ecológicos, antropológicos, históricos» (Morin 1982: 122).

A la luz de nuestra exposición de la postura de Morin ante el debate sobre el determinismo y la aleatoriedad, es evidente la incorrección y el desacierto de las críticas que se han realizado contra Morin acusándolo de llevar a cabo una deificación ontologizadora del desorden y una esencialización del azar (como hace, por ejemplo, Reynoso 2006: 152 y 179). El eximio matemático René Thom (1980) creyó que «las filosofías subyacentes» de Morin, Monod, Atlan, Prigogine y Stengers comparten, como rasgo común y fundamental a todas ellas, una glorificación ultrajante del azar, del ruido, de las fluctuaciones, de lo aleatorio, a los que harían responsables últimos del origen del Universo y de la vida. Morin (1980b) respondió a esta crítica. Como bien contrarreplicó, Thom se confunde con respecto a los autores referidos, pues lo que estos en realidad intentan, cada uno a su manera, es concebir la asociación y la cooperación de lo aleatorio y lo determinista, y ponen de relieve los factores de orden que intervienen en toda génesis.

2.2.5. Emergencias, microemergencias y constreñimientos

Morin (1977: 129-130) define las emergencias como «las cualidades o propiedades de un sistema que presentan un carácter de novedad con relación a las cualidades o propiedades de los componentes considerados aisladamente o dispuestos de forma diferente en otro tipo de sistema». Precisamente porque del todo surgen emergencias, cualidades o propiedades nuevas que no estaban en las partes consideradas aisladamente o de manera sumativa, suele decirse que «el todo es más que la suma de las partes».

Las emergencias aparecen en el despliegue de la unidad global organizada y *retroactúan* sobre los componentes del sistema a partir de los cuales han emergido. El todo en tanto que todo retroactúa

sobre las partes, las cuales, a su vez, retroactúan sobre el todo. Se establece, así, un bucle entre todo y partes. En tanto que el todo manifiesta cualidades emergentes y retroactúa como totalidad organizada sobre las partes, Morin escribe que «el todo es más que el todo»; es decir, que el todo (como dinamismo organizacional retroactuante y emergente) es más que el todo (considerado solo como forma global).

Pero las emergencias no solo acontecen en el todo, sino también en las partes. Existen propiedades y cualidades que los componentes no poseen en estado aislado y que adquieren y desarrollan en tanto que partes de un todo, como componentes de un sistema. Las macroemergencias del todo retroactúan sobre las partes para dar lugar en estas a determinadas microemergencias. Es en este sentido en el que Morin escribe que «la parte es, en y por el todo, más que la parte»; es decir, que la parte (como componente de un sistema) manifiesta en el seno del sistema emergencias que no mostraba como parte aislada.

Por otro lado, las organizaciones ejercen también restricciones o constreñimientos en sus componentes, impidiéndoles a estos adoptar todos sus estados posibles. El todo inhibe y hace perder a las partes propiedades, cualidades y posibilidades de acción de las que disponen consideradas aisladamente. Por esto, Morin nos dice que «el todo es menos que la suma de las partes». Todo sistema requiere para constituirse como tal y, por tanto, implica constreñimientos, que pueden ser de tres clases: de las partes sobre el todo, del todo sobre las partes y –en el caso de partes interdependientes– de unas partes sobre otras.

2.2.6. El principio de antagonismo y el sistema como unitas multiplex

La organización de un sistema supone el establecimiento de relaciones complementarias entre componentes que presentan diferencias de una u otra naturaleza. Pero, al instituir complementariedades, la organización crea –aunque solo sea virtual y potencialmente– antagonismos y oposiciones. Toda interrelación organizacional supone la existencia de atracciones, afinidades, uniones entre los elementos del sistema. Pero el mantenimiento de las diferencias

conlleva igualmente la existencia de fuerzas de repulsión, disociación, exclusión. Toda organización sistémica comporta y produce antagonismos al mismo tiempo que complementariedad. Para que halla organización sistémica será preciso que las fuerzas asociativas predominen sobre las disociativas virtualizándolas (es decir, inhibiéndolas, controlándolas, conteniéndolas). Es por esto que Morin enuncia el siguiente «principio de antagonismo sistémico»: «*la unidad compleja del sistema a la vez crea y reprime al antagonismo*» (Morin 1977: 144). No hay organización sin antagonismos, es decir, sin una antiorganización potencial que es, a la vez, necesaria y antagonista para la organización.

Morin aloja el antagonismo en el corazón de la unidad compleja; para él, la organización comporta antagonismos internos (antiorganización). Por ser el todo insuficiente (requerimos la referencia a las partes), conflictivo (alberga conflictos y antagonismos) e incierto (transacción sistema/sujeto), afirma Morin que «el todo es menos que el todo».

2.2.7. La organización activa: bucle, apertura y producción-de-sí

Como su nombre indica («*organizacción*»), las organizaciones físicas se producen mediante acciones (movimientos, interacciones, reacciones, retroacciones, transacciones, generaciones, creaciones, transformaciones, etc.), son organizaciones *activas*. De manera más precisa, inspirándose en la pareja conceptual competencia/actuación de la lingüística chomskyana, Morin entiende las organizaciones activas como aquellas que efectúan su praxis (es decir, sus transformaciones, producciones o realizaciones) en virtud de una competencia organizacional.

Define la competencia como «la aptitud organizacional para condicionar o determinar cierta diversidad de acciones/transformaciones/producciones» (Morin 1977: 185). A diferencia de las acciones resultantes de encuentros azarosos entre procesos separados, las acciones que se efectúan en, por y para una organización (y sin que esto excluya por principio el posible carácter aleatorio de determinadas acciones en el seno de una organización) son producidas en función de propiedades organizacionales. Por su parte, la praxis es el «conjunto de actividades que efectúan transformaciones, producciones, realizaciones a partir de una *competencia*» (Morin 1977: 186).

Las organizaciones activas «están dotadas de virtudes generativas y regenerativas internas: son productoras-de-sí, organizadoras-de-sí, reorganizadoras-de-sí, su *poiesis* se identifica, en primer lugar, con la producción permanente de su propio ser» (Morin 1977: 211); llevan a cabo una producción y organización permanentes de su propio ser²⁴. Para comprender las ideas de producción-de-sí y de reorganización-de-sí, Morin recurre a las ideas de bucle y de apertura.

El bucle comporta siempre circuitos y/o ciclos, y puede ser retroactivo o recursivo. Hay retroacción cuando existen procesos en circuito en los que los «efectos» retroactúan sobre sus «causas». Pueden distinguirse dos tipos de retroacciones: negativa y positiva.

La retroacción negativa, que anula las perturbaciones y las desviaciones, conserva las formas y mantiene la constancia. Toda organización activa implica regulaciones, en el sentido de que el bucle tiende a anular las desviaciones y perturbaciones que aparecen en relación a la organización; anulándolas, la regulación contribuye a la producción-de-sí.

La retroacción positiva amplía las desviaciones y genera crisis, desajustes y accidentes que provocan la dispersión y destrucción de las formas existentes; pero también puede dar lugar a la creación de nuevas formas, a morfogénesis y evoluciones.

Por su parte, la idea de bucle recursivo es más compleja y rica que la de bucle retroactivo. El bucle recursivo «es un proceso en el que los efectos o productos al mismo tiempo son causantes y productores del proceso mismo, y en el que los estados finales son necesarios para la generación de los estados iniciales. De este modo, el proceso recursivo es un proceso que se produce/reproduce a sí mismo, evidentemente a condición de ser alimentado por una fuente, una reserva o un flujo exterior» (Morin 1986: 111-112).

²⁴ Como veremos, con los seres vivos el *sí* se convertirá en *autos*. En lo que al uso de uno u otro término se refiere, la distinción moriniana entre *sí* y *autos* es convencional; podría sustituirse el término *sí* por el de *autos* y viceversa siempre, claro está, que se redefiniesen parejamente sus significados. Para Morin, el *autos* corresponde al fenómeno del *sí*, pero en el dominio de la complejidad viviente y, consiguientemente, con las emergencias propias de la vida (auto-poiesis, aparato computacional, dualidad geno-fenómica, etc.).

Mediante los procesos retroactivos/recursivos se lleva a cabo la producción-de-sí. Como todo sistema que trabaja produce entropía, tiende entonces a degenerar, a desorganizarse, por lo que, para mantenerse en el ser, habrá de regenerarse y reorganizarse sin cesar. Por tanto, la producción-de-sí es una regeneración y reorganización permanentes. Todo sistema está amenazado por desórdenes exteriores e interiores, por lo que su permanencia (su supervivencia) no es inercial, sino resultado de una organización activa que combate y repara los desórdenes (degradaciones, desorganizaciones), la anti-organización, es resultado de una «anti-anti-organización» (Morin 1977: 156-157). El orden organizacional es un orden construido y conquistado sobre el desorden. De modo paradójico, esta actividad incesante, este *turnover* ininterrumpido, produce estados estacionarios, formas constantes: el devenir crea el ser. Es paradójico porque resulta que hay «estado estacionario» (*steady state*, equilibrio, estabilidad global, constancia en la forma) «porque hay desequilibrio, inestabilidad, movimiento, cambio» (Morin 1977: 218). Además, los procesos recursivos requieren y dependen, para seguir produciéndose, de una constancia, de una permanencia. Por tanto, los procesos recursivos (movimiento) y el ser (estado estacionario, morfostasis) se coproducen. De este modo, Morin complejiza las relaciones ser/movimiento, equilibrio/desequilibrio, estabilidad/inestabilidad; es decir, las contempla, no como alternativas simples excluyentes, sino de manera dialógica, como «términos que se convierten en complementarios sin dejar de ser antagonistas» (Morin 1977: 220).

Por lo que a la idea de apertura compete, la organización activa se mantiene en el ser y se desarrolla (producción-de-sí), en vez de aumentar su entropía y desintegrarse, gracias a que mantiene una apertura a su entorno mediante la que sostiene con estos intercambios de materia y energía.

Los sistemas abiertos –a diferencia de los «sistemas cerrados»²⁵, que se encuentran en un estado de equilibrio, pues no intercambian materia, energía ni información con el exterior– están en estado de desequilibrio retomado o compensado, de dinamismo estabilizado, pues mantienen sus estructuras mediante la sustitución de los constituyentes degradados, y esta sustitución se realiza gracias al intercambio de materia, energía e información con el exterior. No obstante, en virtud de lo puntualizado en la nota anterior, el sistema, a la vez que se abre al mundo exterior, se clausura sobre sí mismo, se cierra al exterior, con el fin de mantener su medio interno.

Mediante la praxis (producción, regeneración, autoproducción incesante) se produce un cerramiento y una emergencia de ser y de autonomía. Los «sistemas activos» mantienen al mismo tiempo una apertura y una clausura organizacionales. La apertura consiste en intercambios materiales, energéticos y/o informacionales con el entorno y permite la existencia del sistema. La clausura se realiza mediante procesos de empujamiento, recursivos, y genera el ser y la autonomía (relativa) del sistema.

2.2.8. La organización viviente

Morin concibe la complejidad viviente como: *Auto-(geno-feno-ego)-eco-re-organización (informacional-computacional-comunicacional)*. En su opinión, una conceptualización mínimamente adecuada de la organización viviente exige la asociación o reunión de todos esos conceptos y prefijos²⁶.

²⁵ Debido a que no hay sistemas absolutamente clausurados (incluso los sistemas termodinámicamente cerrados están abiertos, pues mantienen con su entorno interacciones gravitacionales y electromagnéticas) y a que todo sistema tiene algo de cerrado, mejor que de sistemas cerrados y de sistemas abiertos Morin (1977: 230-231) prefiere hablar de apertura y cerramiento de un sistema, de apertura y cerramiento sistémicos. Todo sistema es, a la vez y de manera compleja (es decir, complementaria, concurrente y antagónica), abierto y cerrado, y dependerá del punto de vista que adopte el observador para que aparezca su cerramiento o su apertura.

²⁶ Para una exposición más amplia de la teoría de la organización viviente de Morin, véase Solana 2001: 259-304.

La autonomía viviente comporta dos niveles de organización, inseparables pero distinguibles: el fenoménico (*fenon*) y el generativo (*genos*); *autos*, pues, se compone de *fenon* y de *genos*.

Con el término *genos* (que en griego significa origen, nacimiento) se refiere Morin a lo que en biología se denomina como *genotipo*. El genotipo es «el patrimonio hereditario inscrito en los genes que un individuo recibe de sus genitores» (Morin 1980a: 138). Remite, pues, a la *especie*, a lo genérico, generador y genético, a los procesos transindividuales que generan y regeneran a los individuos. A nivel celular, se localiza en el ADN, en los genes (memoria informacional inscrita en el ADN, mantenimiento de las invariaciones hereditarias).

Con el término *fenon* (que en griego significa «lo que aparece») Morin recoge el concepto biológico de *fenotipo*. El fenotipo es «la expresión, actualización, inhibición o modificación de los rasgos hereditarios en un individuo en función de las condiciones y circunstancias de su ontogénesis en un entorno dado. El fenotipo es, pues, una entidad compleja, que resulta de las interacciones entre la herencia (*genos*) y el medio (*oikos*)» (Morin 1980a: 138). Remite, por tanto, a la existencia *hic et nunc* de una *individualidad singular* en el seno de un entorno. A nivel celular, se localiza en las proteínas.

La ego-organización reside en el hecho de que «todo ser viviente «computa» sus propios constituyentes, como los datos exteriores, de forma ego-céntrica, oponiendo su *sí* (a defender, alimentar, desarrollar) a su *no-sí* (a ignorar, rechazar o combatir)» (Morin 1982: 350).

Para Morin todo ser viviente, ya desde el unicelular procariota, es un ser computante, una entidad que organiza su ser, su existencia, su *sum* a partir de un *computo* (*computo ergo sum*). El ser viviente es *computo*²⁷. En los seres vivos, «el *computo* es multidimensional y total» (Morin 1980a: 225); es decir, que en la vida no hay acciones, operaciones, interacciones o emergencias sin computación²⁸. El

²⁷ «La menor acción, reacción, interacción, retroacción del menor ser viviente necesita y comporta computación. El ser viviente computa permanentemente y, en este sentido, la computación es el ser mismo» (Morin 1980a: 192).

²⁸ El cómputo, y todo individuo viviente en tanto que ser computante, lleva

ser viviente computa de sí, por sí y para sí, y realiza una afirmación-de-sí. Es egoísta, en el sentido de que se afirma a sí mismo y lo hace computando él mismo (por-sí, ego-centrismo) sus programas informacionales (de-sí, ego-referencia) para sobrevivir y satisfacer sus intereses (para-sí, ego-finalidad).

La auto-organización viviente es informacional, «puesto que funciona a partir de una memoria informacional (los genes) y capta información de su entorno» (Morin 1982: 350); y comunicacional porque los seres vivos se comunican con su entorno y porque su organización interna se funda en la comunicación entre sus elementos constituyentes. La información requiere y presupone a la computación viviente; solo a través del cómputo la idea de información comienza a cobrar sentido²⁹.

2.2.9. Eco-organización y eco-evolución

Todo ser vivo está radicalmente integrado en un ecosistema; la dimensión ecológica es una de las dimensiones fundamentales de la vida. El ser vivo no solo obtiene de la naturaleza materia y energía, sino que, además, como puso de manifiesto Erwin Schrödinger, extrae información y organización. Al ser base de los aportes (materia, energía, información) que los seres vivos necesitan para existir, «el ecosistema es co-organizador y co-programador del sistema vivo que engloba» (1973: 30). La vida es eco-organización y debe ser concebida «eco-organizacionalmente».

Morin complejiza, profundiza y enriquece las nociones de ecosistema, cadena, ciclo, evolución, selección y adaptación irrigándolas con su paradigma de la complejidad (complementariedad, concurrencia, antagonismo) organizacional (orden, desorden, organización).

en sí el riesgo de error, ya que «toda operación de computación, transmisión, reproducción de información comporta un riesgo de error» (Morin 1981: 190).

²⁹ Morin no estima «irrelevante» ni «engañoso» el concepto de información, como erróneamente cree Carlos Reynoso (2006: 39). La información en modo alguno es para Morin una noción «irrelevante». Muy al contrario, es un concepto «nuclear», «crucial», «indispensable», que alberga «una riqueza enorme». Tampoco es una noción «engañosa». Es un concepto «problemático» que es necesario profundizar y elucidar, y que cobra sentido y relevancia en relación al cómputo (véase Morin 1990a: 47 y 49-50).

Por lo que a la complejización de la idea de evolución se refiere (los seres vivos son seres «del devenir», de la evolución), frente a la «concepción atomizada de la evolución», que solo ve a esta como evolución de las especies mediante selección «natural», Morin (1983: 57) considera que la teoría neodarwiniana o sintética de la evolución debe integrarse y fundarse en un paradigma de la auto-eco-reorganización para constituir una teoría organizacional de la evolución. En esa línea, las nociones de mutación y selección tienen que incluirse y desarrollarse en un «*paradigma organizacional*» (Morin 1983: 56).

En la teoría neodarwiniana de la evolución, el genotipo fue entendido como un mensaje portador de información y, en consecuencia, las perturbaciones causantes de mutaciones fueron conceptualizadas como «ruido» generador de errores en la comunicación del mensaje hereditario. Este enfoque neodarwiniano obliga a plantear la cuestión de cómo un «error» puede producir cualidades organizacionales e incrementos de «información». El azar fue la respuesta a esta cuestión: las nuevas cualidades organizacionales son resultado de mutaciones azarosas.

Ahora bien, alega Morin (1983: 59), «cada vez menos se puede hacer del solo azar el *deus ex machina* de todas las transformaciones. También se comienza a asociar el azar a fenómenos reorganizadores»; y señala (Morin 1983: 61) que se han formulado hipótesis biológicas que sostienen la necesidad de complementar el azar con «consideraciones organizacionales» para comprender la evolución. Es necesario comprender cómo, ante una mutación potencialmente desorganizadora, generadora de «ruido», el genoma es capaz de superar un proceso potencial de desorganización y, al mismo tiempo, de reorganizarse para integrar la mutación de manera positiva. Ello es posible, postula Morin (1983: 65), porque la mutación moviliza de algún modo las potencialidades organizacionales complejas del genoma. De ese modo, la evolución biológica no es solo consecuencia del azar: «El azar no es todo» (Morin 1983: 65). Además del azar, entran en acción y son necesarias aptitudes organizacionales, la capacidad de autoorganización (Morin 1983: 65-66). La relación entre eventos y desarrollos organizacionales es considerada por Morin (1983: 56) como condición fundamental de toda evolución (físico-cósmica, biológica, sociocultural), como principio general del devenir.

Por otro lado y cambiando de tema, la concepción simplificadora de la evolución no se percata de que la evolución de las especies no puede desligarse de la evolución de los ecosistemas donde las especies viven, de la eco-evolución. Morin señala la necesidad de concebir la co-evolución de especies y ecosistemas. La selección de la especie es inseparable de su integración ecosistémica, pues «las condiciones de selección se modifican en función de la evolución de los ecosistemas»; evolución ecosistémica que «produce nuevas reglas de integración y nuevos criterios de selección» (Morin 1980a: 53). Lo que se selecciona no son los individuos, las especies o los genes, de manera aislada, atomizada, sino «*todo lo que favorece la regulación y la reorganización de los ecosistemas*», todo aquello que fortifica las cadenas, los ciclos y los bucles eco-organizadores.

Pero no solo el ecosistema selecciona al organismo; también en ocasiones el organismo selecciona y modela al ecosistema. Además, lo seleccionado, al integrarse como tal en los juegos ecosistémicos seleccionadores, se torna también seleccionante. Por otra parte, Morin articula los conceptos de selección y eliminación. De las especies desaparecidas, que vivieron durante muchísimo tiempo, más de lo que lo harán algunas de las hoy existentes, no puede decirse simplemente que han sido eliminadas por la «selección natural». Ciertamente, lo han sido, pero previamente fueron seleccionadas. Todas las especies que han tenido una vida longeva fueron seleccionadas. La selección es temporal y ambigua (es decir, que aparece necesariamente ligada al concepto, en principio contrario, de eliminación) y lo seleccionado no lo es solo a través de la lucha y del antagonismo. La selección natural no puede reducirse a la idea de «lucha» por la vida; lo seleccionado es también lo solidario por la vida, ha sido seleccionado también en virtud de su capacidad para ser complementario y solidario (y, por tanto, integrable en los bucles eco-organizadores) con respecto a la totalidad eco-organizacional.

Morin lleva a cabo también una complejización del concepto de adaptación. Según él, la adecuación rígida y perfecta de una especie a un ecosistema determinado no constituye un modelo de adaptación de la especie al medio. No lo constituye porque en el momento en que sobrevenga una modificación de las condiciones de adaptación, la especie se desadapta fácilmente y puede llegar a desaparecer. Lo que favorece la supervivencia no es la perfecta adaptación a condiciones

de existencia muy precisas (pero, por ello, temporales y pasajeras), sino «la aptitud para adaptarse en condiciones diversas o en medios diferentes», es decir, la «*adaptatividad*» o «aptitud para adaptarse de manera diversa» (Morin 1980a: 67). Además, en su complejización del concepto de adaptación Morin introduce en este la idea de «adaptación-a-sí» del medio, la adaptación del medio por parte del ser viviente en función de sus necesidades. El ser viviente modifica el medio para adaptarlo a sí. Por otra parte, la movilidad de los animales les permite, en vez de adaptarse, «adoptar» temporalmente otro medio (por ejemplo, mediante migraciones). La adaptación no es la integración entre un organismo y un medio inertes, sino la integración entre un organismo y un ecosistema que ambos se auto-organizan. De ahí que Morin (1980a: 69) entienda la adaptación como la integración de la auto-organización del organismo en una eco-organización.

2.2.10. La re-organización permanente

La idea de organización activa es sinónima de la idea de reorganización permanente, y toda reorganización continua es, al mismo tiempo, regeneración y recursividad permanentes. Es por esto por lo que, para comprender *physis* y *bios*, Morin se ocupa de la raíz re- presente en un conjunto de ideas y fenómenos claves para entender lo físico y lo biológico: repetición (replicación, reentrada, recomienzo), retroacción (bucle), reorganización (renovación, restablecimiento), reproducción, regeneración, rememoración (representación psíquica), reflexión, recursividad, reunión (conexión, comunicación), reutilización, reconstitución del mismo proceso (circuito, ciclo, cadena, bucle). La raíz re- es imprescindible para comprender *autos* y *oikos*, pues la auto-organización y la eco-organización son, fundamentalmente, re-organizaciones.

Los procesos re-organizadores hacen que la identidad de los seres vivientes no sea una identidad fundada en una invariación estática, sino una identidad sostenida en el dinamismo, la reorganización continua y el empuclamiento. El bucle comporta repetición, recomienzo, regeneración, vuelta a sí y organización de sí. Así, las aparentes estabilidades de la célula, del organismo o de la sociedad están basadas en la regeneración incesante de –correlativamente– moléculas, células e individuos. Por esto, el todo está en un perenne proceso de degradación y regeneración. La aparente invariación,

estabilidad e identidad de las estructuras vivientes es resultado de continuos procesos de regeneración y reorganización, de una ininterrumpida reconstitución. Aparentemente, el organismo es estable, mantiene de modo invariable sus formas, sus estructuras, su identidad. Pero a escala microscópica pierde toda sustancialidad y se revela el fabuloso *turnover* que renueva incesantemente casi todos sus constituyentes moleculares y celulares. La renovación energética que exige toda organización viviente, los procesos de auto-destrucción que entraña la existencia y la enorme inestabilidad de las moléculas proteínicas de los organismos, inscriben en la vida la *sisifoniana* necesidad de reorganizarse y reconstruirse sin cesar. El orden, la invariación y la continuidad mostrados por los organismos vivientes son re-producidos constantemente; se producen a partir del retorno y la repetición incesantes de elementos y procesos discontinuos, efímeros y precarios.

Morin no entiende la reorganización permanente como repetición mecánica, pues la reorganización no significa solo vuelta de lo antiguo, sino también renovación; en la repetición, lo mismo que retorna lo hace a modo de una renovación, es siempre distinto. Además, la reorganización permanente no solo supone renovación. También supone acogimiento de lo nuevo; en la renovación, las mutaciones generan novedad. La reorganización viviente no es un eterno retorno de lo mismo. En la evolución se produce ruptura de la repetición por surgimiento de lo nuevo y reconstitución de la repetición tras la integración de lo nuevo.

3. Ciencias de la complejidad

3.1. Usos de la noción de complejidad en el marco de las ciencias de la complejidad

3.1.1. De la complejidad algorítmica a la complejidad efectiva basada en regularidades

Murray Gell-Mann (1994) se plantea la cuestión de la definición de la complejidad de un sistema, sea este el que sea, y vincula dicha definición a la descripción que puede realizarse de un sistema

determinado y, de manera más precisa, a la extensión o longitud del mensaje requerido para describir determinadas propiedades de un sistema. De ese modo, descarta definir la complejidad como complejidad computacional, entendiendo por esta el tiempo requerido por un ordenador para resolver un problema determinado. Según Gell-Mann (1994: 45), la complejidad computacional no se corresponde con el modo como habitualmente se entiende la cuestión de la complejidad, pues, cuando esta se plantea, lo que interesa conocer no es el tiempo que se tarda en resolver un problema con un ordenador, sino la extensión del mensaje requerido para describir determinadas propiedades de un sistema.

Por otra parte, Gell-Mann considera que cualquier definición de complejidad (tanto la complejidad computacional como la caracterización de la complejidad de un sistema mediante la longitud del mismo, al igual que la complejidad algorítmica y la complejidad efectiva, a las que me referiré más adelante) tiene necesariamente un carácter contextual, escalar y subjetivo.

La complejidad que puede atribuirse a un sistema no es una propiedad intrínseca de este, del sistema descrito, sino que depende en parte del contexto (por ejemplo, de factores tales como la clase de ordenador y el lenguaje que se utilicen, o la competencia del programador o del sistema descriptor). Además, toda definición de una forma de complejidad requiere siempre que, de manera previa a la misma, se establezca el grado de resolución de la descripción del sistema, lo que implica ignorar determinados detalles de este (Gell-Mann 1994: 46-49). El hecho de que toda definición de la complejidad sea «necesariamente dependiente del contexto» y exija establecer el grado de resolución de la descripción, hace que dicha definición tenga algo de subjetivo, no sea una característica intrínseca del sistema observado, sino que dependa del observador (por ejemplo, de los instrumentos de observación que emplea). Y, en tanto que subjetiva, toda definición de la complejidad porta un componente de arbitrariedad (Gell-Mann 1994: 49-52).

Además de rechazar el concepto de complejidad computacional, Gell-Mann rechaza también el contenido de información algorítmica, el cual puede codificarse en cadenas de bits, como medida de la complejidad de un sistema. En este caso, el de la complejidad

algorítmica, cuanto más corta sea la cadena de bits que describe al sistema, menor será su contenido de información algorítmica y su grado de complejidad. Y a la inversa, cuanto más larga sea la cadena de bits, mayor serán tanto su contenido de información algorítmica como su complejidad algorítmica.

Las cadenas de bits en que se expresa el contenido de información algorítmica pueden ser más o menos compresibles, es decir, pueden ser comprimidas, su descripción puede ser simplificada, mediante alguna regla, algoritmo o teorema que permita describirlas con un mensaje más corto. Cuanto más compresible sea una cadena de bits, más bajo será su contenido de información algorítmica, menor será su grado de complejidad algorítmica.

La existencia de regularidades en la cadena de bits es lo que permite la compresión de estas. Aunque una cadena de bits sea en principio muy larga, puede tener en realidad un contenido de información algorítmica muy bajo, por contener regularidades que permitan comprimirla. Las cadenas que carecen de regularidades, que son «aleatorias», no pueden comprimirse; muestran, en consecuencia, «incertidumbre algorítmica» y tienen un contenido de información algorítmica máximo³⁰.

Pero nunca podremos estar seguros de que un mensaje sea incompresible (no pueda comprimirse) o de que un mensaje no pueda comprimirse más de lo ya comprimido, pues no es posible descartar la posible existencia de un algoritmo o un teorema que permita comprimir la cadena de bits. Ello se debe a que, como demostró Gregory Chaitin, no existe un procedimiento con el que poder establecer todos los teoremas capaces de comprimir una determinada cadena de bits.

Esta «no computabilidad» del contenido de información algorítmica dificulta el empleo de este para definir la complejidad. Además, el hecho de que el contenido de información algorítmica sea una

³⁰ La mayoría de las cadenas generadas mediante un procedimiento azaroso son irregulares e incompresibles, pero no todas, pues el azar puede generar en ocasiones cadenas con algunas regularidades y, consiguientemente, compresibles en parte, o bien puede dar lugar alguna vez a secuencias muy regulares y, por tanto, altamente compresibles.

medida de incertidumbre (es mayor para las cadenas aleatorias) impide que ese contenido pueda utilizarse para definir la complejidad. Según Gell-Mann, la incertidumbre algorítmica no es lo que suele entenderse por complejidad, ni en sentido ordinario (nuestra idea intuitiva de complejidad) ni en sentido científico, de manera que «el contenido de información algorítmica no representa una complejidad verdadera o efectiva» (Gell-Mann 1994: 58).

Descartada la complejidad algorítmica, Gell-Mann (1994: 66-67 y 72-73) define y establece la «complejidad efectiva» de un sistema en función de la longitud del esquema empleado por un sistema complejo adaptativo para describir las regularidades que ha captado del flujo de datos que le llegan de otro sistema: «un esquema descriptivo formulado por un sistema complejo adaptativo observador es una lista concisa de regularidades, y la longitud de dicha lista es una medida de la complejidad efectiva del objeto observado» (Gell-Mann 1994: 182).

Si entendemos ese esquema como cadenas de bits, entonces, las cadenas de bits totalmente aleatorias presentan un valor máximo de complejidad algorítmica y un valor nulo (cero) de complejidad efectiva, mientras que las cadenas de bits enteramente regulares y altamente compresibles presentan una complejidad algorítmica (un contenido de información algorítmica) nulo (cero) y un valor bajo de complejidad efectiva (longitud del esquema que describe regularidades). Así, según Gell-Mann, leyes científicas (esquemas) como las ecuaciones de Maxwell sobre el electromagnetismo o la ecuación einsteiniana de la relatividad general para la gravedad, que se expresan en una secuencia de información de longitud corta (por ejemplo, $G_{\mu\nu} = 8\pi K T_{\mu\nu}$), tienen una complejidad efectiva muy baja, es decir, son «extremadamente simples» (Gell-Mann 1994: 101-105). Dichas ecuaciones comprimen, encapsulan, empaquetan en un esquema (fórmula) corto la información precisa para describir el comportamiento de todos los casos correspondientes a una realidad determinada (los campos gravitatorios o los campos electromagnéticos en cualquier lugar del universo)³¹.

³¹ A esa consideración de las leyes científicas como simples podría alegarse que la comprensión de dichas ecuaciones exige o presupone un conjunto de conocimientos previos, como los necesarios para entender la notación en que están formuladas, de manera que, si se explicitasen esos conocimientos,

3.1.2. Complejidad efectiva, accidentes congelados, azar e indeterminación

Hemos visto que la complejidad efectiva se refiere a las regularidades que presenta un sistema. Según Gell-Mann, algunas de esas regularidades son consecuencia de las leyes fundamentales que gobiernan el universo, pero otras regularidades son resultado de «accidentes congelados». Los accidentes congelados son sucesos aleatorios o azarosos que se han congelado «en forma de reglas para el futuro» y cuyas consecuencias pueden tomar a largo plazo el carácter de una ley perteneciente a un nivel determinado (geológico, biológico, psicológico) (Gell-Mann 1994: 132, 152-153, 248 y 390). Las regularidades (rasgos comunes, reglas de constitución o estructuración de los fenómenos) resultan de la conjunción de las leyes fundamentales con la acumulación de accidentes congelados: «En el mundo real las regularidades surgen de la combinación de leyes fundamentales simples con la intervención del azar, que puede producir accidentes congelados» (Gell-Mann 1994: 389-390).

La congelación en función de reglas, al generar un incremento del número de regularidades existente, supone también, en consecuencia, un aumento de la complejidad efectiva (Gell-Mann 1994: 246-248). Solo una pequeña parte del contenido de la complejidad efectiva del universo, de sus regularidades, proviene de las leyes fundamentales. La mayoría de ese contenido, de esas regularidades, provienen de «accidentes congelados».

la longitud de la descripción y, por ende, su complejidad efectiva, se incrementarían progresivamente. Gell-Mann (1994: 102) reconoce que esta alegación no sería «del todo irrazonable», pero la desestima alegando que la información necesaria para explicar las ecuaciones referidas «sería finita, lo cual resulta insignificante cuando consideramos que las ecuaciones son válidas para todos los campos eléctricos y magnéticos en cualquier lugar del universo». En mi opinión, el carácter finito de esa información y el amplio alcance que ciertamente las ecuaciones referidas tienen no invalidan el hecho de que su explicación conlleve un incremento de la longitud de la descripción y, por tanto, una pérdida de simplicidad de esta y una consiguiente ganancia de complejidad efectiva. A mi juicio, la contra argumentación de Gell-Mann no invalida el cuestionamiento de la supuesta simplicidad de las leyes y ecuaciones científicas.

Gell-Mann (1994: 133, 152 y 248) resalta el papel que han desempeñado y que desempeñan las «fluctuaciones aleatorias», los «resultados aleatorios», en la determinación del carácter de los distintos sucesos de la historia del universo (el origen de las galaxias), de nuestro planeta (la evolución del clima) y de la vida (el surgimiento de esta, la evolución de las especies), así como en la historia de la humanidad y de cada persona. Esos fenómenos fundamentales de la historia del universo, de la Tierra y de la vida han sido resultado de «la acumulación de accidentes congelados que se han convertido en regularidades dentro de regiones limitadas del espacio y el tiempo» (Gell-Mann 1994: 250).

La acumulación de accidentes congelados en el transcurso del tiempo da lugar a una tendencia hacia un gradual y progresivo incremento de la complejidad, hacia la emergencia y evolución de formas más complejas, que se da tanto en sistemas no adaptativos (galaxias, estrellas, planetas) como en sistemas complejos adaptativos (Gell-Mann 1994: 246-248 y 253): «unas leyes simples, que incluyen un estado inicial ordenado, junto con la intervención del azar, han producido las maravillosas complejidades del universo» (Gell-Mann 1994: 347).

El azar y la indeterminación entran «necesariamente en escena» debido al carácter probabilístico de la mecánica cuántica y al principio de incertidumbre de Heisenberg. Además, en los sistemas no lineales, la incertidumbre cuántica «puede amplificarse en virtud del fenómeno del caos». Y, finalmente, el azar cobra aún más importancia, si cabe, debido a las limitaciones de nuestros sentidos e instrumentos de conocimiento (Gell-Mann 1994: 386-387).

3.1.3. La complejidad entre el orden y el desorden

La complejidad, refiere Chris Langton (en Lewin 1992: 23), se produce en «algún lugar intermedio» entre lo «completamente ordenado» y lo «completamente aleatorio». El siguiente texto de Heinz R. Pagels (1988: 15), que muestra claras coincidencias con las tesis de Weaver, recoge también esa idea:

«Un cristal de diamante, por ejemplo, con sus átomos prolijamente dispuestos, es "ordenado"; una rosa, en la cual

juega tanto el azar como el orden en la disposición de sus partes, es "compleja"; el movimiento de las moléculas de un gas es verdaderamente "caótico" [desordenado]. La complejidad, entonces, cubre un vasto territorio que se extiende entre el orden y el caos. Resulta interesante observar que es grande nuestra comprensión de sistemas totalmente ordenados como el de los cristales, en el cual los átomos se encuentran perfectamente arreglados en una suerte de enrejado (...). También entendemos bastante acerca de sistemas totalmente caóticos como los gases, porque podemos aplicarles las leyes de la estadística de modo bastante eficaz. El caos garantiza una conducta promedio muy estable, de modo que podemos hallar leyes pertinentes. Es en el ámbito de la complejidad, que se da entre el orden y el caos, donde se plantea el mayor desafío de la ciencia».

Ese estado intermedio que caracteriza a la complejidad es constatado y estudiado mediante la aplicación de algunas de las herramientas informáticas, como los autómatas celulares y las redes booleanas aleatorias, de las que se sirven los científicos que trabajan en el ámbito de las ciencias de la complejidad.

Los autómatas celulares complejos o de conducta compleja (uno de los tipos de autómatas celulares que se han clasificado, junto con los de punto fijo, los periódicos y los aperiódicos) presentan una evolución temporal difícil de describir: no es regular ni periódica ni aleatoria, sino que presenta aspectos de todos estos tipos de conducta. Su evolución parece oscilar entre el caos y la periodicidad, por lo que puede resultar impredecible. En los autómatas celulares, la conducta compleja se manifiesta en el límite entre el caos y la simplicidad, en el punto de transición entre lo estático y lo caótico, involucra una mezcla de orden y desorden. Los autómatas celulares de tipo complejo aparecen en un espacio que se encuentra «al filo del caos»³². Las organizaciones que se hallan en esa región son

³² El borde o filo (*edge*) del caos es el espacio o estado inmediatamente previo a la entrada del sistema en un estado caótico. En esa situación liminar, no se ha producido aún la ruptura del orden presente en la dinámica del sistema, pero este no se ha precipitado todavía en el estado de desorden o en la disolución a que la pérdida de dicho orden podría conducirle (tiene aún suficiente estabilidad para sostenerse). En esa situación, el sistema muestra una sensibilidad extrema. Según Mitchell Waldrop (1992: 12), el filo del caos es el lugar «donde los componentes de un sistema nunca se quedan en su lugar,

calificadas como «caórdicas», pues están entre el *caos* y el *orden*, consiguen conjugar características propias de esos dos estados. Dichas organizaciones pueden presentar patrones fractales.

En el caso de las redes booleanas aleatorias, si atendemos a los comportamientos que estas manifiestan en función del número de conexiones por elemento, cuando el número de conexiones por elemento es igual a 2 las redes desarrollan un núcleo congelado de nodos inactivos e islas de nodos activos y cambiantes, de modo que oscilan entre orden y caos presentando un comportamiento que no es ni puro desorden ni puro orden. Estas redes tienen a la auto-organización y la criticalidad auto-organizada entre sus propiedades, de modo que se configuran como sistemas complejos.

3.1.4. Complejidad superficial, simplicidad subyacente y reduccionismo

Algunas de las complejidades que presentan determinados sistemas (como la diferencia cualitativa de componentes, la imprevisibilidad, la complicación o el embrollo de muchos componentes) son resultado de una simplicidad subyacente, profunda. En relación a esos aspectos, los sistemas complejos resultan complejos solo «en el nivel fenomenológico», «en la superficie», pero no en el nivel de sus «mecanismos básicos» de construcción, los cuales son sencillos, simples. De manera más precisa, la complejidad meramente fenoménica es resultado de reglas simples, que son las que generan esas propiedades de los sistemas complejos (Pagels 1988: 52-53 y 88-89; Lewin 1992: 25, 27 y 30).

Varias de las herramientas informáticas –como los autómatas celulares– utilizadas en las ciencias de la complejidad para simular sistemas complejos muestran cómo conductas y patrones complejos pueden generarse a partir de reglas simples:

«La hipótesis fundamental por detrás de la simulación de sistemas complejos es que la aparente complejidad del sistema que uno

pero tampoco se disuelven en la turbulencia. El filo del caos es donde la vida tiene suficiente estabilidad para sostenerse a sí misma, y suficiente creatividad para merecer el nombre de vida». Hay autores que identifican el filo del caos con la idea de orden implicado de David Bohm. El orden implicado supone un encuentro entre el orden y el desorden.

está tratando de modelar se debe a unos pocos componentes simples que interactúan de acuerdo con reglas también simples, luego incorporadas al programa. En cierto sentido, la complejidad de algunos sistemas, si bien suficientemente real, en realidad tiene una explicación simple. Para ser eficaz, el modelo de computación debe emplear un programa más sencillo que el sistema que está modelando. Caso contrario, uno estará procurando imitar ciegamente el sistema en un ordenador, sin alcanzar comprensión alguna»(Pagels 1988: 88).

En virtud de esa simplicidad subyacente, Pagels (1988: 53) piensa que las ciencias de la complejidad presuponen la validez del «enfoque reduccionista», de manera que procuran «demostrar de qué modo puede surgir una conducta compleja a partir de elementos simples».

No obstante, en el ámbito de las ciencias de la complejidad encontramos planteamientos reduccionistas más matizados. Es el caso, por ejemplo, de Murray Gell-Mann, quien opina que en el Instituto de Santa Fe no se concede importancia al estudio de los niveles superiores en sus especificidades, con lo que se peca de un «exceso de reduccionismo» (Gell-Mann 1994: 138).

Este premio Nobel entiende el reduccionismo como la explicación de un determinado nivel superior de la realidad (química, biología, psicología...) en términos del nivel inferior (física, fisicoquímica, neurobiología...). Los niveles de realidad superiores (por ejemplo, la química con respecto a la física, la vida con respecto a la fisicoquímica) surgen y se fundamentan en los niveles inferiores (las fuerzas químicas en las leyes de la física, la vida en las leyes fisicoquímicas), de manera que no existen en los niveles superiores fuerzas especiales (químicas o vitales) que no tengan su origen en las fuerzas y leyes del nivel inferior (Gell-Mann 1994: 130-131)³³. Debido a lo anterior, sería posible, en principio y en teoría, explicar el nivel superior en términos del inferior. Ahora bien, *siempre y cuando* se aporte información específica adicional relativa a las condiciones particulares que permiten la existencia de los niveles superiores.

³³ Así entendido el reduccionismo, Gell-Mann (1994: 134-135) se define como reduccionista en relación a la problemática mente/cerebro; en este caso, entiende el anti-reduccionismo como la creencia en la existencia de «fuerzas mentales» de origen no biológico y, en última instancia, de origen no fisicoquímico.

Sin esa información adicional, la reducción resultaría incompleta (Gell-Mann 1994: 130-132). Así, por ejemplo, la reducción de la cultura a la psicología, es decir, la explicación de los rasgos culturales de una sociedad mediante «los rasgos generales de los seres humanos individuales», descuida el hecho de que existe «una información adicional» específicamente sociocultural (tradiciones, costumbres, leyes y mitos grupales...), resultado de la experiencia compartida de muchas generaciones, que es necesario considerar e integrar en la explicación (Gell-Mann 1994: 311).

Las ciencias que se ocupan de niveles superiores (química, biología) precisan, para explicar los fenómenos propios (fenómenos químicos, fenómenos biológicos), no solo de las leyes del nivel inferior, sino también de información adicional relativa a su nivel específico (Gell-Mann 1994: 130-132). Por ello, a pesar del reduccionismo, sigue siendo valioso y provechoso estudiar cada nivel en su especificidad. El exceso de reducción «sacrifica las valiosas intuiciones que pueden obtenerse estudiando el fenómeno en su propio nivel» (Gell-Mann 1994: 311). Además, resulta fundamental construir escaleras o puentes entre los distintos niveles, que permitan pasar tanto de los niveles inferiores a los superiores como de estos a aquellos.

3.1.5. No linealidad, emergencia y auto-organización

La no linealidad y la emergencia son consideradas en las ciencias de la complejidad como dos de las características principales de los sistemas complejos. Los sistemas complejos son sistemas no lineales (Pagels 1988: 51). En estos sistemas, las interacciones locales entre sus componentes producen un orden global emergente, es decir, propiedades globales «que no se podía[n] haber predicho a partir de lo que se sabía de las partes componentes» (por ejemplo, la estabilidad de un ecosistema como resultado de las interacciones que mantienen las especies que lo pueblan y constituyen; la conciencia como resultado de las interacciones entre neuronas). Además, esas propiedades globales emergentes influyen sobre el comportamiento de los componentes que las generan (Chris Langton, en Lewin 1992: 26).

Por lo que a la auto-organización se refiere, esta es una categoría nuclear en las teorías de Stuart Kauffman sobre el origen de la vida, la evolución de las especies y la constitución del orden biológico. Kauffman entiende la vida como una propiedad colectiva emergente, resultado del sistema de interacciones entre moléculas de ADN. En su opinión, las mutaciones genéticas azarosas y la selección natural, los dos principales mecanismos mediante los cuales explica la evolución de las especies la teoría sintética o neodarwiniana, no son suficientes para explicar dicha evolución ni para comprender la conformación del orden biológico. A su juicio, a esos dos principios hay que añadir la auto-organización como «una propiedad natural de los sistemas genéticos complejos», merced a la cual en los sistemas complejos pueden generarse cristalizaciones espontáneas de orden, «orden gratis» (Kauffman, en Lewin 1992: 39). Para explicar el orden biológico hay que considerar la acción conjunta de esos tres principios (selección natural, mutaciones azarosas y auto-organización).

La auto-organización se encuentra también presente en la idea de criticalidad auto-organizada de Per Bak. Un sistema muestra criticalidad auto-organizada cuando alcanza un punto crítico (un punto en el cual cambia radicalmente su conducta o su estructura), no por causa de un factor de control exterior, sino como resultado de su propia dinámica interna (de la interacción entre sus componentes). Cuando un sistema se encuentra en un estado crítico, es su estado interno el que determina la magnitud de la influencia que las incidencias externas puedan tener sobre el sistema. El comportamiento de un sistema crítico obedece a una distribución de ley de potencia (*power-law*). Per Bak y Tamás Vicsek han vinculado la criticalidad auto-organizada con la geometría fractal.

3.2. Sistemas Complejos Adaptativos (SCA)

La noción de SCA y los desarrollos teóricos a los que ha dado lugar constituyen dos elementos fundamentales de las actuales ciencias de la complejidad y del estudio de los sistemas complejos, en particular del modo como esas ciencias y dicho estudio se han desarrollado por parte de los científicos vinculados al *Santa Fe Institute*. Para exponer la noción de SCA y sus desarrollos teóricos

fundamentales, me valdré de las exposiciones que sobre los mismos incluye Murray Gell-Mann en su libro *El quark y el jaguar. Aventuras de lo simple y lo complejo* (1994) y desarrolla John Holland en su obra *El orden oculto. De cómo la adaptación crea complejidad* (1995)³⁴.

3.2.1. Algunos ejemplos ilustrativos de SCA

En las ciencias de la complejidad, los SCA se han constituido, de manera expansiva, como categoría nuclear y clave para la comprensión de las realidades biológicas y humanas; los científicos que se valen de la teoría de los SCA consideran que dichas realidades solo pueden ser conceptuadas y comprendidas adecuadamente si se las entiende y modela en términos de SCA. De ese modo, una multitud de fenómenos y de procesos biológicos, sociales y culturales de dimensiones e índole muy distintas (el origen de la vida, la evolución biológica, el sistema inmunitario de los animales, el aprendizaje, los procesos mentales, la evolución de las sociedades, el comportamiento de los inversores financieros, determinados programas y equipos informáticos...) han sido conceptuados y analizados como SCA.

Casos o ejemplos de SCA son (véase Gell-Mann 1994: 12-13, 27-28, 36, 68-105, 313): un niño aprendiendo la lengua materna,

³⁴ En el título del libro de Gell-Mann, el quark simboliza las leyes físicas básicas y simples que rigen el universo y la materia, y el jaguar representa la complejidad del mundo que percibimos directamente, en especial cuando esta se manifiesta en los SCA. Holland, por su parte, trata de buscar y establecer los principios generales que rigen el comportamiento de los SCA, con el fin de construir una teoría general de estos. Para ello, recurre a «comparaciones interdisciplinarias», es decir, compara SCA tradicionalmente estudiados por disciplinas distintas, para extraer las características comunes a todos ellos. Merced a esas comparaciones, características difíciles de conocer en los sistemas propios de una disciplina pueden examinarse sin demasiadas dificultades en sistemas de otras. Como resultado de esas comparaciones interdisciplinarias, Holland establece siete características generales, comunes a todos los SCA, que son fundamentales para caracterizar a los SCA y comprenderlos. Esas características básicas consisten en cuatro propiedades (agregación, no linealidad, flujos, diversidad) y tres mecanismos (marbeteado o etiquetado, modelos internos, bloques de construcción). En opinión de Holland, el resto de propiedades y mecanismos que cabe señalar también como comunes a todos los SCA pueden derivarse a partir de combinaciones de esas siete características básicas.

una cepa de bacterias tornándose resistente a un antibiótico, un conjunto de científicos comprendiendo la validez de una teoría, un artista creando, una sociedad adoptando nuevas pautas culturales, un ordenador programado para elaborar nuevas estrategias con las que ganar en un juego, el género humano buscando nuevas maneras de vivir, un empresario planeando una nueva aventura comercial, un cuidador adiestrando a su perro (y el perro en su proceso de adiestramiento), alguien invirtiendo en bolsa, la evolución de las lenguas en el transcurso de siglos o milenios.

Entidades sociales colectivas y organizadas, como una empresa o una tribu, «constituyen sistemas complejos adaptativos en sí mismas» (Gell-Mann 1994: 36). Las economías pueden estudiarse como SCA en evolución (Gell-Mann 1994: 339-344). Para Holland (1995: 57-58) la ciudad de Nueva York puede ser entendida como un SCA. Gell-Mann (1994: 36 y 106) afirma que los seres humanos somos SCA y que la humanidad en su conjunto funciona ya «en un grado considerable» como un SCA.

Finalmente, también los ordenadores pueden funcionar como SCA. En este caso, nos encontramos ante SCA *informáticos*. Las redes neuronales y los algoritmos genéticos constituyen dos ejemplos de esa modalidad de SCA (véase Gell-Mann 1994: 325-344)³⁵. Por tanto, los SCA no pueden equipararse ni reducirse a un conjunto de algoritmos, como desafortunadamente hace Carlos Reynoso³⁶. Cuestión distinta es que, como señala Holland (1995: 109 y 172), la simulación computacional sea necesaria para el estudio de los SCA y para la búsqueda de las leyes que los rigen, ante el carácter intrincado que esos sistemas presentan y la imposibilidad de servirse de experimentos controlados para estudiarlos.

³⁵ Al decir de Gell-Mann (1994: 330), las redes neuronales están inspiradas en «vagas analogías» con el funcionamiento cerebral y los algoritmos genéticos en «vagas analogías» con la evolución biológica.

³⁶ En *Complejidad y caos* Reynoso no ofrece caracterización alguna de los SCA, ni siquiera los define mínimamente. Se limita a señalar varios «formalismos» o algoritmos que actúan como SCA (autómatas celulares, redes booleanas, redes neuronales, algoritmo genético), así como los comportamientos y resultados complejos que son capaces de producir, y pasa a continuación a explicar cada una de esas herramientas informáticas.

3.2.2. Agentes con un sistema de detectores-efectores que procesa información

Los SCA están constituidos, «sin excepción», por un elevado número de elementos activos de distinto tipo, a los que Holland denomina «agentes», que interactúan entre sí; resultan, pues, de las interacciones que mantienen entre sí un elevado número de agentes (Holland 1995: 59 pone como ejemplos de agentes a un anticuerpo, un ser humano y una empresa comercial).

Una característica fundamental de los agentes y por ende de los SCA, como tal común a todos ellos más allá de las peculiaridades de cada tipo, es el hecho de que todos tienen capacidad para procesar, tratar y adquirir información de algún modo, de manera que pueden acumular experiencias y aprender (Gell-Mann 1994: 39).

Los agentes, a través de un conjunto de *detectores*, reciben estímulos, información, del medio ambiente y llevan a cabo una operación de filtrado sobre ese flujo de datos que les llega. Los detectores pueden ser descritos como artificios binarios, como mecanismos que transportan bits de información acerca del medio ambiente³⁷; perciben una determinada propiedad del medio y se activan cuando esa propiedad está presente (cuando no lo está, se desactivan) (Holland 1995: 59-60).

Ante los mensajes (estímulos, informaciones) que les llegan a los agentes de su medio, se activa un conjunto o grupo de *efectores* mediante los cuales los agentes decodifican los mensajes y provocan acciones (Holland 1995: 61).

Holland considera «útil» y «conveniente» considerar y describir tanto el sistema de detectores-efectores como el comportamiento de los agentes, y en última instancia a los SCA, en términos de reglas, como determinados por un conjunto de reglas del tipo sí/

³⁷ Al describir así, como detectores binarios, la manera en que los agentes de un SCA filtran la información proveniente del medio ambiente, Holland no pretende afirmar que todos los agentes dispongan realmente de ese tipo de detectores. Lo que defiende es que esa descripción es útil y válida en el modelado de los agentes.

entonces³⁸. El sistema de detectores-efectores puede ser descrito mediante la siguiente regla: si hay un mensaje de la clase correcta, entonces envíe un mensaje específico. Por su parte, el agente puede ser descrito como un conjunto de reglas de mensaje/procesamiento, las cuales pueden ser de distinto tipo: reglas que actúan sobre los mensajes captados por el detector, reglas que envían mensajes que activan otras reglas, reglas que actúan sobre mensajes enviados por otras reglas, reglas que envían mensajes que actúan sobre el medio ambiente a través de los efectores del agente (Holland 1995: 61-62).

Por otro lado, con el fin de posibilitar el modelado de un agente en una computadora, Holland (1995: 62-65) considera útil entender todos los mensajes como cadenas o secuencias binarias de unos y ceros, como secuencias de información binaria, y entender las reglas como si fuesen instrucciones que se dan a una computadora, como un programa que determina el comportamiento del agente.

3.2.3. Agregación, no linealidades, redes de nodos-conectores y marbeteado

La agregación es otra de las características fundamentales de los SCA. Los agentes tienen capacidad para agregar interacciones y para agregarse (vincularse, constituir conjuntos) entre sí. Las interacciones que los SCA establecen son tanto de competencia como de cooperación. A menudo les resulta beneficioso cooperar y unirse para constituir entidades colectivas de orden superior que funcionan, a su vez, como un nuevo SCA (Gell-Mann 1994: 260).

Las interacciones agregadas dan lugar a la emergencia o aparición de comportamientos más complejos que los que muestran los agentes por separado, es decir a comportamientos del SCA que resultan más complejos de lo que en un principio hubiese podido

³⁸ Este tipo de reglas se llaman reglas de estímulo-respuesta en psicología (si estímulo, entonces respuesta) y reglas de condición-acción en inteligencia artificial (si alguna condición es cierta, entonces realice tal acción). Con su caracterización del comportamiento de los agentes en función de reglas si/entonces, Holland no pretende afirmar que esas reglas pueden localizarse realmente en los agentes. Para él, se trata solo de «una manera conveniente de describir las estrategias de los agentes» (Holland 1995: 23), de un modelo apropiado para describir el comportamiento de los agentes.

preverse a partir de la suma simple de los comportamientos de los agentes (partes) que los componen (Holland 1995: 21 y 38). De ese modo, en los SCA «hay abundancia de no-linealidades» (Holland 1995: 21).

Los agentes agregados (conjuntados mediante interacciones) pueden actuar como «meta-agentes» y estos, a su vez, pueden agregarse entre sí para producir «meta-meta-agentes». Ese proceso de agregación de agentes para constituir meta-agentes de distintos niveles da lugar a la constitución de organizaciones jerárquicas (Holland 1995: 27). Los agentes agregados pueden especializarse en la realización de distintas tareas e intercambiar de manera apropiada sus recursos. De ese modo, el agregado y los agentes resultan más eficientes (Holland 1995: 129).

Merced a las interacciones que establecen entre sí sus agentes, en los SCA se tejen redes de nodos y conectores a través de las cuales circulan flujos de recursos (ejemplos de la tríada nodo, conector, recurso son: en el sistema nervioso central, las células nerviosas, las interconexiones entre estas y los impulsos nerviosos; en la red de Internet, las estaciones de cómputo, los cables y los mensajes). En términos generales, los nodos actúan como procesadores y los conectores determinan las interacciones posibles. Las redes tejidas y los flujos que circulan por ellas cambian con el tiempo y en función del proceso de adaptación (Holland 1995: 38-39).

Las redes de flujos son capaces de generar dos tipos de efectos: un efecto multiplicador y un efecto reciclante. El primer efecto consiste en el paso de un nodo a otro de un recurso introducido en una red de flujos, transformándose dicho recurso a lo largo del recorrido y produciendo una cadena de cambios. El segundo, supone el establecimiento de ciclos en las redes, los cuales permiten producir más recursos en cada nodo con la misma cantidad de materia prima básica disponible (Holland 1995: 39-42).

Por otra parte, los SCA muestran capacidad de marbeteado, capacidad para asignar marbetes o etiquetas y para identificar por marbetes. Los marbetes permiten a los SCA distinguir propiedades, objetos o aspectos de la realidad que sin etiquetado resultarían indistinguibles. Mediante el marbeteado se operan rupturas

de simetría, esto es, se establecen diferencias distintivas en elementos o propiedades que antes del mismo mostraban simetría y resultaban indistinguibles. El marbeteado facilita a los agentes la identificación y selección de otros agentes con los que asociarse y constituir meta-agentes; es decir, facilita la formación de agregados y de organizaciones jerárquicas. Los marbetes se encuentran también en las reglas y desempeñan un papel importante en el acoplamiento de las reglas. Se encuentran sujetos a los mismos procesos selectivos que las reglas (Holland 1995: 28-30 y 105).

3.2.4. Elaboración y aplicación de esquemas

Otra de las propiedades de los SCA es la capacidad que estos muestran tanto para elaborar esquemas (en términos de Gell-Mann) o modelos internos (en términos de Holland) como para servirse de estos con el fin de predecir lo que puede ocurrir en su ambiente y de anticiparse a ello³⁹.

Los modelos internos (los esquemas) están constituidos por regularidades o patrones, son paquetes comprimidos de información aplicables a muchos casos particulares, e incluyen reglas que gobiernan el cuerpo de experiencia. Combinan reglas generales o genéricas y reglas específicas. Las reglas genéricas son más fáciles de establecer que las específicas y son utilizadas cuando se carece de información detallada. Las reglas específicas establecen excepciones a la regla genérica, en función de las especificidades que la situación ambiental puede presentar; para descubrirlas y establecerlas se requiere de más tiempo. Los agentes dependen en principio de reglas genéricas y, conforme acumulan experiencia, van estableciendo reglas de excepción (Holland 1995: 72-73).

³⁹ Con la expresión «modelo interno» Holland se refiere prácticamente al mismo mecanismo de anticipación que Gell-Mann nombra con el término «esquema». Holland prefiere la expresión «modelo interno» al término «esquema» para evitar posibles confusiones con el significado que este último vocablo tiene en los algoritmos genéticos, donde también se utiliza. Por otra parte, algunos SCA, como es el caso de los seres humanos, tienen capacidad y disponen de medios para elaborar también modelos externos, de los que igualmente se sirven para predecir posibles situaciones (Holland 1995: 48). «En el caso de las sociedades humanas», manifiesta Gell-Mann (en Lewin 1992: 29), «los esquemas son las instituciones, las costumbres, las tradiciones y los mitos, que constituyen, en realidad, formas de ADN cultura».

¿Cómo elaboran los SCA los esquemas? Los constituyen a partir del torrente de información que reciben, eliminando detalles de esa información y seleccionando patrones de la misma. La información llega al SCA en forma de un flujo de datos. De ese flujo de datos, el SCA extrae regularidades –que separa de lo incidental, arbitrario o aleatorio– y condensa, comprime, esas regularidades extraídas en un esquema.

Para identificar regularidades dentro de una sucesión de datos de entrada, los SCA fragmentan esa sucesión de datos en varias partes comparables entre sí e indagan sus rasgos comunes, compartidos. Obtienen, así, «información neutra», información común a muchas partes, de la que se valdrán luego para identificar regularidades (Gell-Mann 1994: 75). Una vez identificadas determinadas regularidades, los SCA elaboran una descripción de las mismas.

El esquema puede ser parcial o completo; será parcial si solo incluye un determinado tipo de regularidades y pretermite otras existentes (Gell-Mann 1994: 72). Holland (1995: 48-49) distingue dos clases de modelos internos: tácitos y manifiestos. Los modelos internos tácitos se basan en predicciones implícitas de algún estado futuro deseado. Por su parte, los modelos internos manifiestos se utilizan como base para exploraciones explícitas de alternativas (proceso de *lookahead*, de «mirar hacia delante»).

Los SCA, en el proceso de recepción de un flujo de datos, identificación de regularidades en ese flujo y compresión de dichas regularidades en esquemas, pueden cometer dos clases de errores. Pueden confundir aleatoriedad con regularidad, percibir un orden donde de hecho no existe; y confundir regularidad con aleatoriedad, no captar regularidades que de hecho existen. Los SCA cometen con facilidad esas dos clases de errores, muestran «una tendencia a errar» en el proceso de identificación de regularidades en el flujo de datos que reciben. Existen presiones selectivas (como el alivio de temores, los intereses de los poderosos y la consolidación de vínculos sociales, en el caso de los seres humanos) que favorecen las distorsiones en el proceso de identificación de regularidades y la presuposición de falsas regularidades⁴⁰. Al imponer regularidades

⁴⁰ Gell-Mann (1994: 294-295) piensa que, en el caso de los seres humanos, la superstición es una modalidad de error del primer tipo y la negación de

falsas y negar regularidades reales, los SCA tienden a evolucionar hacia situaciones de equilibrio relativo en las que la correcta identificación de regularidades y aleatoriedades está acompañada de ambos tipos de yerros (Gell-Mann 1994: 294-296).

Los SCA aplican los esquemas construidos al mundo real. Se valen de ellos para describir el mundo (incluido dentro de este el comportamiento de otros SCA o de otros agentes), para reaccionar ante el mismo y para interactuar con otros SCA; predicen el futuro, generan anticipaciones y orientan sus comportamientos en base a los esquemas previamente elaborados (Gell-Mann 1994: 86-87; Holland 1995: 47 y 107).

¿Cómo aplican los esquemas los agentes y, por ende, los SCA? Para aplicarse, los esquemas deben desplegarse, es decir, deben complementarse con información detallada sobre el caso concreto o la situación particular que se enfrenta. El SCA obtiene del flujo de datos información adicional, combina esa información con los esquemas que ha configurado y genera, así, un resultado aplicable al mundo real (una descripción de un sistema observado, la predicción de algún suceso, la prescripción del comportamiento del propio SCA, etc.) (Gell-Mann 1994: 40).

Por otra parte, hemos visto que los SCA configuran esquemas o modelos internos a partir de situaciones específicas. Pero los SCA tienen que enfrentarse a situaciones novedosas, así como a situaciones conocidas –en relación a las cuales han configurado

la realidad una modalidad de error del segundo tipo, y señala que los seres humanos –y quizás también otros SCA inteligentes– son «proclives a una mezcla de superstición y negación de la realidad». Cree, además, que ambas reacciones son consecuencia de determinados miedos. En el caso de la superstición, el miedo de las personas a lo impredecible, a lo incontrolable, a la incertidumbre, las induce a imponer «un orden artificial basado en falsos principios de causalidad», el cual les proporciona una ilusión de predecibilidad y una fantasía de manipulación y dominio del mundo. Por lo que a la negación de la realidad se refiere, las personas captan regularidades, como la certeza de la muerte, que les causan pánico, y para aliviar esa ansiedad niegan su existencia, inventan creencias que la niegan. Superstición y negación de la realidad están relacionadas, se implican y refuerzan mutuamente. Las creencias fruto de la negación de la realidad suelen incluir regularidades inventadas, supersticiones; y las supersticiones solo pueden mantenerse negando sus frecuentes e inevitables fracasos, esto es, negando regularidades reales.

ya esquemas o modelos– que, cuando reaparecen, presentan variaciones en algunos aspectos, elementos novedosos.

Para enfrentar esta dificultad, los SCA (sus agentes) descomponen la situación en varias partes y extraen de su repertorio de modelos o esquemas los bloques (las reglas) que pueden relacionar con la situación, combinan esos bloques y los utilizan para responder a la situación y para construir nuevos modelos internos (Holland 1995: 50-53 y 67-68)⁴¹.

Los esquemas y los bloques de construcción más complicados están formados generalmente por esquemas que resultan de combinaciones de esquemas o bloques de construcción más simples y usados con anterioridad. Bloques de construcción de un nivel se combinan para formar bloques de construcción del siguiente nivel (Holland 1995: 90).

3.2.5. Adaptación y evolución en ambientes entre el orden y el desorden

Los SCA, mediante los procesos de aprendizaje y acumulación de experiencias de los que son capaces (procesos que suponen cambios en las reglas que rigen su comportamiento) muestran capacidad de adaptación a su medio ambiente⁴², capacidad para hacer un mejor uso del medio con el fin de alcanzar sus objetivos.

La aplicación de modelos o esquemas a las situaciones que los SCA han de enfrentar puede tener consecuencias positivas o negativas para estos, puede favorecer o entorpecer la pervivencia

⁴¹ Holland (1995: 80-83) se sirve de la genética (evolución de los genes individuales, con sus alelos alternativos, sobre un cromosoma) como «metáfora» para conceptualizar y explicar la generación de reglas mediante bloques de construcción. Igualmente, recurre a una metáfora, a la «metáfora del paisaje», para analizar las relaciones entre esquemas. En este segundo caso, Holland hace equivaler el valor promedio de cada esquema a –lo representa como– la altura del paisaje en un determinado punto; las colinas más altas equivaldrían a los esquemas de mayor valor.

⁴² El medio ambiente de un agente adaptativo está constituido en gran parte por otros agentes adaptativos, de manera que varios de los esfuerzos de adaptación de cualquier agente están destinados a su adaptación a otros agentes.

y el desarrollo de dichos sistemas. Un modelo interno es efectivo si las predicciones que produce y las acciones que anticipa garantizan o incrementan las oportunidades de adaptación y de supervivencia de los agentes.

De ese modo, en el proceso de adaptación del SCA al medio, los esquemas y las reglas, al ser aplicados al mundo real –y en especial a situaciones nuevas o con elementos novedosos–, se van poniendo a prueba, son contrastados con el mundo real, el cual ejerce una presión selectiva, un efecto selectivo, sobre los esquemas en competencia. Los esquemas y las reglas eficaces, que producen acciones exitosas y favorecen la adaptación del SCA al medio, reciben una asignación de crédito y son seleccionados; mientras que los esquemas y las reglas ineficientes, que producen resultados negativos, quedan desacreditados y terminan por ser eliminados, por desaparecer (Gell-Mann 1994: 40-41 y 49-50, Holland 1995: 68-72). Así, pues, los esquemas (modelos, reglas) no son fijos, sino que evolucionan, están sujetos a selección y variación en función de la experiencia que los SCA (sus agentes) adquieren, de lo que son capaces de aprender de sus aciertos y fallos (Gell-Mann 1995: 90).

Según Gell-Mann (1995: 134 y 138), los SCA solo pueden existir, funcionar y evolucionar en ambientes en los que prevalecen condiciones o situaciones intermedias entre el orden y el desorden, en los que existe una mezcla de regularidad y aleatoriedad. Los SCA tienden a situarse en una zona de transición entre el orden y el desorden, la cual recibe a veces la denominación, «más bien metafórica», de «límite del caos» (Gell-Mann 1994: 393). Es en esa zona donde los SCA mejor funcionan y mejor pueden evolucionar (Gell-Mann 1994: 184 y 267-268).

En esos ambientes que presentan un régimen intermedio entre el orden y el desorden, los SCA pueden explotar regularidades (orden, determinismo) y al mismo tiempo aprovechar las indeterminaciones (describibles como ruido, incertidumbre, fluctuaciones, azar, aleatoriedad y términos similares) para buscar esquemas mejores (Gell-Mann 1994: 388). El «ruido», entendido como «un movimiento aleatorio» que se superpone a la tendencia adaptativa del sistema, ofrece al sistema la posibilidad de encaminarse hacia situaciones

de mayor adaptación. En términos de la teoría de los «relieves adaptativos» de la que Gell-Mann se vale⁴³, el ruido permite al sistema no quedar atrapado en el fondo de una depresión poco profunda, salir de una cuenca de atracción, explorar otras cuencas de atracción, escapar de una depresión somera y dirigirse hacia depresiones vecinas más profundas (Gell-Mann 1994: 285-286).

Las continuas adaptaciones que llevan a cabo los SCA producen diversidad, la aparición de nuevos agentes, de agentes que pueden presentar diferencias con los agentes extintos y con los ya existentes (Holland 1995: 42-46, Gell-Mann 1994: 37-38). De ese modo, los SCA muestran «una tendencia» a originar nuevos SCA (Gell-Mann 1994: 388).

Los SCA pueden tener una mayor o menor complejidad potencial, es decir, una mayor o menor probabilidad de evolucionar hacia sistemas de mayor complejidad. En los medios en que la complejidad supone ventajas, se producirán presiones selectivas favorecedoras de la aparición de organismos cada vez más complejos (Gell-Mann 1994: 263 y 389).

3.2.6. Tres componentes principales y comparaciones «interesantes»

Como síntesis y conclusión, podemos decir que los SCA y los agentes adaptables que los constituyen son representados, en particular por parte de Holland (1995: 102), mediante la conjunción de tres componentes principales. Uno, un sistema de desempeño que especifica las habilidades del agente, constituido a su vez por tres elementos básicos: 1) un conjunto de detectores, que representan la habilidad del agente para extraer información del medio; 2) un conjunto de reglas si/entonces, relacionadas con la capacidad del agente para procesar información internamente; 3) un conjunto de efectores, que representan la capacidad del agente para actuar sobre el medio. Dos, un algoritmo de asignación de crédito. Y tres, un algoritmo para el descubrimiento de reglas.

⁴³ Gell-Mann (1994: 388) emplea la idea de relieve adaptativo «como metáfora».

El carácter abstracto y general de esa representación de los agentes adaptables y por ende de los SCA permite describir de manera uniforme la capacidad de cualquier agente o de cualquier SCA para procesar información y modelar en una computadora dicha capacidad. De ese modo, pueden compararse agentes adaptables de clases muy diferentes con el fin de entender unos a la luz de otros y de obtener principios comunes que nos ilustren sobre los SCA.

Para mostrar lo que pueden dar de sí esas «interesantes comparaciones», Holland (1995: 105-106) compara la ciudad de Nueva York con un embrión (como «contraparte metafórica» de esa ciudad):

«Si pudiéramos mirar los orígenes de Nueva York, hace cuatro siglos, y hacer los cambios apropiados en la escala del tiempo, el crecimiento de la ciudad mostraría algunas similitudes con el crecimiento de un embrión. Ambos empiezan a partir de una semilla relativamente simple. Ambos progresan y cambian. Ambos desarrollan límites internos entre sus componentes o subestructuras y al mismo tiempo crean progresivamente una infraestructura más complicada para las comunicaciones y el transporte de los recursos. Ambos se adaptan a los cambios internos y externos, reteniendo la coherencia y al mismo tiempo manteniendo sus funciones críticas dentro de rangos estrechos. Y, apuntalándolo todo, ambos consisten en grandes números de agentes adaptables (en un caso, varias clases de empresas e individuos, y en el otro, una gran variedad de células biológicas)».

Aunque el presente texto tiene una finalidad netamente expositiva, no me resisto a hacer aquí una breve apreciación sobre estas «interesantes comparaciones». A mí me parecen poco o nada interesantes. Debido a su elevada generalidad, la información que nos permiten obtener y que nos aportan, tanto sobre el desarrollo de la ciudad de Nueva York como sobre el desarrollo del embrión, es trivial y de escaso o nulo valor informativo.

Reflexiones finales a modo de conclusión

Para concluir este texto quiero hacer un par de reflexiones: una sobre el concepto de complejidad y su constelación semántica, y otra sobre las teorías de la complejidad, en particular sobre las diferenciaciones que algunos analistas han establecido entre las dos grandes líneas de teorías de la complejidad que hoy existen.

Como vimos, en la conceptualización realizada por Weaver la complejidad refiere sustancialmente al número de componentes de un sistema; el significado del término complejidad es de carácter cuantitativo. Los sistemas simples son sistemas con pocos o muy pocos componentes. En contraposición, los sistemas complejos son sistemas con muchos o muchísimos elementos. Complejidad es numerosidad.

En el marco de la cibernética (Ashby) también se utilizó la noción de complejidad como numerosidad (cantidad de variables). Y también los conceptos de complejidad elaborados por las ciencias de la computación (complejidad computacional, complejidad algorítmica) presentan un marcado carácter cuantitativo (mayor o menor longitud de las fórmulas que procuran una descripción adecuada de un sistema o de las series de instrucciones que permiten reproducir un sistema, mayor o menor tiempo necesario para la resolución de un problema).

Yerra, pues, Carlos Reynoso (2006: 20) cuando asevera que «la complejidad» nada tiene que ver con la numerosidad. Desde el principio, desde Warren Weaver, la complejidad tiene que ver con la numerosidad (número o cantidad de componentes de un sistema). La «superabundancia de variables» en modo alguno forma parte de la simplicidad, como Reynoso (2006: 16-17) asevera. Desde los orígenes de los usos científicos del término complejidad, desde Weaver, la simplicidad se caracteriza, entre otros rasgos, por la presencia de un número escaso o muy limitado de variables, no por la muchedumbre de estas.

Al margen de esto, me parece de bastante interés no perder de vista que para Weaver lo importante no era la complejidad (el hecho de que los sistemas complejos organizados fuesen sistemas con

un mayor número de componentes que los que tienen los sistemas simples), sino la organización. En la conceptualización de Weaver, la articulación de componentes (relaciones, interacciones) no forma parte de la idea de complejidad, sino de la idea de organización.

No obstante, el hecho de que la interrelación entre componentes de un sistema fuese considerada como una característica de los sistemas complejos orientó el calificativo *complejo* hacia los conceptos de sistema y de organización. Ashby, por ejemplo, caracterizó a los sistemas complejos mediante dos rasgos: son sistemas con muchos elementos (complejidad como numerosidad) y muy interconectados. Este último rasgo entronca con el significado etimológico de complejidad como *complexus* (tejido junto), mediante el cual el significado de complejidad (como tejido de elementos diversos) se conecta con las ideas de sistema y organización.

De ese modo, a través de esas conexiones semánticas, las ideas de complejidad, organización y sistema se van a ligar, hasta el punto de que en determinados autores y planteamientos al hablar de complejidad se da por sobreentendido que se trata de la complejidad organizada y de sistemas complejos.

Al ser entendida como todo orgánico, la organización se vincula con el concepto de sistema y, a través de este, con la categoría de relación, la idea de emergencia, la problemática de la no linealidad y las limitaciones de los procedimientos analíticos y mecanicistas. Vimos cómo, según Bertalanffy, las interacciones «fuertes» y la no linealidad limitan las posibilidades operativas de los procedimientos analíticos.

El solapamiento de significados entre complejidad y organización está en la base de algunas de las afirmaciones paradójicas que se defienden en las ciencias de la complejidad, como la tesis de que los sistemas simples (con un pequeño número de componentes, regidos por reglas sencillas) pueden generar comportamientos complejos (emergencia, auto-organización, no linealidad, caos, fractalidad).

En el marco conceptual de Weaver (simplicidad, complejidad desorganizada, complejidad organizada) esa afirmación sería

incorrecta. En ese marco, lo que quizás cabría decir es que los sistemas simples pueden generar comportamientos organizados. El reto, entonces, así planteada la cuestión, no sería ya el de la complejidad organizada, sino quizás el de la simplicidad organizada (o mejor: *organizante* u organizadora). Sea como sea, lo cierto es que al final de este replanteamiento la organización vuelve a situarse en el centro de la constelación conceptual.

Por otra parte, la complejidad presenta *ab origine* (desde Weaver), en el ámbito científico, dos modalidades: complejidad desorganizada y complejidad organizada. Constituye por ello un error reducir la complejidad solo a complejidad organizada, como hace Reynoso (2006: 179, 309 y 374), para quien «la complejidad» nada tiene que ver con la desorganización ni, en consecuencia, con los conceptos asociados a esta (desorden, azar, aleatoriedad). Pero, contrariamente a lo que Reynoso asevera, la complejidad (número grande o muy grande de variables) puede estar organizada o desorganizada; los sistemas complejos (con un número grande o elevadísimo de componentes) pueden estar organizados o desorganizados. La problemática de la desorganización (de las situaciones que presentan un número muy elevado de variables con comportamientos individuales erráticos) es *ab initio* uno de los aspectos que puede presentar la complejidad. Cuestión distinta es que, como el mismo Weaver señaló, la complejidad organizada sea la que plantea el mayor reto e interés para la ciencia. Pero reducir «la complejidad» a complejidad organizada es, sencillamente, desconocer la historia del concepto de complejidad.

Como hemos visto, la separación originaria entre dos modalidades de complejidad, entre desorganización y organización, deja de ser estricta posteriormente, con los autores y los planteamientos teóricos que ubican la complejidad y los sistemas complejos en la relación entre organización y desorganización, orden y desorden, determinismo y aleatoriedad. A los dos conceptos de complejidad originarios (desorganizada y organizada) viene así a sumarse un tercero, una complejidad que resulta de (o en) la interacción entre desorganización y organización, la presencia conjunta de determinismo y aleatoriedad, la mezcla de orden y desorden.

Paso seguidamente, para finalizar, a la segunda reflexión que deseo hacer, esta relativa al modo de diferenciar las teorías de la complejidad existentes.

Algunos autores, de los que Reynoso (2006) es un claro exponente, dibujan un panorama de las teorías de la complejidad dividido de manera dicotómica entre unas ciencias de la complejidad basadas en exclusiva en algoritmos aplicables a escenarios empíricos⁴⁴ y, en las antípodas de dichas ciencias, unas teorías –como la de Morin– compuestas solo mediante generalizaciones discursivas y que, debido a su gran abstracción, no pueden ser utilizadas para comprender problemas concretos.

En mi opinión, esa dicotomía es falsa. Como el lector habrá tenido ocasión de comprobar, las ciencias de la complejidad no están exentas de abstracciones ni sus teorías se hallan libres de metáforas y analogías. Como he tenido ocasión de poner de manifiesto en el texto, los mismos científicos reconocen de manera explícita el carácter metafórico de los términos que introducen en sus análisis y explicaciones. Por su parte, las teorías discursivas no carecen de rigor conceptual y han sido utilizadas, puestas en acción, en estudios e investigaciones empíricas.

Bibliografía

ALHADEFF-JONES, Michel (2008), «Three Generatios of Complexity Theories: Nuances and Ambiguities», *Educational Philosophy and Theory* 40/1, pp. 66-82.

ANDERSON, Philip (1972), «More is Different», *Science* 177, pp. 393-396.

ASHBY, W. Ross (1956), *Introducción a la cibernética*, Buenos Aires, Nueva Visión, 1977.

⁴⁴ Como ya señalé, Reynoso (2006) reduce los SCA a un conjunto de «formalismos» o algoritmos y no ofrece ninguna caracterización de los SCA. Vemos ahora cómo esa sesgada reducción de los SCA resulta funcional a su pretensión de presentar unas ciencias de la complejidad exclusivamente algorítmicas, libres de metáforas y al margen de la discursividad.

ATLAN, Henri (1970), «Rôle positif du bruit en théorie de l'information appliquée à une définition de l'organisation biologique», *Annales de physiologie biologique et médicale* 1, pp. 15-33.

— (1972), *L'Organisation biologique et la Théorie de l'information*, París, Hermann.

— (1972), «Du bruit come principe d'auto-organisation», *Communications* 18, pp. 21-35.

BACHELARD, Gastón (1934), *Le Nouvel Esprit Scientifique*, París, PUF, 2003.

BAK, Per (1996), *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*, Nueva York, Springer Verlag.

BAK, Per y CHEN, K. (1991), «Self-Organized Criticality, *Scientific American*, pp. 46-53.

BEER, S. (1959), *Cybernetics and Management*, Londres, English University Press.

BERTALANFFY, Ludwig von (1968), *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*, México D. F., FCE, 1986.

CAPRA, Fritjof (1996), *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*, Barcelona, Anagrama, 1998.

CHURCHMAN, C. W. (1968), *The Systems Approach*, Dell, Nueva York.

CHURCHMAN, C. W., ACKOFF, R. L. y ARNOFF, E. L. (1957), *Introduction to Operations Research*, Nueva York, Wiley.

FOERSTER, Heinz von (1960), «On self-organizing systems and their environment», en M. C. Yovitz & S. Cameron (ed.), *Self-organizing System*, Nueva York, Pergamon, pp. 31-50.

FOERSTER, H. von (ed.) (1974), *Cybernetics of Cybernetics, or the Control of Control and the Communication of Communication*, Urbana (Illinois), Biological Computer Laboratory University of Illinois.

FOERSTER, H. von y ZOPF, G. W. (eds.) (1962), *Principles of Self-Organization*, Nueva York, Pergamon Press.

FORRESTER, J. (1961), *Industrial Dynamics*, Cambridge (MA), MIT Press.

GELL-MANN, Murray (1994), *El quark y el jaguar. Aventuras de lo simple y lo complejo*, Barcelona, Tusquets, 1995.

GLANSDORFF, P. y PRIGOGINE, Y. (1971), *Structure, Stabilité et Fluctuations*, París, Masson.

HOLLAND, John H. (1995), *El orden oculto. De cómo la adaptación crea complejidad*, México D. F., FCE, 2004.

- KAUFFMAN, Stuart (1993), *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press.
- (1995), *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press, New York.
- (2000), *Investigaciones. Complejidad, autoorganización y nuevas leyes para una biología general*, Barcelona, Tusquets, 2003.
- LANGTON, C. G. (ed.), (1997), *Artificial Life: The proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems*, Redwood City, Addison-Wesley.
- LAUGHLIN, Robert B. (2005), *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia*, Buenos Aires, Katz, 2007.
- LE MOIGNE, Jean-Louis (1979/1984), *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*, París, PUF.
- (1990), *La modélisation des systèmes complexes*, París, Dunod.
- (1996), «Complejité», en D. Lecourt (ed.), *Dictionnaire d'Histoire et Philosophie des Sciences*, París, PUF, pp. 205-215.
- LEWIN, Roger (1992), *Complejidad. El caos como generador de orden*, Barcelona, Tusquets, 1995.
- LUHMANN, Niklas (1968), *Fin y racionalidad en los sistemas*, Madrid, Editora Nacional, 1983
- (1974), *Sistema jurídico y dogmática jurídica*, Madrid, Centro de Estudios Constitucionales, 1983.
- (1976), «Komplexität», *Historisches Wörterbuch der Philosophie* 4, pp. 939-941.
- (1978), «Temporalization of Complexity», en G. Geyer y J. Zounein (eds.), *Sociocibernetics* 2, pp. 95-111.
- (1980), «Komplexität», en G. Grochla (ed.), *Handwörterbuch der Organisation*, pp. 1064-1070.
- (1996), *Introducción a la teoría de sistemas*, México D.F., Universidad Iberoamericana/Anthropos.
- MANDELBROT, Benoît (1975/1984), *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*, Barcelona, Tusquets, 2006.
- MARRO, Joaquín (2008), *Física y vida. De las relaciones entre física, naturaleza y sociedad*, Barcelona, Crítica.
- MATURANA, Humberto y VALERA, Francisco (1972), *Autopoietic systems*, Santiago de Chile, Facultad de Ciencias de la Universidad de Santiago.
- McCULLOCH, W. S. y PITTS, W. (1943), «A Logical Calculus of the Ideas of Immanent in Nervous Activity», *Bulletin of Mathematical Biophysics* 6, pp. 115-133.

- MORIN, Edgar (1973), *El paradigma perdido. Ensayo de bioantropología*, Barcelona, Kairós, Barcelona, 1983.
- 1977), *El método, I: La naturaleza de la naturaleza*, Madrid, Cátedra, 1981.
 - (1980a), *El método, II: La vida de la vida*, Madrid, Cátedra, 1983.
 - (1980b), «Réponse à René Thom. Au delà du déterminisme: le dialogue de l'ordre et du désordre», *Débat* 5, pp. 105-121. (Recop. en *Ciencia con consciencia*, pp. 111-134, como «Más allá del determinismo: el diálogo del orden y del desorden»).
 - (1981), *Para salir del siglo XX*, Barcelona, Kairós, 1982.
 - (1982), *Ciencia con consciencia*, Barcelona, Anthropos, 1984.
 - (1983), «El devenir del devenir», en José Luis Solana (coord.), *Con Edgar Morin, por un pensamiento complejo*, Barcelona, Akal/UNIA, 2005, pp. 53-88.
 - (1986), *El método, III: El conocimiento del conocimiento*, Madrid, Cátedra, 1988.
 - (1989), «Messie, Mais-non», en *Colloque de Cerisy, Arguments pour une méthode (autour d'Edgar Morin)*, París, Seuil, 1990, pp. 254-268.
 - (1990a), *Introducción al pensamiento complejo*, Barcelona, Gedisa, 1994.
 - 1990b), *Science avec conscience* (edición revisada y modificada), París, Fayard.
 - (1991), *El método, IV: Las ideas. Su hábitat, su vida, sus costumbres, su organización*, Madrid, Cátedra, 1992.
 - (2001), *El método, V: La humanidad de la humanidad, la identidad humana*, Madrid, Cátedra, 2003.
 - (2004), *El método, VI: Ética*, Madrid, Cátedra, 2006.
 - (2007), «Complexité restreinte, complexité générale», en *Intelligence de la complexité. Épistémologie et pragmatique*, Condé-sur-Noireau, Éditions de l'Aube, pp. 28-64.
- NEUMANN, J. von (1951), «The General and Logical Theory of Automata», en L. A. Jeffries (ed.), *Cerebral Mechanisms in Behavior*, Nueva York, Wiley.
- (1966), *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana.
- NICOLIS, Grégoire y PRIGOGINE, Ylia (1987), *La estructura de lo complejo*, Alianza Editorial, Madrid, 1994.

- PAGELS, Heinz R. (1988), *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*, Barcelona, Gedisa, 1991.
- PRIGOGINE, Ylia (1947), *Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles*, París, Dunod.
- PRIGOGINE, Ylia y STENGERS, Isabelle (1979), *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Madrid, Alianza Editorial, 1983.
- REYNOSO, Carlos (2006), *Complejidad y caos: una exploración antropológica*. Buenos Aires, SB.
- RODRÍGUEZ ZOYA, Leonardo G. (coord.) (2011), *Exploraciones de la complejidad. Aproximación introductoria al pensamiento complejo y a la teoría de los sistemas complejos*, Buenos Aires, Centro Iberoamericano de Estudios en Comunicación, Información y Desarrollo (CIECID).
- ROSENBLATT, F. (1958), «The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain», *Psychological Review* 65, pp. 386-408.
- RUELLE, David y TAKENS, Floris (1971), «On the nature of turbulence», *Communications in Mathematical Physics* 20, pp. 167-192.
- SEGARRA, José Gabriel (2001), *Vida artificial: del caos al orden. Guía práctica de la complejidad*, Alzira, Algar.
- SERRES, Michel (1974), «Les Sciences», en J. Le Goff y P. Nora (eds.), *Faire l'histoire*, París, Gallimard.
- SHANNON, C. y WEAVER, W. (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana (Illinois), University of Illinois Press.
- SIMON, Herbert A. (1947), *Administrative Behavior*, Nueva York, MacMillan.
- (1996), *Las ciencias de lo artificial*, Granada, Comares, 2006.
- SIMON, Herbert A. y NEWELL, A. (1958), «Heuristic Problem Solving: The next advance in operations research», *Operations Research* 6, pp. 1-10.
- SMITH, Leonard (2007), *Caos: una breve introducción*, Madrid, Alianza Editorial, 2011.
- SOLANA, José Luis (2001), *Antropología y complejidad humana. La antropología compleja de Edgar Morin*, Granada, Comares.
- SOLÉ, Ricard (2009), *Redes complejas. Del genoma a Internet*, Barcelona, Tusquets.
- STEWART, Ian (1997), *¿Juega Dios a los dados? Las matemáticas del caos*, Barcelona, Crítica, 2007.

- THOM, René (1975), *Estabilidad estructural y morfogénesis*, Barcelona, Gedisa, 1997.
- (1980), «Halte au hasard, silence au bruit», *Le Débat* 3, julio-agosto, pp. 119-132.
- VARELA, Francisco, MATURANA, Humberto y URIBE, Ricardo (1974), «Autopoiesis: The Organization of Living Systems, its characterization and a model», *BioSystems* 5, pp. 187-196.
- WALDROP, Mitchell (1992), *Complexity: The Emerging Science at the Age of Order and Chaos*, Nueva York, Simon and Schuster.
- WEAVER, Warren (1948), «Science and Complexity», *American Scientist* 36: 536, <http://www.ceptualinstitute.com/genre/weaver/weaver-1947b.htm>
- WEINMANN, Heinz (1990), «L'Oedipe du complexe entre Athènes et Rome», en Colloque de Cerisy, *Arguments pour une méthode. Autour d'Edgar Morin*, París, Seuil, pp. 33-41.
- WIENER, Norbert (1948/1961), *Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets, 2^a ed., 1998.
- WOLFRAM, S. (2001), *A New Kind of Science*, Champaign (Illinois), Wolfram Media.
- YOVITS, M. C. y CAMERON, S. (ed.) (1960), *Self-organizing System*, Nueva York, Pergamon.
- YOVITS, M. C., JACOBI, G. T. y GOLDSTEIN, G. D. (ed.) (1962), *Self-organizing System*, Washington, Spartan Books.