

¿Qué es la complejidad?

What's complexity?

Frederic Munné

Universidad de Barcelona

Resumen: En un intento de aclarar qué entender por complejidad, se examinan algunas de las principales concepciones actuales sobre la misma en diferentes campos disciplinares: el antecedente sistémico de la complejidad organizada, la complejidad por el ruido, la complejidad informacional algorítmica, la complejidad de los sistemas caóticos y de las estructuras disipativas, la complejidad fractal, de los sistemas evolutivos, la funcional-estructural de los sistemas sociales, la complejidad de la complejidad, y las concepciones implícitas en las teorías de las catástrofes y de los conjuntos borrosos. Se cuestiona si esas respuestas abordan o no un mismo fenómeno y se concluye que se trata de un concepto epistemológico fundamental que como tal es borroso. Sobre esta base, se plantea una concepción fuerte de la complejidad, como paradigma epistemológico emergente alternativo al dominante desde los griegos que se basa en la simplicidad. La concepción propuesta es transdisciplinar, tiene una múltiple base empírica y teórica, y se centra en la complejidad como el conjunto de propiedades cualitativas irreductibles de un fenómeno o proceso, natural o humano, dadas principalmente por la caoticidad, la fractalidad, el catastrofismo y la borrosidad. Esta concepción, que hace posible un análisis de los aspectos complejos del objeto investigado sin trocearlo cartesianamente, es descriptible, definible operativamente, empíricamente contrastable y con posibilidades de manipulación e intervención. Así entendida, la complejidad no se opone a la simplicidad (si, a la simplificación) ya que ésta pasa a ser un caso límite de aquélla, lo que tiene profundas consecuencias particularmente sobre la imagen del ser humano y la comprensión de su comportamiento individual y social.

Palabras clave: Complejidad. Caos. Psicología. Psicología social.

Abstract: In an attempt to clarify what can be understood as complexity, following main current conceptions about complexity in different fields are examined: systemic antecedent of organized complexity, noise complexity, algorithmic informational complexity, chaotic systems and dissipative structures complexity, fractal complexity in evolutionary systems, social systems' functional-structural complexity, complexity's complexity, and implicit conceptions in catastrophes and fuzzy sets theories. It is questioned if these answers refer to the same phenomenon, what conducts to conclude that complexity is a fundamental epistemological concept which is blurred, due to its own complex nature. From this standpoint, hard complexity is proposed as an emerging epistemological paradigm; it constitutes an alternative paradigm to that of the Greeks' simplicity-based dominant paradigm. The conception proposed here is transdisciplinary theoretical and empirically supported, and focused on complexity as a set of non-reducible qualitative properties in natural or human processes or phenomena; all this is possible due to chaotic, fractal, catastrophic, and fuzzy aspects. Our conception makes possible analyzing complex aspects of an investigated object with description, operational definitions, possibilities of manipulation and intervention – without any Cartesian-splitting procedures. Because of this, complexity is not opposed to the simplicity (which is different in the case of simplification); in fact, simplicity becomes an extreme case of complexity, what carries with fundamental consequences in the image of the human being.

Key words: Complexity. Chaos. Psychology. Social Psychology.

Frederic Munné

Dep. Psicología Social. Universidad de Barcelona. Balmes 184, 2-3. 08006 Barcelona

Telfs.: 938 848 124 / 932 174 238 frnunne@psi.ub.edu

<http://www.ub.edu/dppss/pg/fmunne.htm>

Una pregunta con muchas respuestas

Introducción. ¿Se imagina el lector un mundo en el que lo que se repite puede ser distinto y lo distinto puede repetirse, donde lo que es caótico genera como por arte de magia orden y lo que es ordenado provoca por sí mismo caos, donde el cambio es para no cambiar y no se cambia para así poder cambiar, donde lo que está limitado es impreciso y lo que aparece como impreciso resulta tener límites? Este mundo sorprendente, en el que la imaginación se desborda como en el extravagante país de Alicia imaginado por Lewis Carrol, no es otro que nuestro mundo cotidiano cuando es contemplado desde la perspectiva epistemológica de la complejidad y no desde la simplicidad a la que estamos acostumbrados.

En los últimos decenios, ha habido investigaciones en los más diversos ámbitos del saber, que muestran que la realidad, tanto la natural como la cultural, no es tan simple como se venía creyendo. Esto ha dado lugar a la emergencia de un paradigma epistemológico desde el que podemos aprehender fenómenos paradójicos como la dinámica caótica de muchos sistemas, el carácter irregular de los objetos y procesos denominados fractales, las transformaciones o cambios que perturban la estabilidad de ciertas estructuras para así estabilizarlas o la indelimitación de hechos reales precisos y sus construcciones conceptuales.

Todo ello indica que el modo establecido del conocer científico, basado en la simplicidad y dominante desde que el pensamiento griego la estableció como el modo adecuado o válido de conocer y de razonar del ser humano occidental (cfr. Munné, 2004), no es el más adecuado ni el más válido para comprender la complejidad del mundo y de nosotros mismos, y que es posible otro modo de conocer y de pensar sin reducir su complejidad.

A la nueva concepción de la complejidad se ha llegado, explicado a grandes trazos, a través de tres etapas. La primera arranca de fines del siglo XIX y madura más o menos dentro del primer tercio del XX, coincidiendo con la formación y consolidación de la "nueva física" (mecánica cuántica y teoría de la relatividad). Entre otras cuestiones de fondo, en esta etapa se plantean la complementariedad y la incertidumbre como principios fundamentales de la microfísica, con fuertes implicaciones epistemológicas inexplicables desde una visión simple, o lo que es lo mismo newtoniana, de la realidad física. A lo cual se añade el hecho de que el gran matemático Henri Poincaré (1908), con pasmo no disimulado, encontró en la dinámica cosmológica comportamientos que respondían a ecuaciones no lineales cuya solución daba una maraña ininteligible de trayectorias, a la par que otros matemáticos, como Peano y Koch (cfr. Mandelbrot, 1984), construyeron figuras tan raras, por incomprensibles desde la geometría euclidiana, que merecieron la expresiva denominación de curvas monstruosas. La realidad física no era tan sencilla como parecía...

En la segunda etapa, que más o menos va de la década de los años treinta hasta la de los sesenta, emergen la teoría de la información y sobre todo la cibernética y la teoría general de sistemas. Hallazgos fundamentales de este periodo como los circuitos retroalimentados y la apertura de los sistemas, forman hoy parte del patrimonio común de la ciencia en general. Wiener (1948) definió la cibernética como una interciencia que trata de la teoría del control y comunicación en máquinas y animales. Incluye una teoría de la predicción no lineal e introduce una revolución causal al aportar el concepto fundamental de realimentación (*feedback*), cuyo antecedente está en la homeostasis neurofisiológica descubierta por Cannon (1929). Aunque no tarda en diferenciarse entre realimentaciones de constancia y de tendencia, según se trate de regular los equilibrios estables o los inestables (cfr. De Latil, 1953), no será hasta la llamada cibernética de segundo orden (von Foerster, 1960) que se evidencia la relación con la actual concepción de la complejidad. En cuanto a la sistémica, sostiene un antirreduccionismo, en principio biológico, fundamentado en un nuevo modo de entender lo que es un sistema. Las teorías actuales de la complejidad recurrirán a él, dándole un sentido paradójico al hablar de sistemas caóticos, borrosos, etc.

La etapa actual se inicia en los sesenta con la sucesiva aparición de teorías que tratan de explicar diversos fenómenos observados e inesperados y algunos resultados experimentales obtenidos por *serendipity*. Cada una de estas teorías da lugar a un concepto de la complejidad con el resultado de

un panorama a primera vista desconcertante. Sin embargo y sin proponérselo, estas teorías van configurando un paradigma epistemológico, que afecta tanto al conocimiento y al pensamiento científico como cotidiano. En este paradigma confluyen diversas concepciones de la complejidad que, en principio, son diferentes respuestas a la pregunta de qué es la complejidad. A continuación expondré las que a mi juicio son más relevantes aquí, no sólo por ser básicas e influyentes sino por tener un contenido más directamente epistemológico. Pero antes revisaré el concepto sistémico de la complejidad porque muchas de dichas concepciones emplean el término sistema.

La complejidad organizada. Von Bertalanffy (1950; 1968; 1975), introductor de la teoría general de sistemas, definió un sistema como un "complejo" de componentes interactuantes, añadiendo que constituye una totalidad organizada que se caracteriza además de por la interacción, por la suma, la mecanización, la centralización, la competencia y la finalidad. Se deduce que todo sistema, por el hecho de serlo, es complejo. Sin embargo, la complejidad de un sistema biológico se diluye cuando es tratado como un fenómeno físico. Esta reducción a lo físico se da, por ejemplo, en los intentos de unificar la ciencia a base de ver en todos los fenómenos acontecimientos físicos. Ante esto es necesaria una concepción unitaria del mundo, basada en el isomorfismo de las leyes en diferentes campos. Esto conduce a una concepción perspectivista, dado que cada nivel (físico, biológico, del comportamiento y social) presenta sus construcciones y tal vez leyes propias. Y como sea que en todos los niveles encontramos organización, concluye von Bertalanffy, éste ha de ser el principio unificador.

Con base en Weaver (1948), el mismo autor diferencia entre la complejidad no organizada y la complejidad organizada. De aquélla, explica, ha venido ocupándose la ciencia clásica, que trata sobre todo de problemas con dos variables (por ej., estímulorespuesta) y de la causalidad lineal, de una causa y un efecto o de unas pocas variables cuando mucho. La ciencia clásica daba, por ejemplo, soluciones "perfectas" para la atracción de dos cuerpos celestes, pero cuando intervenían tres cuerpos sólo podía abordar por aproximación el problema de sus interacciones. Es decir, cuando los cuerpos se multiplican, que es lo que ocurre en las ciencias biológicas y sociales, los problemas son multivariantes y surgen las dificultades.

Entonces, conceptos ajenos a la física habitual como los de organización, totalidad, directividad, teleología y diferenciación asoman a cada paso en las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales, y son indispensables para vérselas con los organismos vivientes y los grupos sociales. Por ello, mientras las leyes de la complejidad no organizada se fundamentan en la teoría de probabilidades y requieren métodos estadísticos, las de la complejidad organizada son esencialmente leyes sistémicas y afectan a todos los niveles de la estructura jerárquica del universo (Von Bertalanffy, 1968; 1975). La complejidad sistémica ha sido desarrollada por la dinámica de sistemas (Forrester, 1968) y la teoría de los sistemas complejos (Laszlo, 1990) en las que no es preciso entrar.

La complejidad por el ruido. La perspectiva sistémica está en la base de una concepción innovadora de la complejidad basada en el principio del orden a partir del ruido, enunciado por el biofísico Heinz von Foerster (1960), según el cual hay sistemas autoorganizadores, capaces de adaptarse a situaciones inadecuadas gracias a que además de nutrirse de orden se nutren de ruido. ¿Qué es el ruido? Para otro biofísico, Henri Atlan (1979), es la información faltante o errónea de un sistema abierto, que él refiere especialmente a los sistemas biológicos.

La complejidad resulta del papel paradójicamente organizador de este ruido. Como explican Fiedler-Ferrara y Cintra do Prado (1994), el ruido desorganiza, rompe vínculos y abre nuevas relaciones que se integran en una nueva organización del sistema con una mayor diversidad y una menor redundancia, hacia un estado de mayor complejidad lo cual no podría ocurrir sin intercambios entre los diversos niveles. Adviértase que en esta concepción de la complejidad intervienen dos elementos clave: a la organización se suma la información.

La complejidad implica tener una percepción global del sistema a la vez que la percepción de que no se le domina en todos sus detalles, por ello puede medirse por la información que no se posee y que sería necesaria para tener una explicación exhaustiva y completa de la información del sistema

y su funcionamiento (Atlan, 1979). Pero esto atribuye al observador un papel determinante en la definición de la complejidad y ésta depende más de la relación entre el sujeto y el objeto en el proceso de interacción que de la estructura intrínseca del objeto observado.

La concepción de von Foerster sobre la complejidad ha contribuido al desarrollo de la terapia sistémica (Pakman, 1996 y 1997) y el constructivismo psicológico (Munné, 1998).

La complejidad informacional algorítmica. La información es clave en la teoría de Gregory J. Chaitin (2003), que trabaja en IBM. A mediados de la década de los sesenta sentó las bases de la teoría algorítmica de la información. La complejidad computacional ya había sido tratada por Von Neumann hacia 1950, que la refirió al tiempo de ejecución de los cálculos. Pero a diferencia de la complejidad temporal, Chaitin se basa en la cantidad de información que un ordenador necesita para realizar una tarea, o lo que es lo mismo en el tamaño del programa informático. Así entendida, la complejidad viene dada paradójicamente por el programa más breve de ordenador que describe un sistema determinado, y se relaciona con el concepto termodinámico de entropía en el sentido de que aquel tamaño es análogo al grado de desorden de un sistema físico; por ejemplo, el programa para especificar dónde se encuentran los átomos de un gas sería enorme pero no para describir un cristal debido a la regularidad de su estructura. Esto último ocurre por ejemplo con el número 0,42857142... que parece complejo pero simplemente es 3:7. O sea, que para números altamente ordenados, la longitud del programa mínimo es breve y la complejidad es baja (Pagels, 1988).

Una consecuencia no obvia de este planteamiento es que la aleatoriedad se define por la complejidad del tamaño de un programa, de modo que la única forma de describir un objeto o número completamente aleatorio es mostrarlo tal cual porque carece de estructura o regularidad.

Este concepto de la complejidad responde al principio de la navaja de Ockham (cfr. Munné, en prensa a), según el cual la teoría mejor es la más sencilla o concisa. Expresado en términos de Chaitin, una explicación o teoría es buena en la medida en que comprime los datos experimentales hasta crear un sistema mucho menor de hipótesis teóricas y de reglas de deducción.

Chaitin (2000) también relaciona su concepción de la complejidad con el teorema de la incompletitud de Gödel. Como sea que hay una cantidad infinita de información y que cualquier conjunto dado de axiomas solo abarca una cantidad finita, la idea de complejidad comporta la de incompletitud y en consecuencia el teorema de Gödel es inevitable. Y comenta que quizás un día algún joven metamatemático logre explicar por qué a pesar de la incompletitud, los matemáticos están logrando tantísimos progresos.

Más allá del ámbito computacional, la concepción de Chaitin, tiene el interés epistemológico de mostrar que lo complejo está ya en lo más simple. Al final de este trabajo volveré sobre la crucial relación entre lo simple y lo complejo.

La complejidad de los sistemas caóticos. Otra aproximación a la complejidad se realiza desde el fenómeno del caos, palabra que aquí tiene un significado distinto al popular, ya que designa la dinámica de un sistema, en principio de acción física pero extensible a la actividad biológica y al comportamiento humano, que es hipersensible a la variación de las condiciones en que se da en un momento determinado (“sensibilidad a las condiciones iniciales”, es la expresión estándar).

La teoría o teorías del caos, pues hoy ya son un conjunto relativamente amplio de teorías, a partir sobre todo de los trabajos de Edward N. Lorenz (1963) en meteorología y de Stephen Smale (1967) en topología, surgen al interesarse por fenómenos que antes eran relacionados con el desorden o con el azar y que ahora lo son con la génesis del orden (autoorganización), y con los fenómenos hasta hoy incompatibles de la determinación y la indeterminación.

Debido a dicha hipersensibilidad, el comportamiento global de un sistema puede ser aparentemente aleatorio y de hecho responder a un patrón subyacente de acción o comportamiento representable gráficamente a través de lo que se conoce como un atractor extraño. Este fenómeno, descubierto primeramente en los sistemas físicos posiblemente por ser los menos complejos de la realidad comparados con los sistemas biológicos y más aún con los sistemas humanos, muestra una

conjunción de caos y de orden, Así, los sistemas caóticos muestran una dinámica impredecible, ya que ninguna acción se repite aunque está “determinada” según revela el atractor, lo cual permite cierta "predecibilidad".

El enfoque del caos desde los tractores puede hacernos entender a un mayor nivel de profundidad el comportamiento humano individual y social, por ejemplo los sistemas de creencias (Goertzel, 1995), las actitudes (Eiser, 1994) o los patrones de interacción familiar (Chamberlain, 1995).

Lo expuesto sugiere que caos y orden son fenómenos que uno implica el otro. Y en efecto, el caos puede ser estudiado ya como producido por el orden ya al revés como generador de éste. De ahí que Katherine Hayles (1990) haya diferenciado dos grandes orientaciones en las investigaciones y teorías que se ocupan del caos: la que acaba de exponerse, que va del orden al caos, y otra cuyo camino es inverso, que parte del caos y encuentra el orden, como vamos a ver. Antes, conviene añadir que en la primera orientación, a diferencia de la segunda, se recurre escasamente al término complejidad de una manera explícita, pero se refiere implícitamente a ésta cuando habla de caos. Y es que la complejidad no reside propiamente ni en el caos ni en el orden sino en su interacción.

La complejidad de las estructuras disipativas. El químico ruso-belga Ylia Prigogine, autor de la teoría de las estructuras disipativas, descubrió que los sistemas fisicoquímicos y biológicos que están en un estado fluctuante o relativamente inestable, son capaces de generar orden al fluctuar, lo cual le valió el Premio Nobel en 1977. Esto significa que la complejidad es propia de los sistemas alejados del equilibrio, en los que la estabilidad y el orden están presentes real o potencialmente junto con la inestabilidad y el desorden.

Capra (2002) sintetiza esta teoría como sigue: Una estructura disipativa es un sistema abierto capaz de permanecer en un estado lejos del equilibrio y al mismo tiempo conservar su estabilidad. Es decir, que a pesar del flujo constante y del cambio continuo de sus componentes, mantiene la misma estructura general. Su dinámica en íntima interacción con el cambio o disipación (de ahí el calificativo de estructuras disipativas) se caracteriza por la emergencia espontánea de nuevas formas de orden. Esto se debe a que si el flujo de energía aumenta, el sistema puede llegar a un punto de inestabilidad, denominado bifurcación, del que puede emerger un estado completamente nuevo. Capra destaca que la emergencia de orden en puntos críticos de inestabilidad es espontánea y constituye lo que se llama autoorganización o simplemente emergencia, fenómeno que es reconocido como el origen dinámico del desarrollo, del aprendizaje, de la evolución y de la creatividad.

Según Prigogine, las situaciones de lejanía del equilibrio y de no linealidad están íntimamente relacionadas, pues ambas conducen a una multiplicidad de estados estables en contraste con las situaciones cercanas al equilibrio en las que sólo hay un estado estable único (Prigogine, 1986). Una característica general de los sistemas dinámicos inestables, para una región dada del espacio, es que la elección entre las diversas posibilidades depende de las fluctuaciones estadísticas descritas por las leyes probabilísticas (Prigogine, 1989).

Hay evidencias experimentales y con simulación informática sobre la capacidad de tales sistemas para generar orden a partir del caos mediante un intrigante proceso autoorganizador, muy estudiado con diversos nombres desde diferentes perspectivas: estructuras disipativas (Prigogine y Stengers, 1983), autopoiesis (Maturana y Varela, 1972), recursividad (Morin, 1977-1991), etc. En cualquier caso, se trata de la génesis del orden, lo cual muestra que el caos no debe ser confundido con el desorden (Munné, 1994). Es más, en cierto modo y considerado desde el orden, puede decirse que el caos es un orden no lineal (volveré sobre la no linealidad).

La concepción prigoginiana de la complejidad se ha aplicado a los más variados ámbitos del conocimiento. En el psicológico, por ejemplo, a los procesos de desarrollo cognitivo según la teoría de Piaget (Prigogine y Lestage, 1994) o al campo organizacional (Navarro, 2001).

La complejidad fractal. Benoit Mandelbrot, polaco, formado en Paris, profesor en Harvard e investigador de IBM, descubrió los fractales a comienzos de los sesenta al encontrar que ciertos fenómenos estocásticos o aleatorios no obstante estaban sometidos a una regla o algoritmo Un

fractal es un objeto (o proceso) cuya configuración responde a un patrón muy simple de carácter iterativo, o repetitivo, pero que a pesar de esto va autogenerando características, resultados o respuestas que observados desde diferentes escalas, como un *zoom*, siempre son iguales pero distintas, es decir que se repiten (invariancia de escala) pero nunca exactamente (autosemejanza). La extraordinaria importancia de la teoría fractal está en que muestra que las formas de la naturaleza responden, en el espacio y en el tiempo, más a ella que a la abstracción de la geometría euclídea.

La figura fractal más famosa es el llamado conjunto de Mandelbrot, que ha sido calificado como el objeto matemático más complejo conocido, sin embargo se construye con una regla muy simple. Encontramos, pues, aquí la complejidad algorítmica de Chaitin. Como escribe Mandelbrot (1982), una figura fractal como la curva de Koch es paradójicamente más simple que muchas figuras euclídeas, por ejemplo a diferencia del círculo posee una complejidad finita ya que sólo precisa de un número finito de instrucciones para obtenerse. Pero la cuestión no es tan sencilla puesto que entre la complejidad fractal y la caótica hay una estrecha relación, puesto que los atractores extraños presentan fractalidad (Lorenz, 1993; Stewart, 1990).

El sentido epistemológico de la teoría fractal es que la mera repetición cuantitativa puede tener transcendencia cualitativa, siendo fuente de novedad o emergencia. Y esto no sólo en los objetos fractales sino también en los procesos de la naturaleza y del ámbito humano, como el desarrollo del self (Bütz, 1992) o del conocimiento (Gentry, 1995).

La complejidad de los sistemas evolutivos. Cuando desde la complejidad se abordan los organismos vivos hay que tener en cuenta la evolución biológica, lo cual da lugar a teorías que ponen de manifiesto nuevos aspectos de ésta, como el equilibrio interrumpido, el borde del caos y la criticidad organizada.

A comienzos de los setenta, dos paleontólogos, Niles Eldredge y S. Jay Gould (1972), revolucionaron el darwinismo con su hipótesis de los equilibrios interrumpidos (*punctuated equilibria*) según la cual el proceso de la evolución consistía en largos períodos de tiempo sin cambios perceptibles, probablemente por ser lentísimos (periodos de estasis, en su terminología) salpicados con breves pero intensos momentos de cambio súbito con la consiguiente complejificación. Lo revolucionario de esta teoría es que rectifica la interpretación gradualista de Darwin.

La explicación de los equilibrios interrumpidos ha sido aplicada también al pensamiento y al desarrollo cognitivo humanos por Goertzel (1993), que sostiene, con base en las aportaciones de Gregory Bateson, Gerald Edelman y Jason Brown, que el darwinismo debe ser complementado con una teoría de la autoorganización de los sistemas complejos y que el pensamiento al igual que la vida es también un proceso evolutivo por selección natural. Además, con base en la teoría de la computación supone que un organismo que se acopla con otro genera una gran cantidad de pautas emergentes que hacen más probable que sobreviva (el equilibrio interrumpido se sigue de estas premisas). Goertzel aplica esta teoría a la mente, que concibe según el modelo del cerebro de Edelman pero entendiendo los mapas neurales como estructuras jerárquicas generadoras de patrones, o sea emergentes.

La hipótesis de unos niveles discretos de organización es extendida por algunos incluso a la evolución cultural. Dean (en Lewin, 1992) cuenta que hay arqueólogos que se refieren al cambio de un nivel a otro como puntos bisagra, en un sentido similar a lo que los biólogos evolutivos llaman puntuaciones y los físicos transiciones de fase. Entre nosotros, se ha aplicado el enfoque del equilibrio interrumpido al entendimiento de ciertos procesos en las organizaciones y el *management* (Panyella, 2002).

¿Hay un punto crítico en la dinámica de un sistema complejo donde la complejidad sea máxima? Packard y Langton dan una respuesta afirmativa. La simulación informática muestra que los sistemas complejos adaptativos tienden por sí mismos a un estado óptimo de máxima capacidad para computar la información (Langton, 1989). Esto ocurre en un punto crítico llamado por Langton el arranque del caos y por Packard el borde, límite o filo del caos (*edge of chaos*), siendo esta última

expresión la que hoy es empleada. Al igual que otros fenómenos de la complejidad, el borde del caos fue descubierto por un error casual (*serendipity*) cuando el primero de dichos autores trabajaba con un autómata celular y realizó un pequeño cambio en la magnitud de un parámetro observando que en una estrecha zona fronteriza, justo donde la dinámica del sistema pasaba del caos al orden, el sistema presentaba la máxima capacidad para procesar, manejar y crear información. Ahora sabemos que esto ocurre cuando el sistema puede adaptarse hacia el límite del caos pero no si el sistema está rígidamente ordenado, como sucede en los cristales, ni cuando hay una aleatoriedad completa, como en un gas caliente, porque en tales casos no puede emerger nada nuevo. También experimentando con autómatas celulares, Kauffman (1995) ha encontrado un comportamiento colectivo emergente en sistemas complejos adaptativos, por ejemplo en redes químicas, por el que el sistema no solamente se desplaza hacia el borde del caos sino que va refinando la eficacia de sus reglas a medida que se acerca a dicho lugar. Esto ocurre porque en el traspaso del caos y el orden o estabilidad, el equilibrio es más provisional y el sistema está cargado de potencial (Lewin, 1992). Análogamente a las transiciones de fase de los sistemas físicos, las membranas celulares se hallan en un equilibrio precario entre un estado sólido y uno líquido (fenómeno que es coherente con la teoría de Prigogine). Por esto, los especuladores bursátiles prefieren actuar en la frontera entre el orden rígido y el azar.

La teoría anterior se refiere a sistemas con relativamente pocos elementos, en cambio la que ahora veremos se refiere a sistemas con un número incontable de elementos que interactúan a pequeña escala. Desde fines de los ochenta, el físico danés Per Bak, investigador del Laboratorio Nacional de Brookhaven, interesado también en los procesos de optimización en la dinámica o comportamiento, viene trabajando en tales sistemas. Su teoría de la criticalidad autoorganizada, ha sido confirmada con simulaciones informáticas y con experimentos reales empleando montones de arena así como hileras de múltiples fichas de dominó. Ha encontrado que son sistemas fuertemente interactivos que no llegan a alcanzar el equilibrio, evolucionando de modo natural o espontáneo hacia un estado crítico en el cual exhiben la propiedad de dar por si solos respuestas según una ley exponencial en la que las grandes respuestas son escasas, las pequeñas comunes y en medio se sitúan las intermedias. En este ultimo caso, pequeñas perturbaciones pueden provocar grandes cambios y grandes perturbaciones cambios pequeños. Cuando se añade un grano de arena a un montón de arena normalmente se produce un desprendimiento de pocos granos, pero a veces desencadena una avalancha, que es una reacción no lineal en cadena con procesos de bifurcación pues cada grano de arena puede detenerse o continuar cayendo, y arrastrar o no a otros granos. Estos estados críticos muestran la criticalidad organizada como una propiedad global del sistema, el cual evoluciona hacia el borde del caos y se autoorganiza. Fenómenos como la evolución sismológica o las fluctuaciones económicas presentan criticalidad autoorganizada (Bak y Chen, 1991).

Las concepciones evolutivas de la complejidad plantean ésta como un proceso de complejificación. Conviene recordar que este aspecto tiene una dimensión ideológica. Como se ha observado (McShea, en Lewin, 1992), muchos biólogos evolutivos se encuentran hoy incómodos con la idea de progreso, debido a las connotaciones que tiene de una fuerza rectora externa, siendo más aceptable referir esa idea a un aumento de la complejidad.

La complejidad funcional-estructural de los sistemas sociales. La complejificación más que la complejidad está en el centro de la sociología funcional-estructural del alemán Niklas Luhmann, que reúne elementos de la teoría general de sistemas y la cibernética con la teoría estructural-funcionalista de la acción social de Talcott Parsons y la teoría de la autopoiesis elaborada en el contexto de una biología del conocimiento por Maturana y Varela (1972). En un intento de entender las sociedades actuales. Luhmann (1981) pone el énfasis en la relación del sistema social con su entorno, el cual le hace evolucionar reduciendo la complejidad de tal relación. Para ello, el sistema transforma su complejidad externa en complejidad interna, gracias al carácter autorreferencial de los sistemas sociales modernos. En efecto, un sistema social moderno es capaz de autoobservarse, autodescribirse y autoorganizarse, y está integrado por subsistemas a la vez normativos y autorregulados, como la economía, el derecho y la política, que con las normas que generan

reducen la complejidad al crear probabilidad y por lo tanto orden, necesario para el mantenimiento del sistema. Esta reducción de la complejidad es posible gracias al papel que juegan la comunicación y los *mass media*, que transforman el caos informativo en orden, para lo cual seleccionan los hechos sociales, los jerarquizan y los simplifican, y además establecen los temas de la comunicación. Y es que los sistemas sociales se diferencian de los sistemas vivos y de los psíquicos o de las personas por ser, más que sistemas de acción, unas estructuras autopoiéticas de comunicaciones (Luhmann, 1984).

En cuanto a la complejidad, Luhmann sostiene, basándose en la cibernética de Ashby (1958), que en la construcción conceptual de un sistema son más importantes los conceptos de elemento y relación, que los del todo y las partes. A partir de aquí, un conjunto de elementos es complejo cuando hay una “limitación inmanente”, o sea, cuando cada elemento ya no puede relacionarse cada momento con cada uno de los otros elementos, lo cual significa que la complejidad se debe menos a la cantidad de elementos y sus relaciones estructuralmente posibles que a la selectividad de tales relaciones (Rodríguez y Arnold, 1999). Más específicamente, la complejidad viene dada por las posibilidades generadas por la construcción del sistema (Luhmann, 1973). Y el grado de esta complejidad, que puede ser calificada de funcional o socioestructural, puede servir para medir el estado del desarrollo de una sociedad dada, de modo que una complejidad creciente aumenta la posibilidad de conflicto social pero también la capacidad de aprender del sistema, pues éste cambia más fácilmente y se adapta tanto a las necesidades “externas como a las internas” (Luhman, 1998; Pérez Agote y Sánchez de la Ycera, 1996)

Como se ve, Luhmann lleva más allá la línea sistémica de la complejidad organizada, enriqueciéndola con una visión autopoiética de los sistemas sociales como autorreferenciales y comunicativos. Pero como ha criticado Jesuino (en Morin *et al.*, 1984), su visión de la organización como una reducción de la complejidad no significa que las sociedades globales se vuelvan menos complejas, sino menos complicadas.

La complejidad de la complejidad. El pensador francés Edgar Morin, director de Investigación emérito del CNRS, ha evolucionado desde la biología a la Teoría General de Sistemas y la cibernética. Su obra fundamental, *La méthode* (5 volúmenes: 1977-2003) es una crítica frontal al método cartesiano, obsesionado por la simplicidad e inspirado en un paradigma que impone el orden y combate el desorden. Frente a esto, Morin (1990) defiende la complejidad, como la interacción entre el orden, el desorden y la organización, que representa gráficamente en lo que llama tetragrama o bucle tetralógico. Jugando con su devoción por la recursividad (La naturaleza de la naturaleza, La vida de la vida, El conocimiento del conocimiento: son los títulos de los tres primeros volúmenes de la obra citada) podría decirse que su único tema es la complejidad de la complejidad.

En síntesis de Morin, en la idea de complejidad está contenida la imposibilidad de unificar y de acabar, y por lo tanto comporta una parte de incerteza e indecidibilidad y el reconocimiento de lo irreducible. La complejidad es la unión de la simplicidad y la complejidad, la unión de los procesos de simplificación (selección, jerarquización, separación, reducción) con sus contraprocesos (comunicación, articulación de lo que está dissociado y es distinto). La complejidad va más allá de la alternativa entre el pensamiento reductor, que sólo ve los elementos, y el pensamiento global, que sólo ve el todo (Morin, 1990).

Una de las aportaciones más sugerentes de Morin (*ibid.*) se refiere a cómo pensar la complejidad. Propone tres principios. 1) El principio dialógico, según el cual hay que mantener la dualidad en el seno de la unidad, asociando lo complementario y lo antagónico. 2) El principio de recursividad organizacional, que más allá de la visión lineal entre la causa y el efecto, ve lo que es producido a la vez como productor de sí mismo. Y 3) el principio hologramático, que asume que no sólo la parte está en el todo sino que el todo está también en la parte. Frente a estos principios que guían el pensamiento complejo, dos ilusiones nos apartan del mismo: Una es creer que la complejidad elimina la simplicidad; la otra es confundir la complejidad con la completud. Esta última es grave, porque precisamente la complejidad implica el reconocimiento de un principio de incompletitud y

de incertidumbre.

El mérito de Morin de ser pionero del pensar complejo no debe ocultar que su concepto de la complejidad es excesivamente especulativo, fruto en parte de su racionalismo anticartesiano pero racionalismo al fin y al cabo. Pero sobre todo porque apenas tiene en cuenta las teorías de la complejidad de base empírica aquí expuestas: secundariza el caos, olvida los fractales y prescinde del pensamiento borroso. Además, su pasado hegeliano le hace pensar a menudo en términos de contraposiciones dualísticas, y parece no haber superado la cibernética de primer orden en la formulación que hace de la recursividad.

Concepciones implícitas: la complejidad catastrófica y la complejidad borrosa. Hay dos teorías que sin tratar directamente la complejidad la abordan de un modo implícito. La primera es la teoría de las catástrofes, debida al matemático y epistemólogo francés René Thom (1972). En auge durante las décadas de los 80 y 90, es una nueva forma de ver el cambio en relación con la estabilidad estructural (Woodcock y Davis, 1978), pues describe cambios “repentinos” (catástrofes) que ocurren en un sistema y hacen posible que éste continúe siendo estable.

Es una teoría que ha encontrado aplicaciones en ámbitos tan dispares como la hidrodinámica y la economía, y ha permitido modelizar (Zeeman, 1977) comportamientos sociales, desde la conducta agresiva del perro hasta los motines en las cárceles o los conflictos internacionales. Puede contribuir a esclarecer procesos psicosociales como ciertos cambios de actitud u opinión (Latané y Nowak, 1994) o de toma de decisiones, por ejemplo de los consumidores (Oliva, Oliver y Bearden, 1995).

La teoría de los conjuntos borrosos (*fuzzy sets*) o lógica borrosa (Zadeh, 1965) se basa en el hecho de que la pertenencia a un conjunto dado pocas veces es una cuestión dicotómica y sí lo es de grado. Esto significa que se puede pertenecer y no pertenecer a la vez a dicho conjunto. La complejidad de lo borroso se desprende directamente de esta paradoja, que es una contradicción incomprensible desde la lógica aristotélica basada en la simplicidad.

Sin embargo, los conjuntos borrosos apenas han sido relacionados con la complejidad. Autores que estudian la complejidad con acreditada sensibilidad interdisciplinaria como Morin o Prigogine no los tienen en cuenta. Y los propios teóricos de la borrosidad sólo hacen referencias escasas y muy puntuales a la complejidad. Tal es el principio de incompatibilidad, enunciado por Zadeh, según el cual “a medida que aumenta la complejidad de un sistema, nuestra capacidad para hacer enunciados precisos y significantes sobre su comportamiento decrece hasta un umbral más allá del cual la precisión y la significatividad (o pertinencia) se vuelven casi características mutuamente excluyentes”, principio que Kosko (1993) abrevia con la sentencia: a mayor precisión menor pertinencia.

Epistemológicamente, esta teoría afecta al modo de razonar y de clasificar, y tiene inesperadas aplicaciones en la tecnología y profundas implicaciones ideológicas que afectan de lleno a las ciencias humanas. Recientemente, Dimitrov, ha llegado a proponer una *social fuzziology* (2000; Dimitrov y Hodge, 2002), basada en el paradigma de la complejidad, que considera centrado en la rica base conceptual de la ciencia o teorías de la complejidad (Dimitrov, 2003). Por otra parte, la relación entre la borrosidad y los procesos caóticos de autoorganización ayuda a comprender algunos procesos complejos, como la creatividad en los grupos pequeños de trabajo (Diégoli, 2003) o la formación y desarrollo del *self* (Codina, 2000; Munné, 2000).

¿Complejidad o complejidades? Ante tantas visiones y tratamientos distintos de lo que es llamado complejidad es obligado preguntarse si tiene sentido referirse a ésta como un concepto único o sería más adecuado hablar de complejidades. Horgan (1996) incluso cuestiona esta temática criticando que haya más de 45 definiciones específicas de complejidad. Se queda corto, porque en realidad hay muchas más, pues sólo ha tenido en cuenta las relacionadas con la información, la computación, la entropía y alguna otra, prescindiendo de las numerosas que pueden aportar las ciencias humanas. Su crítica le desprestigia científicamente, porque sabe que esto ocurre con los conceptos en que se basa cualquier campo científico, y que de aceptarse dicha crítica deberían ser puestos en entredicho todos los campos científicos. ¿Cuántas definiciones podrían darse de conceptos como energía, informa-

ción, vida, conducta, mente, sociedad, salud, libertad, etc. etc.? Para que no se diga que esto es propio de las ciencias blandas pondré dos ejemplos relativos uno a la matemática y otro a la biología, aquél sobre el concepto fundamental de número y éste sobre el concepto fundamental de gen.

El matemático francés Christian Houzel (2000) dice que Euclides define un número como una multiplicidad de unidades, siendo la unidad un concepto primitivo no definido, que ya está ahí, y cuando trata la teoría de los números los representa por medio de segmentos a los que aplica razonamientos geométricos en términos proporcionales, con lo cual la base de la teoría de los números pasa a ser geométrica. El problema es que, como ya dijo Pascal en el siglo XVII, la geometría no puede definir ni los números, ni el movimiento ni el espacio. A pesar de esto, Newton siguió basándolo en la geometría al considerar el número como una razón entre dos cantidades homogéneas. En el siglo XIX, Bolzano propuso fundar los números reales prescindiendo de la geometría, lo cual dio lugar a que Dedekind intentara construcciones puramente aritméticas de los números reales. Houzel concluye su exposición, aquí excesivamente abreviada, afirmando que aún no sabemos qué son los números, y que lo mejor es tener una actitud pragmática, o sea hacer matemática sin preocuparse excesivamente por los fundamentos de la misma.

¿Y qué ocurre con el concepto de gen, hoy de moda con motivo de problemas como los alimentos transgénicos, la clonación de animales o la manipulación del genoma humano? Nada menos que dieciocho especialistas de primera línea fueron preguntados recientemente por la revista de alta divulgación científica *Monde scientifique* (*Mundo Científico*, 2002). El antes citado Atlan enumera media docena de definiciones aplicadas actualmente, que va criticando una a una por insatisfactorias. Dos biólogos moleculares (Chambon y Cohen) no logran ponerse de acuerdo y el primero confiesa que nadie sabe realmente qué es un gen. El genetista Leganey recuerda que ya en los años 70 manejaba en la universidad no menos de 11 conceptos diferentes de gen, añadiendo que hubieran podido encontrarse muchos más y cita al físico Feynman que escribió que conceptos como “fuerza” y otros similares son tanto más útiles cuanto menos rígidos son, por lo que lo mejor es explorar la naturaleza sin definirla. Por su parte, Gaudray, que se dedica a la virología, incapaz de dar un sólo concepto propone tres, que acto seguido critica para terminar diciendo que de hecho cada cual en su especialidad tiene una comprensión “intuitiva” de lo que es un gen. Y por no citar aquí a más, terminaré con la opinión del biotecnólogo Warcoin que apunta un aspecto muy importante en este tipo de cuestiones cuando observa que no debería olvidarse que las controversias científicas sobre la definición de gen tienen claras repercusiones sobre las guerras de patentes en biotecnología.

La conclusión, es divertida: quienes trabajan con los genes no saben con lo que están trabajando. Sin embargo, es muy revelador observar que pese a tal situación, la biología genética no sólo puede seguir avanzando sino que está cosechando los mayores éxitos de su breve historia, impensables hace pocos años.

Ahora bien, estoy seguro de que nadie concluirá de lo expuesto que no tiene sentido hablar del concepto de número o del de gen y que sólo pueda hablarse de números o de genes. Por lo mismo no se puede concluir de las diversas concepciones existentes de la complejidad (o del caos, pues como ha escrito Lorenz (1993) éste tiene casi tantas definiciones como aquélla) que no tiene sentido referirse a todas ellas como relacionadas con mismo fenómeno.

Entonces ¿cómo entender el pluralismo conceptual de la complejidad? A mi modo de ver, como aproximaciones a un fenómeno que presenta múltiples aspectos. ¿Significa esto que la complejidad no es definible? No, significa que no es aprehensible desde un solo aspecto y que no es un fenómeno preciso y fijo.

Para evitar malentendidos aclaro que no estoy defendiendo una interpretación meramente discursiva del problema de las definiciones conceptuales, como es el caso del psicólogo social Kenneth Gergen (1991), adalid del construccionismo radical, que sostiene que a través de los diferentes usos del lenguaje vamos construyendo nuestra realidad social. Ejemplifica su tesis con el concepto de libro. La finalidad fundamental de un libro consiste en la lectura, pero también podría definírsele

según otros usos posibles como alimentar una fogata o servir de pisapapeles, de maza, papel higiénico, etc. Según él, la tradición modernista suprime todas estas alternativas, porque si “es realmente un libro” se pueden hacer muy pocas cosas con él además de leerlo. Y sin escrúpulo alguno en el parangón, añade que lo mismo ocurre con el concepto de persona, si pensamos en las concepciones romántica y modernista de la misma.

Para mí, tales interpretaciones basadas en la construcción discursiva son superficiales. Porque la explicación de que sea posible dar a una cosa múltiples usos significativos sólo se encuentra en la borrosidad del significante. El ejemplo de Gergen me recuerda la respuesta que según se cuenta dio, en plan jocoso (y no con la seriedad de Gergen), Mark Twain a una mujer que le preguntó cuantos libros había que tener en casa. El escritor le contestó: “Cuantos más mejor, porque son indispensables. Mire usted: si un mueble cojea me hace falta tener un libro para ponerlo bajo una de las patas. Las paredes de mi escritorio tienen grietas, que disimulo poniendo delante unos cuantos libros. Si yo no fuese alto necesitaría poner uno o dos libros sobre el asiento de mi silla cada vez que voy a comer o a trabajar en mi mesa. Y cuando me enfado con mi perro le tiro un libro a la cabeza.” Pues bien, Twain pudo dar esta respuesta no porque un libro tiene diferentes usos lingüísticos sino por sus posibles usos fácticos como objeto cotidiano que hacen de su concepto digamos global un conjunto difuso o difuminado de significados.

Volviendo al caso del gen, si éste se resiste a una definición única es porque la realidad genética o biológica no es precisa o fija. Esta explicación epistemológica significa que el campo semántico del conjunto es abierto y de ahí las múltiples definiciones de un concepto, salvo si es delimitado por consenso de quienes lo usan en una situación concreta. Estamos, pues, ante un conjunto borroso en el que la realidad se entremezcla con la posibilidad. Y es plausible pensar que esta borrosidad conceptual responde a la complejidad del fenómeno, y que por esto y no por el mero uso lingüística es una fuente inagotable de definición y favorece el avance de la investigación en el correspondiente campo científico.

Llegados a este punto, la pregunta a hacerse es ¿y el propio concepto de complejidad escapa a la borrosidad? Obviamente, no. Si tratamos ese concepto borrosamente, para no reducir su significado salvo por necesidades operativas que siempre serán específicas o casuísticas, lo importante ya no es definirlo pues delimitarlo es simplificarlo. Lo que interesa es poner de manifiesto su contenido real y potencial, y desde esta perspectiva, las concepciones expuestas se ofrecen como aproximaciones a la complejidad desde diversos contextos no necesariamente excluyentes entre si. Se obtiene así un conjunto que, por ser borroso, proporciona un concepto paradójicamente “fuerte” de la complejidad, con un sentido epistemológico de alcance paradigmático.

Una concepción fuerte de la complejidad

¿Ciencia o paradigma de la complejidad? La mayoría de las teorías básicas sobre la complejidad, que dan lugar a las concepciones examinadas, van apareciendo aislada e inesperadamente a partir de los últimos años sesenta, aunque no pasan a ser generalizadas e influyentes hasta entrados los ochenta. ¿Qué pasó en aquella década, o quizás en la anterior, para que independientemente unos de otros, Lorenz descubriera el caos, Mandelbrot los fractales, Zadeh los conjuntos borrosos, Thom las catástrofes, a la par que Morin reflexionaba novedosamente sobre la complejidad? No lo sabemos aún. Lo que está claro es que sin la informática difícilmente tendríamos las teorías del caos y de los fractales.

En cualquier caso, la década mencionada marca, más que un hito, un antes y después en la ciencia y en la teoría del conocimiento, tan profundo que algunos no dudan en referirse a dichas teorías como ciencia de la complejidad, calificándola de una “ciencia nueva” (Gleick, 1987) y de una “ciencia de la sorpresa” (Casti, 1994), ya describiéndola como la ciencia de lo no lineal, de la turbulencia y el caos, de la emergencia y los fractales, de la autoorganización y de la criticalidad (Dimitrov, 2003), ya afirmando que las ciencias de la complejidad incluyen las teorías que tratan de las estructuras disipativas, las catástrofes, el caos, la criticalidad autoorganizada y la autoorganización (Mathews, White y Long, 1999).

En mi opinión, esta cuestión es más epistemológica que científica. Porque parece exagerado pretender que se está ante una nueva ciencia, como también lo sería pretender que hay una ciencia de la simplicidad, pero no lo es afirmar que aquellas teorías comparten un modo de conocer basado en la no linealidad y centrado en el fenómeno de la emergencia. Y esto tiene un gran alcance mucho más allá de lo metodológico, teniendo pleno sentido tratar la complejidad como paradigma epistemológico.

La no linealidad, epistemológicamente entendida, se refiere a la posibilidad de un sistema de acción de generar secuencias causales no proporcionales en la relación causa-efecto. Con más o menos matices, esta posibilidad es asumida por autores de las diferentes concepciones: Caos y complejidad son etiquetas para referirse a la dinámica no lineal (Goemer, 1990). Lo que la literatura popular llama teoría o ciencia de la complejidad, los científicos y los matemáticos prefieren denominarla dinámica no lineal (Capra, 2002: que se refiere explícitamente a la teoría matemática elaborada hoy día para describir y analizar los sistemas vivos). Las ciencias de la complejidad son llamadas también teoría de los sistemas dinámicos no lineales o redes adaptativas complejas (Mathews, White y Long, 1999). Una teoría no lineal no da el todo desde las partes, o sea que la suma de éstas no da la totalidad, por esto el principio de incertidumbre es parte de la oferta lineal (Kosko, 1993): afirmación hecha desde el pensamiento borroso que, a mi entender, no significa que éste elimine la incertidumbre, sino al contrario que la asume positivamente como ambigüedad.

En cuanto a la emergencia (cfr. Johnson, 2001) se refiere al surgimiento “espontáneo” o endogenético de propiedades *ex novo*. Esta característica adquiere gran potencialidad en las redes globales, como veremos después.

También es exagerado referirse a una ciencia de la complejidad como un proyecto unificador, pretensión que ya se encuentra en el formalismo sistémico de von Bertalanffy y que lleva a los más optimistas a afirmar que se está ante una “nueva teoría que unifica todas las ciencias” (Lewin, 1992) y a los más cautos ante una “nueva alianza” (Prigogine y Stengers, 1979). Hay que relacionar esto con el debate abierto a fines de los cincuenta por Snow (1993) con su tesis de las dos culturas en el mundo contemporáneo, tesis que no siempre ha sido correctamente entendida porque invierte el planteamiento clásico de que los científicos se han apropiado de la palabra y del concepto de “ciencia”. Lo que Snow denunciaba es que en los años treinta los intelectuales de las letras se habían apropiado del término “intelectual”, lo cual partía la cultura en dos: de un lado la cultura literaria y del otro la cultura científica. Esto complicaba la situación porque ahora la dicotomía lo era por partida doble, es decir, no sólo quedaba dividida la ciencia sino además la cultura. El propio Snow, cuatro años después proponía superar esta situación, pero más por el lado de la cultura que por el de la ciencia, al sostener que una tercera cultura podía salvar la incomunicación entre ambos sectores.

Brockman (1995) ha dado un sentido algo diferente a la idea de una tercera cultura. Según él, los intelectuales siguen sin comunicarse con los científicos, sin embargo éstos sí se comunican con el gran público. Refiriéndose a la escena norteamericana de los años noventa y entendiendo que los intelectuales son gente que modela el pensamiento de su generación, afirma que están surgiendo los pensadores de esa tercera cultura. Son los nuevos intelectuales públicos, entre los que se encuentran físicos, evolucionistas, biólogos, informáticos y algún filósofo y psicólogo, cuyas ideas aunque puedan ser especulativas representan las fronteras actuales del conocimiento. Brockman concluye que la cultura emergente es una nueva filosofía natural, fundada en la comprensión de la importancia que tiene la complejidad en la evolución, ya que se está comprobando que los sistemas de gran complejidad, sean organismos, cerebros, la biosfera o el universo mismo, no han sido el resultado de un proyecto sino de la evolución.

A mi modo de ver, una tercera vía sólo es factible a través de una concepción epistemológica de la complejidad, como lugar de encuentro con pleno sentido de los denominados tanto intelectuales como científicos.

Hacia una concepción epistemológica con base empírica. Hace unos años (1995), apunté una concepción de la complejidad basada en las teorías que ponen de manifiesto propiedades cuali-

tativas de la realidad no observables ni inteligibles cuando es tratada del modo más simple posible, por ejemplo según la regla ockhamiana de la navaja o la lógica formal aristotélica. La desarrollaré relacionándola con las concepciones examinadas al comienzo.

Dejando aparte el antecedente sistémico, sin duda la concepción más trabajada es la complejidad caótica *lato sensu*, es decir comprendiendo las concepciones relativas a los sistemas caóticos, las estructuras disipativas, los sistemas evolutivos y en parte la concepción fractal, ya que esta última surgió independientemente de aquélla. Las concepciones restantes, relativas al ruido, la información algorítmica y la dinámica funcional-estructural están más preocupadas por la simplicidad que por la complejidad. Según esto, el núcleo de la complejidad viene dado por las concepciones sobre lo caótico, lo fractal y las concepciones implícitas sobre lo catastrófico y lo borroso.

Integrando las teorías correspondientes puede conceptuarse la complejidad como el conjunto de propiedades cualitativas de un fenómeno o proceso, natural o humano, dadas en principio por la caoticidad, la fractalidad, el catastrofismo y la borrosidad. Digo “en principio” porque aparte de que sin duda se encontrarán más propiedades complejas, puede discutirse si propiedades ya conocidas hoy, como el catastrofismo o la autoorganización, han de ser consideradas o no básicas. En cualquier caso, las propiedades de la complejidad son irreducibles, en el sentido de que si se prescinde de ellas hay aspectos del fenómeno que no son aprehensibles y se reduce o simplifica la comprensión del mismo.

La caoticidad conlleva la posibilidad de fenómenos como la sensibilidad a las condiciones iniciales, la atracción extraña, las fluctuaciones, la autoorganización y el carácter fractal. La sensibilidad a las condiciones iniciales es la manifestación caótica de la no linealidad. La autoorganización es una propiedad nuclear de la dinámica caótica (en la que emergen conductas impredecibles a partir de reglas deterministas de niveles inferiores, y a su vez de dichas conductas aparentemente aleatorias emergen patrones regulares), aparte de serlo de otros procesos complejos, como los autopoiéticos.

Por su parte, la fractalidad implica características como la invariancia de escala y la autosemejanza.

El catastrofismo se refiere a la posibilidad de mantener la inestabilidad estructural mediante cambios súbitos morfogenéticos. Son fenómenos no lineales y emergentes que como propiedad de la complejidad plantean la duda de si considerarlos un aspecto o no de la caoticidad. Matemáticamente considerada, una catástrofe es un caso particular de la teoría de las bifurcaciones (Prigogine, 1989) y así vista podría relacionarse con el camino hacia el caos en tanto que se llega a éste a través de un proceso de duplicación de periodos o bifurcaciones en cascada, como muestra cualquier diagrama de May (1987). Ahora bien, leída epistemológicamente, esta teoría muestra la capacidad de un sistema para mantenerse con una maniobra de cambio para “pervivir”, lo cual nos hace entender el fenómeno del cambio de un modo aparentemente contradictorio sólo explicable como una manifestación de la complejidad.

La borrosidad alude a la imprecisión en los límites de un fenómeno dado, que tiene fronteras permeables pero no abismos infranqueables. Afecta a la conceptualización del mismo, ya que ésta resulta de las aproximaciones posibles a aquél.

Así, desde esta perspectiva integradora, predicar de un fenómeno que es complejo significa que presenta o puede presentar básicamente al menos aspectos: 1) caóticos, 2) fractales, 3) catastróficos y 3) borrosos. E investigar la complejidad de un fenómeno consistirá en “analizarlo” en todos o alguno de tales aspectos. Este análisis de aspectos, como le llamo, no es el tradicional cartesiano que trocea por partes y luego las pega sin escrúpulo epistemológico. (Una variante subrepticia es el análisis destructivo derridiano, que también desmonta y monta sin problema alguno). Aunque admite cuantificar los datos, el análisis de aspectos tiene una base cualitativa. No es en balde que las teorías sobre la complejidad emplean cualitativamente la matemática y la geometría, apartándose así de la visión cuantitativa que de ella tenían la filosofía y la física clásicas.

El concepto de complejidad expuesto puede ser calificado de fuerte, en comparación con el sistémico, insuficientemente desarrollado, o el que se queda en una emergencia inconcreta, y también con cada una de las aproximaciones conceptuales vistas al principio. Es fuerte por la

especificidad de los fenómenos que ponen de manifiesto las investigaciones llevadas a cabo, por la teorización que se hace de las mismas a partir de esta base empírica, por la posibilidad de aplicar multidisciplinariamente los conceptos elaborados, debido a la transdisciplinariedad del nivel paradigmático. Así que aún siendo en general interdisciplinares las teorías sobre la complejidad los conceptos epistemológicos que contienen son extrapolables a cualquier campo del conocimiento y los resultados de las investigaciones basadas en ellas afectan al resto de disciplinas.

Lo más relevante de esta concepción fuerte de la complejidad es que aprehende ésta como un fenómeno que no resulta de una especulación, y que es descriptible, empíricamente contrastable, definible operativamente y con posibilidades de manipulación o intervención.

Complejidad y simplicidad. El paradigma de la complejidad cuestiona el principio de que lo esencial se encuentra en lo simple y por lo tanto que el conocimiento de la realidad debe ser lo más simple posible. Cuestiona, pues, los supuestos que han ido configurando el pensamiento occidental, viendo lo complejo como lo complicado (principio de la navaja, de Ockham), como lo compuesto (método cartesiano) y/o como lo excesivo (principio del tercero excluido, de Leibniz). Aunque he tratado esta cuestión con detalle en otro lugar (ver Munné, en prensa a) conviene aclarar con respecto a la complicación que, a diferencia de la complejidad, se basa en las características cuantitativas del fenómeno, de modo que según intervengan en un proceso muchos o pocos elementos o factores se considerará más o menos complicado. Esta acepción cuantitativa de la complejidad viene de lejos si tenemos en cuenta que el término *complexum* fue introducido por la lógica estoica para designar cualquier proposición compuesta por más de una sentencia y pasó a la filosofía e incluso al lenguaje cotidiano.

En el triple sentido indicado, la complejidad queda contrapuesta a la simplicidad y ésta procura evitar aquélla, homogeneizando al máximo los aspectos plurales de la realidad, porque cuanto menos complicada, compuesta y excesiva es percibida se cree que ha de ser más accesible y más comprensible a nuestro conocimiento. En consecuencia, se procura economizar elementos, dividir por partes y prescindir de cuanto es considerado apriorísticamente no esencial. El resultado es un conocimiento reductor al máximo posible de la complejidad. De ahí que las investigaciones y teorías sobre la complejidad parezcan oponerse a la simplicidad. Pero la complejidad no es lo opuesto de la simplicidad, salvo cuando ésta se da como simplificación. Desde la perspectiva de aquélla, lo simple pasa a ser una manifestación extrema o límite de la propia complejidad (Munné, en prensa b).

Lo que hace complejo a un fenómeno son las relaciones e interdependencias entre sus elementos. Lo decisivo no es, pues, el número de elementos o partes del conjunto, aunque las concepciones cuantitativas sobre la complejidad muestran que la cantidad no es indiferente ni por lo tanto prescindible, especialmente cuando tiene trascendencia cualitativa, como es el caso de los puntos de bifurcación o en los de catástrofe. Lo decisivo está en los aspectos cualitativos. Por esto, se simplifica cuando lo complejo es tratado como complicado, o sea que se le cuantifica reduciendo sus aspectos cualitativos. Y por esto, también, ha podido afirmarse que la complejidad es más una propiedad de la interacción entre dos sistemas que un aspecto intrínseco de un sistema tomado aislado (Casti, 1994). Se deduce que el paradigma de la complejidad es sobre todo aplicable a las ciencias que estudian las interacciones, como es el caso a nivel humano de la psicología social.

Un paso más se da al profundizar en la trama interactiva y verla como una red global. Las investigaciones más recientes conducen a ello. Capra (2002), que en vez de la etimología filosófica del término complejidad relaciona éste con el latín *complecti* (entrelazar) y *complexus* (red), comenta que en esto subyace el significado de no linealidad, insita en una red de fibras entrelazadas. Y añade que mientras el estudio de la complejidad tradicionalmente se ha referido a las estructuras ahora la atención se desplaza a los procesos de emergencia que tienen lugar en ellas, de tal modo que por ejemplo en lugar de definir la complejidad de un organismo en términos del número de tipos de células que lo componen como suelen hacer los biólogos puede ser definida en función del número de bifurcaciones que atraviesa el embrión en el desarrollo del organismo, proceso que Brian Goodwin (en comunicación personal a Capra) califica de complejidad morfológica. Adviértase que

en el mismo sentido van las concepciones de la complejidad, implícitas en los enfoques más recientes de la ciencia social, como el de la sociedad-red (Castells, 1996).

Se ha podido constatar que en el nuevo paradigma, términos hasta hoy negativos (como caos, catástrofe y borroso, cuyos sinónimos han venido siendo respectivamente desorden, desastre y vaguedad) adquieren un sentido positivo. Y es que lo que hasta hoy se veía contradictorio puede ser sólo paradójico a la luz del paradigma emergente, lo cual proporciona una visión más profunda y global de la naturaleza, la vida o el mundo. En el contexto de la complejidad, la incoherencia, el cambio inesperado, lo anormal se explica que sean una fuente, por añadidura inagotable, de novedad y creación.

Las investigaciones en que se basan las teorías expuestas descubren que fenómenos contradictorios considerados desde la simplicidad, son paradójicos. Piénsese en el sinsentido de hablar de sistemas caóticos que unen los términos sistema y caos incompatibles para la razón común; de las estructuras y procesos regulares, que sin embargo son irregulares por estar a la vez sometidos y no sometidos a una regla o patrón; de ciertas transformaciones bruscas que no obstante mantienen su forma; o de los límites no nítidos de la realidad fáctica y conceptual, pero cuya imprecisión no priva que sean delimitantes (Munné, en prensa b). En este mundo paradójico, la realidad en tanto que compleja es a la vez nítida y confusa, continua y discontinua, estable e inestable, reiterativa e innovadora, ordenada y caótica. Las propiedades de la complejidad subsumen estas alternativas, que como tales pasan a ser casos límite o propias de la realidad material artificialmente producida por el ser humano (edificios, máquinas, utensilios, objetos fabricados, etc.). ¿Se comprende ahora la alusión inicial al maravilloso país de Alicia?

En síntesis, las teorías expuestas muestran que la realidad es mucho más compleja de lo que se suponía. Con esto contribuyen a la formación de un nuevo paradigma epistemológico de un enorme potencial crítico, que abre una perspectiva fascinante: poder aproximarse a las manifestaciones más diversas de la realidad sin reducir su complejidad, entendida ésta en su significación fuerte. Esto conduce a una nueva imagen del ser humano (Munné, 2004), que permite una comprensión más profunda e integral de nuestro comportamiento y de nosotros mismos, e impulsa nuevas y más efectivas formas de intervención psicológica y social.

Permítaseme terminar insistiendo en lo que ya he dicho al cierre del último trabajo citado: al reclamar la complejidad como paradigma del conocimiento científico se está reivindicando algo aparentemente muy modesto. Frente a la idea básica de la ciencia occidental de que se puede y debe prescindir de las diferencias mínimas (Gleick, 1987), se trata de exigir una filosofía y una ciencia respetuosas con tales diferencias. Esta reclamación es especialmente sensible cuando el conocimiento se dirige al ser humano y trata de explicar y comprender nuestro comportamiento individual y social. Lo que exige una psicología y una psicología social de las diferencias mínimas, no por supuesto en el sentido tradicional de una psicología diferencial individual o cultural, una psicología que asuma la complejidad del ser humano para comprenderlo en profundidad y optimizar su potencialidad.

Referencias bibliográficas

ASHBY, W.R. (1958). **General systems theory as a new discipline**. General Systems Yearbook, 3, 1-6.

ATLAN, H. (1979). **Entre le cristal et la fumé**. París: Du Seuil, (Entre el cristal y el humo. Ensayo sobre la organización de lo vivo. Madrid: Debate, 1996.)

BAK, P. y CHEN, K. (1991). **Criticalidad autoorganizada**. Investigación y Ciencia, 174, 18-25.

BROCKMAN, J. (Ed.) (1995). **The third culture: beyond the scientific revolution**. Simon and SCHUSTER. (La tercera cultura. Más allá de la revolución científica. Barcelona: Tusquets, 1996.)

BÜTZ, M.R. (1992). **The fractal nature of the development of the self**. Psychological Reports, 71, 1043-1063.

CANNON, W.B. (1929). **Organization for physiological homeostasis**. Physiological Review, 9,

CAPRA, F. (2002). **The hidden connections**. Nueva York: Doubleday. (Las conexiones ocultas. Barcelona: Anagrama, 2003.)

CASTELLS, M. (1996). **The rise of the Network Society**. Oxford: Blackwell. (La sociedad red. Madrid: Alianza, 1997).

CASTI, J.L. (1994). **Complexification**: explaining a paradoxical world through the science of surprise. Nueva York: Harper Collins.

CHAITIN, G. J. (2000). **Imprevisibilidad de los números**. Mundo Científico, extra El universo de los números, 47-53.

Chaitin, G. J. (2003). **Ordenadores, paradojas y fundamentos de las matemáticas**. Investigación y ciencia, 322, 28-35.

CHAMBERLAIN, L. (1995). **Strange attractors in patterns of family interaction**. En Roberston y Combs, 1995.

CODINA, N. (2000). **Una aproximación cualitativa a la complejidad del self**. En D. Caballero, M. T. Méndez y J. Pastor (Eds.), La mirada psicosociológica. Grupos, procesos, lenguajes y culturas. Madrid: Biblioteca Nueva, 750-755.

DE LATIL, P. (1953). **La pensée artificielle**: introduction à la cybernetique. París: Gallimard. (El pensamiento artificial. Introducción a la cibernética. Buenos Aires: Losada, 1958).

DIÉGOLI, S. (2003). **El comportamiento de los grupos pequeños de trabajo bajo la perspectiva de la complejidad**: Modelos descriptivos y estudio de casos. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. <http://www.tdx.cesca.es/TDX0217104-104614/index.cS.html>

DIMITROV, V. (2000). **Introduction to social fuzziology**. <http://www.zulenet.com/VladimirDimitrov/pages/IntroSocialFuzz.html>

DIMITROV, V. (2003). **Paradigm of complexity**: The law of emergence. <http://www.zulenet.com/VladimirDimitrov/pages/paradigm.html>

DIMITROV, V. y HODGE, B. (2002). **Social fuzziology**: study of fuzziness of social complexity. Heildeberg: Physica.

EISER, J.R. (1994) **Attitudes, chaos and the connectionist mind**. Oxford: Blackwel.

ELDREDGE, N. y GOULD, S.J (1972). **Punctuated equilibria**: an alternative to phyletic gradualism. En T.J.M. Schopf (Ed.): Models in paleobiology. San Francisco: Freeman Cooper, 82-115.

FIEDLER-FERRARA, N. y Cintra do Prado, C.P. (1994). **Caos**: uma introdução. São Paulo: Blücherrn.

FORRESTER, J. (1968). **Principles of systems**. Cambridge: Wriigth Allen.

GENTRY, T.A. (1995). **Fractal geometry and human understanding**. En F .D. Abraham y A. R. Gilgen. Chaos theory in psychology. Londres: Praeger, 145-156.

GERGEN, K.J. (1991). **The saturred self. Dilemmas of identity in contemporary life**. Londres: Harper. (El yo saturado. Dilemas de identidad en el mundo contemporáneo. Barcelona: Paidós).

GLEICK, J. (1987). **Chaos, making a new science**. Nueva York: Viking. (Caos. La creación de una ciencia. Barcelona: Seix Barral, 1988).

GOEMER (1990). **Chaos and the evolving ecology world hypothesis implications for just systems**. Proceedings of the International Society of the systems sciences. 34th Annual, Meeting 1990, Portland.

GOERTZEL, B. (1993). **The evolving mind**. Nueva York: Gordon y Breach.

- GOERTZEL, B. (1995). **Belief system as attractors.** En Roberston y Combs, 1995, 123-134.
- HAYLES, N. K. (1990). **Chaos bound:** orderly disorder in contemporary literature and science. Nueva York: Cornell Univ. Press. (La evolución del caos. El orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas. Barcelona: Gedisa, 1993).
- HORGAN, J. (1996). **The end of science:** facing the limits of knowledge in the twilight of the scientific age. Lugar: Addison Wesley. (El fin de la ciencia. Los límites del conocimiento en el declive de la era científica. Barcelona: Paidós, 1998).
- HOUZEL, Ch. (2000). **¿Qué es un número?** Mundo Científico. El universo de los números. Matemáticas para interpretar el mundo, monográfico, 6-10.
- JOHNSON, S. (2001). **Emergence:** the connected lives of ants, brains, cities and software. Nueva York: Free. (Sistemas emergentes. O que tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software. Barcelona: Turner/Fondo de Cultura Económica, 2003.)
- KAUFMANN, S. (1995). **At home in the Universe:** the search of the laws of self-organization and complexity. Nueva York: Oxford University Press.
- KOSKO, B. (1993). **Fuzzy thinking:** the new science of fuzzy logic. Nueva York: Hyperion. (Pensamiento borroso. La nueva ciencia de la lógica borrosa. Barcelona: Grijalbo-Mondadori, 1995).
- LANGTON, C.G. (Ed.) (1989). **Artificial life.** Addison-Wesley. Reading, MA.
- LASZLO, E. (1989). **The great bifurcation.** Pisa: Montescudaio. (La gran bifurcación. Barcelona: Gedisa, 1990).
- LATANÉ, B. y NOWAK A. (1994). **Attitudes as catastrophes:** from dimensions to categories with increasing involvement. En R.R: Vallacher y A. Nowak (Eds.), Dynamical systems in social psychology. Nueva York: Academic, 219-250.
- LEWIN, R. (1992) **Complexity.** life at the edge of chaos. Londres: Dent. (Complejidad. El caos como generador del orden. Barcelona: Tusquets, 1995).
- LORENZ, E. N. (1963). **Deterministic nonperiodic flow.** Journal of Atmospheric Science, 20, 130-141.
- LORENZ, E.N. (1993). **The essence of chaos.** Nueva York: Art Gallery. (La esencia del caos. Un campo de conocimiento que se ha convertido en parte importante del mundo que nos rodea. Madrid: Debate, 1995).
- LUHMANN, N. (1973). **Ilustración sociológica y otros ensayos.** Buenos Aires: Sur.
- LUHMANN, N. (1984). **Soziale Systeme.** grundrisse einer allgemeinen theorie. Frankfurt: A. M., Suhrkamp.
- LUHMANN, N. (1998). **Complejidad y modernidad:** de la unidad a la diferencia. Madrid: Trotta.
- MANDELBROT, B. (1982). **The fractal geometry of nature.** Nueva York: Freeman. (La geometría fractal de la naturaleza. Barcelona: Tusquets, 1997).
- MANDELBROT, B. (1984). **Les objets fractals:** form, hasard et dimension. Paris: Flammarion, la ed. 1975. (Los objetos fractales: Forma, azar y dimensión. Barcelona: Tusquets, 1987).
- MATHEWS, M.M., WHITE, M.C. y Long, R.G. (1999). **Why study complexity sciences in the social sciences?** Human Relations, 52 (4), 439-462.
- MATURANA, H. R. y VARELA, F. J. (1972). **De máquinas y seres vivos.** Santiago de Chile: Universitaria.
- MAY, R.M. (1987). **Chaos and the dynamics of biological populations.** En M.V. Berry, I. C. Percival y N. O. Wiss (Eds.), Dynamical chaos. Princeton: Princeton Univ. Press, 27-43.

MUNDO CIENTÍFICO (2002). **Dieciocho facetas de un mismo concepto**. 231, 70-77.

MORIN, E. (1977, 1980, 1986, 1991 Y 2003). **La méthode**: I. La nature de la Nature. II. La vie de la vie. III. La connaissance de la connaissance. IV. Les idées, leur habitat, leur vie, leurs mœurs, leur organisation. V. L'humanité de l'humanité. Paris: Du Seuil. 5 vols. (El método. I. La naturaleza de la naturaleza II. La vida de la vida. III el conocimiento del conocimiento. IV. Las ideas, su habitat, su vida, sus costumbres, su organización. La humanidad de la humanidad. Madrid: Cátedra, 1988 a 1993,5 vols.).

MORIN, E. (1990): **Introduction a la pensée complexe**. Paris: E. S. F. (Introducción al pensamiento complejo. Barcelona: Gedisa, 1994.)

MORIN, E. et alii (1984). **O problema epistemológico da complexidade**. Portugal: Europa-America.

MUNNÉ, F. (1994). **Complejidad y caos**: más allá de una ideología del orden y del desorden. En M. Montero (Ed.), Conocimiento, realidad e ideología. Caracas: Avepso.

MUNNÉ, F. (1995). **Las teorías de la complejidad y sus implicaciones en las ciencias del comportamiento**. Revista Interamericana de Psicología, 29 (1), 1-12.

MUNNÉ, F. (1998). **Constructivismo, construccionismo y complejidad**: la debilidad de la crítica en la psicología construccionista. Psicología & Sociedad, 10, 2, 76-94. (Reproducido en Revista de Psicología Social, 1999, 14,2-3, 131-144).

MUNNÉ, F. (2000). **El self paradójico**: la identidad como sustrato del *self*. En D. Caballero, M. T. Méndez y J. Pastor (Eds.), La mirada psicosociológica: grupos, procesos, lenguajes y culturas., Madrid: Biblioteca Nueva, 743-749.

MUNNÉ, F. (2004). **El retomo de la complejidad y la nueva imagen del ser humano**. Hacia una psicología compleja. Revista Interamericana de Psicología, 2004, 38 (1) 15-22.

MUNNÉ, F. (En prensa a). **Estrategias del pensar simplificador y contraestrategias del pensar complejo**. Libro de Conferencias. XXIX Congreso Interamericano de Psicología (Lima 13-18 julio 2003).

MUNNÉ, F. (En prensa b). **El pluralismo teórico y metodológico en la psicología social**: aproximación desde el paradigma epistemológico de la complejidad. Psic-Soc. Revista Internacional de Psicología Social, 2004, 4.

NAVARRO CID, J. (2001). **Las organizaciones como sistemas abiertos alejados del equilibrio**. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0116102-114349>

OLIVA, T. A, OLIVER, R. I. y Bearden, W. O. (1995). **The relationships among consumer satisfaction, involvement, and product performance**. A catastrophe theory application. Behavioral Science, 40, 2, 104-132.

PAGELS, H.R. (1988). **Dreams of reason**. Nueva York: Simon & Schuster. (Los sueños de la razón. Barcelona: Gedisa, 1991.)

PAKMAN, M. (Comp.) (1996 y 1997). **Construcciones de la experiencia humana**. Barcelona: Gedisa, 2 vols.

PANYELLA, M. (2002). **Aspectes caotics i fractals en el comportament organitzacional**: caos, organitzacions i management. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. <http://www.tdx.cesca.es/TDX-0422103-130905>

PÉREZ-AGOTE POVEDA, I. y SÁNCHEZ DE LA YNCERA, A. (1996). **Complejidad y teoría social**. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas.

POINCARÉ, H. (1908). **Science et méthode**. Flammarion: Paris (Ciencia y método. Madrid: Espasa-Calpe, 1948).

PRIGOGINE, I. (1986). **Encarant-se amb l'irracional**. En J. Wagensberg, Procés a l'atzar.

Barcelona: Tusquets, 63-78.

PRIGOGINE, I. (1989). **Introduction**. En Laszlo (1989), 9-12.

PRIGOGINE, I. y LESTAGE, Ph. (1994). **Complexité et structures cérébrales: Piaget y Prigogine**. En D. de Béchillon, Les défis de la complexité. Paris: L'Harmattan, 173-194.

PRIGOGINE I. y STENGERS, E. (1986). **La nouvelle alliance**. Paris: Gallimard. 1ª ed. 1979. (La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia. Madrid: Alianza, 1990).

ROBERSTON, R. Y COMBS, A. (Eds.) (1995). **Chaos theory in psychology and the life sciences**. Marmsah, Conn: Erlbaum.

RODRÍGUEZ, D. y ARNOLD, M. (1999). **Sociedad y teoría de sistemas: elementos para la comprensión de la teoría de Niklas Luhmann**. Santiago de Chile: Universitaria.

SMALE, S. (1967). **Differentiable dynamical systems**. Bulletin of American Mathematical Society, 13,747-817.

SNOW, C.P. (1993). **The two cultures**. Cambridge: Cambridge University Press.

Stewart, I. (1990). **Does God play dice?: The mathematics of chaos**. Oxford: Blackwell. (¿Juega Dios a los dados? La nueva matemática del caos. Barcelona: Crítica, 1991).

THOM, R. (1972). **Stabilité structurelle et morphogénese**. Reading, Mass: Benjamin.

VON BERTALANFFY, L. (1950). **An outline of general systems theory**. British Journal of Philosophy of Science, 1, 139-164.

VON BERTALANFFY, L. (1968). **General systems theory**. Foundations, Development, Applications. Nueva York: Braziller. (Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones. México: Fondo de Cultura Económica, 1976.)

VON BERTALANFFY, L. (1975). **Perspectives on general system theory**. Scientific philosophical studies. Nueva York: Braziller. (Perspectivas en la Teoría General de Sistemas. Estudios científico-filosóficos. Madrid: Alianza, 1979).

VON FOERSTER, H. (1960). **On self-organizing systems and their environments**. En M. C. Yovitz y S. Cameron (Eds.), Self-organizing systems. Londres: Pergamon, 31-50.

WEAVER, W. (1948). **Science and complexity**. American Scientist, 36, 536-544.

WIENER, N. (1948). **Cybernetics**. Nueva York: Wiley. (Cibernética. Barcelona: Tusquets, 1985).

WOODCOCK, A. y DAVIS, M. (1978). **Catastrophe theory**. Nueva York: Dutton. (Teoría de las catástrofes. Madrid: Cátedra, 1986).

ZADEH, L. A. (1965). **Fuzzy sets**. Information and control, 8, 338-353.

ZEEMAN, E.C. (1977). **Catastrophe theory**. Londres: Addison Wesley.