

Ciencias de la complejidad: Ciencias de los cambios súbitos

Carlos Eduardo Maldonado
Profesor-investigador CIPE,
Universidad Externado de Colombia
E-mail: carlos.maldonado@uexternado.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Cuando D. Hilbert decidió organizar el Congreso Mundial de Matemáticas en París en 1900, su pretensión era, en verdad, grande. La finalidad era la de presentar “el programa de estudio e investigación en matemáticas para los próximos cien años”. Para ello, Hilbert presentó ante el Congreso 23 problemas que, según él, habrían de marcar el próximo siglo en el trabajo de los matemáticos, siendo el más ambicioso el segundo problema que quería fundamentar todas las matemáticas en un conjunto de axiomas y reglas lógicas. Sin embargo, lo verdaderamente sorprendente no está ahí, sino en otro lugar. La intención de Hilbert era la de completar el destino de Occidente iniciado por Euclides.

En verdad, contra la opinión mayoritaria sostenida principalmente por filósofos e historiadores de la filosofía, no es cierto que Occidente se inicie sencillamente en el siglo V a.n.e., con el tránsito de los presocráticos a Sócrates y Platón, gracias a la desaparición de la Dictadura de los Treinta, y el gobierno de Solón y Pericles. Más exactamente, Occidente comienza a partir del libro *Los elementos* de Euclides debido a que en él se hacen evidentes los tres rangos centrales de la humanidad y de la racionalidad occidental:

- a) La racionalidad occidental es eminentemente deductiva o hipotético-deductiva. La geometría es la primera de las ciencias que nace en Occidente, y ello de un modo específico: como una ciencia axiomática, con un método deductivo;

- b) El pensamiento occidental sabe predominantemente del espacio, y el tiempo permanece como un motivo extra-lógico. La mayor parte de la ciencia y la filosofía occidentales se funda en la geometría, se derivan de ella y la suponen de manera necesaria;
- c) Ser occidentales significa, por tanto, estar cargado de pre-juicios, pre-conceptos, pre-concepciones. Si hay alguien que ha puesto de manifiesto este aspecto de manera abierta y sistemática es M. Heidegger a comienzos del siglo XX. La forma de vida usual de los occidentales consiste en verificar dichos pre-juicios o pre-conceptos, reduciendo el mundo a los mismos.

La historia de la ciencia y de la filosofía, las dos más importantes formas de la racionalidad humana, no sólo son una verificación del estado de cosas anterior, sino, más aún, es la variación sobre un mismo tema, por así decirlo. La filosofía y la ciencia han consistido en el primado de la racionalidad deductiva –o hipotético-deductiva-. Pues bien, esta racionalidad se ilustra de manera particularmente clara en tres dominios en la historia de occidente: las matemáticas, la teología y el derecho. Las demás ciencias y disciplinas lo son a la manera de por lo menos alguna de estas tres, o las dan por supuesto.

Pues bien, la pretensión de Hilbert era la de dar cumplimiento, por así decirlo, al destino trazado por Euclides y nunca cuestionado de manera radical o sistemática, a saber: se trataba, en el más importante de los veintitrés problemas enunciados en París en el año de 1900, de mostrar que las matemáticas son un sistema deductivo, cerrado por consiguiente. Ahora bien, la derivación sensible que se desprende es que si las matemáticas lograban demostrar el carácter defendido por Hilbert, *a fortiori* todos los demás sistemas deductivos serían cerrados. Hilbert se erguía así, como la otra cara de la moneda cuya fase original era la de Euclides.

La sorpresa para Hilbert mismo y para los matemáticos en general, pero con ellos entonces, también para la comunidad científica, fue que, apenas unos años más tarde, dos jóvenes investigadores, A. Turing y K. Gödel, de manera casi simultánea, darían al traste con el sueño de Hilbert. La obra y el pensamiento de Turing y de Gödel constituyen, sin lugar a dudas, el cisma más grande de la historia de la racionalidad humana fundada en la axiomatización, los modelos deductivos y el determinismo.

A partir de Turing y de Gödel tiene comienzo, en cierto modo, el descubrimiento de las limitaciones y casi de la imposibilidad de los sistemas deductivos como sistemas cerrados. Así, la exploración de sistemas alejados del equilibrio, las fluctuaciones, inestabilidades y bifurcaciones, en fin, los sistemas dinámicos no-lineales es un fenómeno que se sigue y acaece contemporáneamente. Los nombres de Onsager, Haken, el propio von Neumann y otros más, merecen entonces un lugar destacado.

La finalidad de este texto es histórico-conceptual, así: se trata al mismo tiempo de mostrar los orígenes de las ciencias de la complejidad –finalidad histórica-, tanto como de caracterizar en qué consiste el estudio de los sistemas complejos –propósito conceptual-. Esta finalidad está orientada en una dirección bien precisa: sostener que las ciencias de la complejidad son el tipo –nuevo- de racionalidad científica que corresponde al mundo actual y hacia el futuro, y que, en contraste, con la ciencia y la filosofía tradicionales, sirven básicamente como referentes para la adecuada comprensión y explicación de las dinámicas que en la actualidad tienen lugar en el mundo. Tal es, precisamente, la tesis que me propongo sostener con este texto.

Cuatro momentos sirven a la vez como preparación para la tesis mencionada, y como argumentos que la sostienen. En primer lugar, trazaré, someramente, la historia reciente del surgimiento de las ciencias de la complejidad. Me detendré, en particular, en los autores, las teorías, los conceptos y las lógicas que se encuentran en la base del estudio de la complejidad. En segunda instancia, elaboraré un mapa de los rasgos y problemas que caracterizan y definen específicamente a las ciencias de la complejidad. En este segundo momento presentaré las razones por las cuales la complejidad puede ser comprendida como una nueva forma de la racionalidad humana y qué significa ello. En un tercer momento presentaré los retos más significativos que tiene actualmente, y hacia el futuro inmediato, el estudio de los sistemas dinámicos complejos. Gracias a esta consideración puede ser posible unificar dos perspectivas, una teórica y la otra práctica. Con respecto a esta última, el cuarto momento se concentra en las implicaciones culturales, económicas y políticas de la complejidad. La idea de base, finalmente, es la de establecer que, y de qué manera, las ciencias de la complejidad representan un auténtico programa transdisciplinario e interdisciplinario de investigación

correspondiente a una nueva fase en la evolución del conocimiento humano y de la sociedad.

En otras palabras, los argumentos que sostiene la tesis que me propongo defender son cuatro: el primero, es histórico; el segundo, metodológico; el tercero, heurístico, y el cuarto, político. Hacia el final elaboraré algunas conclusiones cuyo sentido es el de abrir vetas y caminos para posteriores reflexiones. El lenguaje de las nuevas ciencias de la complejidad es altamente técnico y difícil –entre otras razones, por lo especializado y reciente-. En este texto intentaré una presentación menos técnica, pero básica.

2. ORÍGENES DE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD¹

No existe una única definición sobre complejidad. El término de “ciencias de la complejidad” se acuña a raíz de la fundación del Instituto Santa Fe, en Nuevo México, dedicado al estudio de los fenómenos, comportamientos y sistemas que exhiben complejidad. Se trata, notablemente, de aquellos que están marcados por inestabilidades, fluctuaciones, sinergia, emergencia, autoorganización, no-linealidad, bucles de retroalimentación positiva antes que de retroalimentación negativa, equilibrios dinámicos, rupturas de simetría, en fin, aquellos que se encuentran en el filo del caos.

En la conformación del Instituto Santa Fe (SFI, por sus siglas en inglés), participan los premios Nóbel M. Gell-Mann (física; de descubridor de las partículas quark), Philip Anderson (física), Kenneth Arrow (economía), Brian Arthur (economía) y los teóricos e investigadores George Cowan (experto en química de elementos radiactivos), Stuart Kauffman (biólogo teórico), Christopher Langton (experto en sistemas de computación, creador de la vida artificial), John Conway (matemático). Posteriormente y hasta la fecha, una serie de destacados investigadores se vinculan, de distinta manera, al SFI. La financiación del SFI provino inicialmente gracias al apoyo sustantivo de los Álamos Nacional Bank y el Citicorp, entre otras organizaciones, y a partir del SFI en el Laboratorio Nacional de los Álamos, así como el de Brookhaven se crean grupos y líneas de investigación sobre fenómenos no-lineales. Puede decirse, sin dificultad, que

¹ Esta sección es un resumen de un libro que acabo de terminar como resultado de una investigación en el CIPE de la Universidad Externado de Colombia y que será publicado en este año 2005.

este hecho significó al mismo tiempo el triunfo del estudio de la complejidad, tanto como la necesidad de formar grupos de teóricos y científicos dedicados a esta clase de fenómenos. La finalidad estratégica de la creación del SFI fue la de servir de alternativa al principal centro de inteligencia en los Estados Unidos hasta ese momento: el Institute for Advanced Studies, de Princeton, creado originariamente por la Corporación RAND en el contexto de la Guerra Fría. El SFI se asocia rápidamente con el Laboratorio Nacional de los Álamos y la atención se concentra en el estudio de los fenómenos, sistemas y comportamientos no-lineales.

Posteriormente a la creación del SFI, varios otros institutos y centros dedicados a la dinámica de los sistemas complejos se han creado en el mundo, y prácticamente todos trabajan en red, o por lo menos existen amplios canales de comunicación y cooperación entre ellos. El rasgo definitorio de estos centros de investigación es la inter y transdisciplinariedad, precisamente a partir del reconocimiento del interés por determinados *problemas de frontera*. Usualmente se trata de institutos y centros de *investigación*, y el acceso a ellos se logra a nivel de trabajos postdoctorales (*scholarships, fellowships, etc.*).

La historia de los conceptos, temas y problemas articuladores de la complejidad es verdaderamente apasionante y corresponde a los desarrollos de lo mejor de la investigación, en particular a partir de la segunda mitad del siglo XX. El desarrollo del pensamiento sucede, en el curso del siglo XX a ritmos hiperbólicos (Maldonado, 2000) gracias al desarrollo del computador como herramienta conceptual. En efecto, es precisamente gracias al desarrollo de la computación –a partir de 1944- cuando, por primera vez, la racionalidad científica puede acceder a trabajar con dinámicas no-lineales. Como es sabido, la no-linealidad fue descubierta por las matemáticas ya a finales del siglo XVIII, pero fue rápidamente desechada debido a que por su dificultad, no se veía la utilidad de trabajar con ella. El computador desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las ciencias de la complejidad (Pagels, 1990).

El interés por los sistemas complejos proviene de múltiples campos y responde, en rigor, a la evolución misma de lo mejor del pensamiento científico del siglo XX. Ello explica la multiplicidad de ciencias y disciplinas que tanto confluyen en, como brotan de, este interés. Cabe distinguir, en la exposición acerca de los orígenes de las ciencias

de la complejidad dos vías paralelas, al comienzo independientes, pero luego, estrechamente interrelacionadas. La primera es teórica, y la segunda, instrumental. A continuación destacaré la vía teórica y, luego, me ocuparé de la instrumental.

Los fundamentos teóricos previos al desarrollo del computador merecen un lugar destacado. Entre estos antecedentes, cabe destacar tres momentos o figuras relevantes: H. Poincaré, K. Gödel y A. Turing.

H. Poincaré, el más importante matemático francés de comienzos del siglo XX, y uno de los más destacados en la historia de las matemáticas, desarrolló una obra matemática, centrada especialmente en torno a los procesos de creación (matemática), cuya divulgación por parte de él mismo alcanzó los terrenos de la política, la educación y la ética. La contribución más grande de Poincaré consistió en haber producido un giro del pensamiento analítico al geométrico, gracias a lo cual, por lo demás, sería posible posteriormente la teoría de la relatividad. Fue uno de los padres de la topología (*analysis situs*), un campo de las matemáticas cuya enseñanza básica consiste en mostrar que ni las matemáticas son exactas ni la realidad absoluta, sino, todo depende del punto de vista del observador (topológico). Se dice de Poincaré que fue la última persona que comprendió completamente todas las matemáticas de su tiempo.

Cabe destacar, de cara al estudio de la complejidad, tres elementos básicos que la obra de Poincaré aporta: el problema de los tres cuerpos –que posteriormente dará lugar al problema de los múltiples cuerpos-, el concepto de y el trabajo con espacio de fases, y la idea de que pensar (matemáticamente) el mundo equivale, en realidad, a pensarlo geoméricamente. El primer elemento destaca el hecho de que uno de los problemas más difíciles consiste en pensar interacciones. Asistimos así, al tránsito de un pensamiento y ciencia –la clásica- que se interesaba por trayectorias, hacia uno que descubre las interacciones. La forma primera que cobra esta idea es el estudio de las relaciones entre el sol, la tierra y la luna. El segundo elemento señala que el campo y/o el objeto principal de la investigación científica es la imaginación. En efecto, el espacio de trabajo que denota el concepto de espacio de fases (conocido, en ocasiones, también como espacio fásico) es un espacio imaginario, no el espacio físico, real, con el que la tradición piensa el mundo, en particular a partir de Aristóteles. Finalmente, el tercer elemento nos dice que no simplemente pensamos en forma analítica, por ejemplo, en

términos de no contradicciones e identidades, sino, mejor y más auténticamente, pensamos en términos de figuras y diagramas, de estructuras, sistemas y procesos. Como se aprecia sin dificultad, están sentadas aquí las bases para afirmar, como se hará años más tarde, que el todo es mayor que la sumatoria de las partes.

Los nombres de Gödel y de Turing se suelen mencionar de manera paralela, no obstante el hecho de que su pensamiento y sus contribuciones sucedan en momentos distintos, aun cuando próximos. En 1931, K. Gödel escribe un artículo con el título “Sobre las sentencias formalmente indecibles de los *Principia Matemática* y de los sistemas afines”, cuyo resultado fue el teorema de la incompletud, y que es la primera y más radical prueba de la inviabilidad del sueño de Hilbert. Un sistema como la aritmética contiene proposiciones cuya verdad no se puede demostrar al interior de dicho sistema, sino en otro que contiene a aquel; pero a su vez, la verdad del sistema siguiente no puede ser demostrada en su interior, sino en otro más, y así sucesivamente. Por su parte, en 1936, A. Turing desarrolla la idea llamada –gracias a A. Church- como la “Máquina de Turing”. Se trata de un experimento mental mediante el cual afirma la indecibilidad de las proposiciones matemáticas. Es decir, la cuestión de si hay o no un algoritmo que pueda determinar si una fórmula dada es verdadera o falsa tiene, de parte de Turing, una respuesta negativa. Esto es, no existe un algoritmo que pueda resolver esta cuestión. Por extensión, el conocimiento es incomputable.

En general, en el contexto del estudio de los sistemas, fenómenos o comportamientos complejos, es común hallar referencias, deudas o alusiones a alguno de estos tres autores: Poincaré, Gödel y Turing. Naturalmente que los antecedentes y las deudas con la tradición son mucho más numerosas que únicamente con estas tres figuras. Sin embargo, por así decirlo, ellos constituyen un denominador mínimo común.

3. CUADRO HISTÓRICO-CONCEPTUAL DE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

El estudio de la complejidad consiste, dicho de un modo básico, en el estudio de la dinámica no-lineal. Esta dinámica está presente en una multiplicidad de sistemas y fenómenos, que incluye, entre otros, al funcionamiento del cerebro, los sistemas

ecológicos, los insectos sociales, la dinámica de los mercados financieros, los sistemas alejados del equilibrio, por ejemplo, los fenómenos de autoorganización.

Pues bien, el primer rasgo decisivo que debe atenderse cuando se habla de las ciencias de la complejidad es el plural de la expresión. Este es un elemento determinante que marca un contraste fuerte con la ciencia clásica². Son, pues, varias las ciencias – ciencias, teorías y modelos- que componen el estudio de los sistemas dinámicos no-lineales. Quisiera a continuación hacer una presentación histórica de la evolución y componentes de la complejidad.

3.1. Cronológicamente, la primera de las ciencias de la complejidad es la termodinámica del no-equilibrio, desarrollada por I. Prigogine. Heredera de los trabajos de Onsager, la obra de Prigogine se desarrolla a partir del estudio de la irreversibilidad, una idea que formula ya desde su tesis doctoral, presentada en 1945 con el título: *Étude Thermodynamique des Phénomènes Irreversibles*. A partir de esta idea, todo el trabajo de Prigogine desembocará, veinte años más tarde, en el concepto de estructura disipativa, formulado en un artículo de 1967 con el título “Estructura, disipación y vida”³. La distinción entre estructuras conservativas y estructuras disipativas puede rastrearse ya desde el libro escrito conjuntamente con Glansdorff en 1971 con el título: *Structure, Stability and Fluctuations*.

La irreversibilidad constituye, sin duda alguna, el núcleo de la nueva termodinámica, la cual tiene el mérito de revelarnos que los sistemas dinámicos se encuentran lejos del equilibrio, y que por ello mismo son capaces de remontar la flecha del tiempo de la

² No es este el lugar para mostrar las líneas de continuidad y de ruptura entre la ciencia clásica y las ciencias de la complejidad. Éste es un tema que debo dejar de lado y que formará parte de un libro en el que me encuentro trabajando en el CIPE de la Universidad Externado de Colombia.

³ Que existen claras interdependencias entre la ciencia y la propia biografía es algo suficientemente conocido ya desde vías distintas; así, por ejemplo, tanto desde el psicoanálisis como desde la psicología del descubrimiento científico. Pues bien, en el caso de Prigogine algo semejante puede verse sin dificultad. Para un cuadro a partir del cual cabe inferir sin dificultades los entrelazamientos, nunca enteramente consciente ni explícitamente manifiestos entre la propia biografía –esto es, la vida propia-, y el pensamiento científico y filosófico de Prigogine, véase la hermosa entrevista con Ottavia Bassitti y que da lugar al libro: *El nacimiento del tiempo*, Barcelona, Tusquets, 1993. Sin embargo, más exactamente, el tema clave es aquí el del entrelazamiento entre tres factores: el biográfico, el cultural, en el sentido amplio de la palabra, y el de la propia teoría científica constituía por determinados problemas, en el sentido lógico y heurístico de la palabra. La armonía entre estos tres factores es altamente sensible.

Siguiendo la misma línea de relación entre biografía, cultura y desarrollo de una teoría, M. Waldrop (1992) muestra la misma tendencia en relación con varios de los teóricos fundadores del Instituto Santa Fe, tales como C. Langton, P. Anderson, S. Kauffman o G. Cowan, entre otros.

termodinámica clásica la cual conducía hacia la muerte o, lo que es equivalente, al equilibrio. Precisamente debido a la flecha del tiempo, el conocimiento humano descubre la imposibilidad o la incapacidad de predecir el futuro de un sistema complejo. (Ésta, como es sabido, será una de las ideas directrices del caos – teoría o ciencia). En otras palabras, la flecha del tiempo pone de manifiesto que la estructura del tiempo es cada vez más compleja. De esta suerte, la irreversibilidad nos pone de frente, por primera vez, con procesos o fenómenos de complejidad creciente.

Los sistemas en equilibrio sólo perciben entornos inmediatos, pues, finalmente, es irrelevante que vean o puedan ver más allá de la proximidad –vecindazgo-, puesto que por definición en un sistema en equilibrio –esto es, en un sistema cerrado-, el horizonte lejano coincide con el entorno cercano o, inversamente, el entorno inmediato contiene el horizonte, puesto que no hay nada más allá que no coincida, punto por punto, con el entorno inmediato. Otra cosa sucede en los sistemas alejados del equilibrio.

En verdad, en los sistemas lejanos del equilibrio existen señales que recorren todo el sistema y que provienen de lugares lejanos; de este modo, los sistemas se hacen sensibles a estas señales, y dicha sensibilidad imprime dinámica a estos sistemas. En otras palabras, los sistemas alejados del equilibrio son altamente sensibles a las novedades o a las innovaciones, a los eventos (*events*), o al azar. Pues son estas novedades las que generan dinámicas no-lineales en dichos sistemas.

En 1977 Prigogine recibe el premio Nóbel de Química, y publica en el mismo año el que es considerado su libro más importante: *Autoorganización en los sistemas de no-equilibrio*, escrito conjuntamente con G. Nicolis (con quien escribirá posteriormente *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*)⁴.

El no-equilibrio es el origen del orden (1977: 1.2.). Dice Prigogine: “Es interesante el que la bifurcación introduzca en un sentido la ‘historia’ en la física... De este modo,

⁴ El título del original en alemán es: *La investigación de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias naturales (Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften)*.

introducimos en la física y la química un elemento ‘histórico’, el cual hasta ahora parecía reservado tan sólo a las ciencias que tratan con fenómenos biológicos, sociales y culturales” (*ibid*: 4.6.)⁵. Esto significa dos cosas. De un lado, es el hecho de que la distancia entre las llamadas ciencias duras y las ciencias blandas desaparece o por lo menos disminuye, produciéndose un acercamiento en algún lugar intermedio del que brotan o en él confluyen tanto lo simple como lo complejo. De otra parte, al mismo tiempo, asistimos, mediante esta metamorfosis de las ciencias, a la emergencia de una síntesis novedosa del conocimiento. Por consiguiente, cabe decir sin dificultad que la complejidad se caracteriza como una nueva forma de racionalidad, a saber: como una síntesis de lo diverso y anteriormente contrapuesto. Pero, a su vez, es una síntesis que es más que la sumatoria de las partes. Las ciencias anteriores se transforman en el encuentro, y de esa transformación surge un nuevo lenguaje, nuevas aproximaciones, nuevos y distintos métodos, en fin, un nuevo mundo y una nueva realidad. Se trata del universo de los sistemas complejos no-lineales, mediante el cual es posible comprender, por primera vez, que los fenómenos simples o regulares, que las predicciones y que la causalidad, por ejemplo, son tan sólo casos particulares dentro del dominio, bastante más amplio de los sistemas, fenómenos o comportamientos caracterizados como alejados del equilibrio, esto es, complejos.

Frente al tema del tiempo, Prigogine produce una tesis verdaderamente innovadora. El tiempo no es ni implica desgaste ni ilusión. Por el contrario, el tiempo es, e implica, creación. Precisamente por ello, la evolución de la complejidad conduce hacia un proceso creciente. El tiempo depende de la vida misma, y la vida misma es un proceso incesante y continuado de complejidad creciente. Justamente, es debido a la ruptura de la simetría temporal que se producen bifurcaciones, fluctuaciones, en fin inestabilidades, todas las cuales son generadoras de procesos. La generación de nuevos e incesantes procesos es la obra misma de la autoorganización. De esta suerte, tiempo y autoorganización son fenómenos concomitantes, y marcan de manera definitiva a este tipo de fenómenos, sistemas y procesos conocidos como complejos, es decir, de complejidad creciente.

⁵ “It is interesting that bifurcation introduces in a sense ‘history’ into physics... In this way we introduce in physics and chemistry a ‘historical’ element, which until now seemed to be reserved only for sciences dealing with biological, social, and cultural phenomena”.

En 1979 Prigogine escribe conjuntamente con I. Stengers *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, libro que quiere constituirse como el más importante de cara al diálogo del científico con la sociedad en general. Esto es, como libro de divulgación. Sin embargo, es preciso decir que de la primera edición (1979) a la segunda (1990), un giro sensible se produce en la intención de Prigogine y Stengers, en el sentido de que buscan hacer de un libro de divulgación un libro de producción de conocimiento. Esta intención es particularmente clara en la introducción y sobre todo en los apéndices que escriben para la segunda edición. Hay una circunstancia particular mediadora en el carácter del libro entre la primera y la segunda edición, a saber: ha surgido en el mundo y se ha consolidado un novedoso campo de conocimiento: las ciencias de la complejidad. De suerte que lo que en un primer momento quiere ser una divulgación de la termodinámica del no-equilibrio, se convierte en un segundo momento en un esfuerzo de desarrollo más sistemático frente a la acogida y los desarrollos que, a partir de la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio, llevan a cabo teóricos e investigadores con diferentes formaciones profesionales. En la obra de Prigogine, *La nueva alianza* se encuentra en el centro, como puente, por así decir, entre dos textos fundamentales para entender el pensamiento de Prigogine. Hacia atrás, se trata del libro *Autoorganización en los sistemas de no-equilibrio*, de 1977, y hacia delante, del libro *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*, de 1987. Ambos libros fueron escritos por Prigogine conjuntamente con G. Nicholis.

Una palabra acerca de *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. En 1970 J. Monod –ganador del premio Nóbel en Biología en 1965– escribe *El azar y la necesidad*. Este libro marcó un hito en la historia del pensamiento biológico, así como en la filosofía de la biología⁶. En una conversación con O. Bassetti, Prigogine confiesa que dos textos han marcado todo su pensamiento⁷. Se trata del libro clásico de E. Schrödinger, *¿Qué es la*

⁶ Una observación marginal. Monod recibe el premio Nóbel de Medicina en 1965 conjuntamente con F. Jacob y A. Lwoff, gracias precisamente a una colaboración estrecha entre ambos. Sin embargo, debido puntualmente al libro de Monod *El azar y la necesidad*, se producirá muy pronto un alejamiento entre Monod y Jacob. Este distanciamiento se encuentra registrado teóricamente en un libro de Jacob: *El juego de lo posible. Ensayo sobre la diversidad de los seres vivos*, Barcelona, Grijalbo, 1982 (edición original en francés de 1981). – Cabe anotar una circunstancia análoga a las relaciones entre H. Maturana y F. Varela, e incluso un paralelismo en el siguiente sentido: las tesis de Monod y de Maturana se corresponden como contraposición a las de Jacob y Varela, naturalmente guardadas proporciones.

⁷ Cfr. *El nacimiento del tiempo*, págs. 33 y 34.

vida?, y el libro de Monod mencionado. Pues bien, puede decirse que *La nueva alianza* es el debate con, y la respuesta a, estos dos textos. Existen numerosos testimonios y declaraciones en este sentido en diversos trabajos de Prigogine y bastaría con cotejar los tres textos para verificar que así es en efecto.

La nueva alianza tiene dos expresiones, así: de un lado, se trata de una nueva relación entre el ser humano y la naturaleza y, de otra parte, de una redefinición de las relaciones entre las ciencias sociales y humanas y las ciencias básicas y exactas, o también, en términos más generales, entre la ciencia y la filosofía. No hay que olvidar una parte de las palabras que recibió Prigogine en la ceremonia de entrega del premio Nóbel: “Sus trabajos en física contienen sugerentes consecuencias en otros dominios del pensamiento”. En términos más radicales: se trata de aprovechar la ciencia y la filosofía para comprender y hacer posible la vida y la cultura.

Lo anterior exige una precisión y al mismo tiempo sienta las bases para una aclaración de la obra de Prigogine relativamente a las ciencias de la complejidad, o mejor aún, con respecto al concepto mismo de “complejidad”. Prigogine no habla nunca de complejidad en el sentido genérico de “ciencia(s) de la complejidad”, esto es, notablemente, en el sentido de los autores, teóricos y científicos del Instituto Santa Fe en Nuevo México. Por el contrario, Prigogine prefiere el concepto, bastante más puntual y delimitado, de “comportamientos complejos”. “¿Qué es la complejidad?” se pregunta Prigogine, y responde: “...es más realista, por lo menos no tan impreciso, hablar de *comportamiento complejo* en lugar de referirnos a sistemas complejos. El estudio de este tipo de comportamiento esperamos que nos permita descubrir algunas características de distintas clases de sistemas y nos conducirá a una comprensión adecuada de lo complejo”⁸. Y más adelante sostiene: “Expresado con brevedad, el comportamiento complejo ya no está limitado exclusivamente al campo de la biología. Se encuentra en un proceso de penetración en las ciencias físicas y parece profundamente enraizado en las leyes de la naturaleza” (*ibid*: 22). Precisamente por esta razón, los comportamientos complejos se explican por, y se integran en, el estudio de los sistemas de no-equilibrio, o también, en la termodinámica de los procesos irreversibles.

⁸ I. Prigogine y G. Nicholis, *La estructura de lo complejo*, Madrid, Alianza, pág. 21.

En 1980, tres años después de recibir el premio Nóbel, Prigogine escribe *Del ser al devenir. Tiempo y complejidad en las ciencias físicas*. En el prefacio se puede leer: “Este libro es acerca del tiempo. Me hubiera gustado llamarlo: *Tiempo. La dimensión olvidada*, aun cuando este título hubiera sorprendido a algunos lectores. ¿No está el tiempo ya incorporado desde el comienzo en la dinámica, en el estudio del movimiento? ¿No es el tiempo el propio tema de preocupación de la teoría especial de la relatividad? Esto es ciertamente verdadero. Sin embargo, en la descripción dinámica, sea clásica o cuántica, el tiempo tan sólo entra en un sentido muy restringido, en el sentido de que estas ecuaciones son invariantes con respecto a la inversión del tiempo: $t \rightarrow -t$. A pesar de ser un tipo específico de interacción, la llamada interacción superdébil parece violar esta simetría del tiempo, la violación no juega ningún papel en los problemas que son el tema de este libro”⁹ (1980: xi).

La tesis que defiende Prigogine en su libro de 1980 se formula de tres maneras o en tres pasos, y tiene una radicalidad sin igual. Su tesis es:

- 1) Los procesos irreversibles son tan *reales* como los reversibles, y no corresponden a aproximaciones suplementarias que nosotros superpongamos, por necesidad, sobre los procesos en los que el tiempo es reversible;
- 2) Los procesos irreversibles juegan un papel *constructivo* fundamental en el mundo físico; son la base de importantes procesos coherentes que aparecen con particular claridad en el nivel biológico;
- 3) La irreversibilidad está fuertemente enraizada en la dinámica. Puede decirse que la irreversibilidad comienza cuando los conceptos básicos de la mecánica clásica o cuántica (tales como las trayectorias o las funciones de onda), dejan de ser observables.

⁹ “This book is about time. I would like to have named it *Time, the Forgotten Dimension*, although such a title might surprise some readers. Is not time incorporated from the start in dynamics, in the study of motion? Is not time the very point of concern of the special theory of relativity? This is certainly true. However, in the dynamical description, be it classical or quantum, time enters only in a quite restricted way, in the sense that these equations are invariant with respect to time inversion, $t \rightarrow -t$. Although a specific type of interaction, the so-called superweak interaction, seems to violate this time symmetry, the violation plays no role in the problems that are the subject of this book” (traducción, C.E.M.).

La obra de Prigogine cumple, por tanto, un papel altamente destacado en la redefinición de tres órdenes de relación: i) entre las ciencias básicas y naturales y las ciencias sociales y humanas; ii) entre las ciencias y la filosofía y, iii) entre la ciencia y la sociedad o la cultura.

3.2. La segunda de las ciencias de la complejidad es el caos, una teoría desarrollada inicialmente por E. Lorenz en el MIT, en 1963, a partir de un *paper* llamado “Deterministic Nonperiodic Flow”. Sin embargo, el reconocimiento del caos tardó un tiempo, y sólo varios años después, en especial gracias a D. Ruelle, se logró reconocer su significado. Es hacia 1975 cuando el caos logra una aceptación generalizada entre la comunidad de científicos y teóricos, y a partir de allí se extiende hacia otros dominios distintos a la meteorología, como las ciencias físicas, la ecología, incluidas también las ciencias sociales, por ejemplo.

El estudio del caos constituye un excelente ejemplo del surgimiento y evolución de un modelo explicativo que logra constituirse como teoría para, ulteriormente, desarrollarse como ciencia. En efecto, la forma genérica como en la bibliografía especializada se hace referencia al caos, es indistintamente como “teoría” o “ciencia”, y sin que haya incompatibilidad entre ambos términos.

El caos tiene aspecto de algo aleatorio. Pero, como advierte Lorenz, en realidad, “el caos consiste en cosas que *no son* de verdad aleatorias, sino que *sólo lo parecen*” (Lorenz: 2000: 3). Precisamente por esta razón se habla, en rigor, de caos determinista. Pues bien, es debido al caos determinista que los ejemplos sencillos en el mundo son aquellos juegos¹⁰ que aparentan basarse en el azar. En otras palabras, no *hay* sistemas caóticos, sino, se trata de sistemas –exactamente los mismos sistemas que la ciencia y la filosofía tradicionales habían considerado desde siempre-, que *se comportan* caóticamente.

¹⁰ La referencia directa es aquí a la teoría de juegos, una teoría de origen matemático con fuertes implicaciones en dominios como la economía, la política y la dinámica social, al igual que en las relaciones internacionales, por ejemplo. Aquí, es suficiente con recordar que la teoría de juegos distingue tres clases de juegos: los juegos cooperativos, los juegos no-cooperativos, y los juegos de azar. “Juego” es el concepto empleado para designar interacción social. El problema fundamental en la teoría de juegos es el de cómo juegos no-cooperativos pueden dar lugar a juegos cooperativos. Esta línea de desarrollo conduce, al cabo, a un encuentro entre la teoría de juegos, que originalmente no tiene nada ni sabe de complejidad, con las ciencias de la complejidad. Este encuentro es posible gracias a la obra más reciente de R. Axelrod.

Los sistemas caóticos son altamente sensibles a las condiciones iniciales y responden a la presencia de un atractor. Los tipos de atractores que se suele identificar en el estudio del caos son el atractor fijo, el periódico y el atractor extraño. En realidad, los dos primeros sirven como grupo de control, por así decirlo, puesto que el verdaderamente significativo es el atractor extraño. En una conferencia en 1972 Lorenz denominó como “efecto mariposa” a este tipo de atractor, cuya principal característica radica en el hecho de que las trayectorias que realiza el sistema que se comporta caóticamente son siempre irrepetibles. Las propiedades más importantes de los atractores extraños son topológicas.

La enseñanza más importante de los sistemas o comportamientos caóticos es la de la impredecibilidad. Los sistemas caóticos son impredecibles; pero no por ello, inteligibles. El descubrimiento de la impredecibilidad tiene consecuencias de gran impacto en especial en el dominio de la filosofía de la ciencia. En efecto, mientras que la tradición aristotélica enseñó que sólo puede haber ciencia de lo universal y que, por tanto, la ciencia tan sólo se ocupa de fenómenos y procesos universales por necesarios, el caos introduce una ruptura radical en aquella tradición, pues enseña que es en efecto posible hacer ciencia de lo particular y contingente. La meteorología es el primer ejemplo, pero a ella suceden otros múltiples ejemplos, todos los cuales vienen a alterar significativa e irreversiblemente tanto el orden y la clasificación de las ciencias, como las relaciones ciencia-sociedad. Adicionalmente, y en contraste con la ciencia clásica, el caos enseña, igualmente, que la ciencia no consiste en ni culmina en la elaboración de predicciones. Por el contrario, lo propio de la ciencia es la de llevar a cabo *explicaciones*. Predecir no es explicar, y la predicción es tan sólo un valor agregado de la actividad de la ciencia, pero no su fundamento ni su finalidad.

La dinámica del caos es exactamente la dinámica de flujos, y así, las matemáticas necesarias para explicar los flujos son ecuaciones diferenciales. Esto significa que sistemas gobernados por ecuaciones matemáticamente simples pueden exhibir un comportamiento altamente complejo e impredecible. Sin embargo, el aporte principal del caos a las matemáticas consiste en el hecho de que ellas inauguran, o bien, terminan por sentar los fundamentos, para las nuevas matemáticas, esto es, las *matemáticas cualitativas*. Así, no es ya cierto ni tampoco deseable identificar a las matemáticas con

fórmulas y datos numéricos, puesto que es igualmente posible comprenderlas de modo cualitativo. En una palabra, el caos incorpora la dimensión cualitativa a la cuantitativa, y ambas dimensiones configuran una sola unidad. El caos se sitúa, así, en la misma longitud de onda que la termodinámica del no equilibrio o que la teoría de catástrofes, por ejemplo, al mostrar la coimplicación entre ciencia y filosofía, dado que la dimensión cualitativa de la ciencia no es sencillamente otra cosa que su envergadura filosófica. Así, lo que la Edad Media y la modernidad habían separado y contrapuesto, aparece ahora integrado y complementario.

El tipo de equilibrio que descubre el estudio del caos y con el que de hecho trabaja es, consiguientemente, un equilibrio inestable. El tema del movimiento –que nace en Occidente con Heráclito y que había permanecido secundario u oculto debido al peso de la tradición platónico-aristotélica, triunfante a la postre- y, más exactamente, del cambio, se revela, por primera vez, como relevante y necesario. Y con el cambio, de manera más precisa, su carácter inesperado e irreversible. La categoría con la que se designa aquí y en lo sucesivo al movimiento y al cambio es la de *turbulencia*. Así, las turbulencias y las inestabilidades alcanzan el nivel de y el espacio de una teoría, a saber: la teoría de turbulencias. Las turbulencias son flujos irregulares. De esta suerte, las regularidades y los estados fijos, que habían sido la norma en la racionalidad occidental hasta el momento, se ven reducidos a momentos locales y fortuitos. El tipo de sistemas de los cuales se ocupa la ciencia del caos son sistemas disipativos, una categoría que se debe en sus comienzos a Prigogine, pero que resulta de inmenso valor lógico, metodológico y heurístico en muchas otras teorías y modelos explicativos, comenzando por el caos.

Es importante atender a un fenómeno que no fue nunca atendido suficientemente por la ciencia, la filosofía y la cultura tradicionales desde los orígenes de Occidente hasta la emergencia de las ciencias de la complejidad y en particular del caos: los errores. Pues bien, el caos muestra de manera suficiente que los errores –por ejemplo errores de medición- nunca permanecerán pequeños, sino que pueden amplificarse de manera significativa e irreversible. Un pequeño error puede conducir a un fenómeno determinado a una trayectoria caótica, debido a la sensibilidad ante las condiciones iniciales y ante la presencia de un atractor extraño.

El núcleo de estudio y trabajo en el caos consiste en la búsqueda y la identificación de atractores extraños. Esta labor es extremadamente difícil y, sin embargo, su importancia teórica y práctica difícilmente escapa a una mirada reflexiva. El estudio cualitativo de comportamientos inestables y aperiódicos en sistemas dinámicos no-lineales se revela como un asunto con serias implicaciones teóricas –científicas y filosóficas, por ejemplo-, pero igualmente prácticas –políticas, económicas, militares, por ejemplo-. El caos es, en consecuencia, uno de los mejores y pocos ejemplos en la historia de la ciencia en los que puede apreciarse que una teoría o un modelo explicativo *es o tiene* serios alcances y repercusiones prácticas. Son pocos los ejemplos que la ciencia clásica podría aportar en este sentido.

En esencia, la teoría del caos no introduce, en manera alguna, ningún postulado nuevo acerca del mundo, pues los modelos caóticos están construidos sobre el mundo clásico, usando ecuaciones de modelación para explicar los flujos y las turbulencias, los comportamientos aperiódicos y los sistemas disipativos. Un ejemplo de estas ecuaciones son las fórmulas Navier-Stokes o el exponente de Lyapunov.

D. Ruelle afirma de manera puntual: ya no se trata de “identificar los *periodos* de los modos [de turbulencia, C.E.M.], sino los *tiempos característicos* de separación de dos evoluciones temporales del sistema que comienzan con condiciones iniciales próximas. He aquí un progreso conceptual importante” (1995: 81). A partir de este reconocimiento, el tema sería sencillamente el de ver las extensiones y aplicaciones de modelos caóticos a distintas ciencias, disciplinas y campos del mundo y de la naturaleza. Este trabajo ya se ha hecho prolijamente y existe una amplia bibliografía al respecto, que atraviesa prácticamente todas las ciencias, disciplinas y prácticas.

3.3. La tercera de las ciencias de la complejidad es la geometría de fractales, desarrollada gracias a B. Mandelbrot en 1997.

El surgimiento de la geometría de fractales es un caso paradigmático en la historia de la ciencia. En efecto, como es sabido, la mayoría de las teorías científicas son el resultado de, y aparecen como, un artículo científico (*paper*). Sin embargo, la teoría de fractales fue presentada por su autor en un voluminoso texto de más de 600 páginas –*La geometría fractal de la naturaleza*- en 1977. Sin embargo, es de interés observar

algunos de los antecedentes de esta geometría. Entre ellos, Mandelbrot destaca principalmente la obra y el pensamiento de Leibniz, Cantor y Poincaré, pero también a Brown (movimiento browniano) y Einstein. Aunque menos conocidos, Mandelbrot resalta asimismo su deuda –una deuda en su propia biografía intelectual, en realidad para con autores como Louis Bachelier, Fournier d’Albe, Harold E. Hurst, Paul Lévy, Lewis Fry Richardson y George K. Zipf (a quien debemos las famosas leyes de Zipf o leyes de potencia, determinantes en el estudio de los fenómenos no-lineales y autoorganizativos).

Mientras que toda la historia de la ciencia y la filosofía reconocen, pero descartan el estudio y la importancia de las formas irregulares, Mandelbrot se aboca a la tarea, por primera vez, y de una manera sistemática y novedosa, por estudiar lo “amorfo”, esto es, las formas irregulares, los “sólidos imperfectos”, en fin, las rugosidades y sinuosidades, primero en la naturaleza y luego también en el mundo social humano. El lugar para este estudio no puede, por tanto, ser otro que la geometría. Este es un rasgo importante que, heredero de Poincaré y de Einstein, marca de manera definitiva, el modo de pensar propio de la ciencia del siglo XX –y XXI-. La naturaleza, en contraste con lo que enseñó la tradición platónico-aristotélica, heredera de la escuela de Pitágoras y, por tanto, también de Euclides, no está constituida por sólidos perfectos y regulares, y proseguida en la modernidad a través de la evolución continua característica de la dinámica de Newton. Esto es, de la mecánica clásica.

En contraste, esta clase de formas y estructuras regulares y/o perfectas son la excepción; en realidad, son una abstracción, por parte de la razón. Por esta razón, toda la ciencia y la filosofía tradicionales afirman necesidad, regularidad, periodicidad, en fin, equilibrio. Las ciencias sociales son en realidad el eco lo que afirman y repiten las ciencias básicas, la lógica y la filosofía tradicionales. Mandelbrot denomina a esta irregularidad, a esta dimensión “amorfa”, como fractal.

La geometría de fractales es heredera directa del estudio de la turbulencia, un área explorada originariamente por físicos y matemáticos tales como Weiszäcker, Kolmogorov, Obukhov y Onsager, a partir de los años cuarenta del siglo XX. Mejor aún, de acuerdo con Mandelbrot (1996: 135 y sigs.), la geometría de fractales, o más

genéricamente, el estudio de los objetos fractales proporciona la base geométrica que le hacía falta a la teoría de la turbulencia.

Existen distintos tipos de fractales. Las más útiles implican *azar* y, por tanto, sus regularidades como sus irregularidades son estadísticas (Mandelbrot, 1997). Las formas más usuales son *escalantes*, lo cual significa que su grado de irregularidad y/o fragmentación es idéntico en todas las escalas. La tradición posterior a Mandelbrot preferirá el término de autosimilitud, a cambio del de escalantes.

Propiamente hablando, de acuerdo con Mandelbrot, “la geometría fractal *no* es una ‘aplicación’ directa de la matemática del siglo XX. Es una nueva rama nacida tardíamente de la crisis de la matemática que comenzó cuando duBois Reymond (1875) llamó la atención por primera vez sobre una función continua y no diferenciable construida por Wierstrass. Dicha crisis duró aproximadamente hasta 1925, siendo los principales actores Cantor, Peano, Lebesgue y Hausdorff. Estos nombres, así como los de Besicovitch, Bolzano, Cesàro, Koch, Osgood, Sierpinski y Urysohn, no suelen aparecer en el estudio empírico de la naturaleza, pero yo afirmo que el impacto de la obra de estos gigantes trasciende, con mucho, los objetivos que se propusieron inicialmente” (1997: 18).

La matemática de la que es heredero y deudor Mandelbrot es, en verdad, antigua, pero nunca había tenido ninguna aplicación, excepto por el movimiento browniano. A fin de entender esta idea, es fundamental tender al hecho de que pensar matemáticamente no es, contra la primera impresión producto de una creencia cultural errónea, pensar en números, fórmulas y teoremas. En rigor, pensar matemáticamente equivale a pensar en estructuras, y según si éstas se conservan o se transforman. El lenguaje numérico de las matemáticas cumple una función eminentemente económica, a saber: comprime lo que requeriría muchas palabras para ser expresado. Tales son las ecuaciones, los teoremas, las fórmulas.

Un fractal es un objeto con una dimensión no integral, esto es, no entera. Existen diversos tipos de fractales. Están, por ejemplo, los fractales escalantes y los no escalantes, los fractales imagen de sí mismos, los fractales aleatorios estratificados –que son aquellos constituidos por superposición de estratos, cada uno con detalles más

refinados que el anterior-, los fractales brownianos fraccionarios –como por ejemplo las descargas fluviales anuales, las redes escalantes y los ruidos escalantes-. Habría que recordar aquí que el movimiento browniano es en esencia una sucesión de pequeños desplazamientos mutuamente independientes e isótropos, esto es, que todas las direcciones son igualmente probables.

La autosimilitud constituye, por tanto, el rasgo más destacado y general en el estudio de los fractales. Esta propiedad significa que a niveles menores un mismo objeto se parece a sus partes de mayor tamaño, o viceversa. Es justamente esta autosimilitud la que produce la relación escalar. Por lo general, la relación escalar tiene la forma de una ley de potencia (*power law*), algo que nos remite a Zipf¹¹. Ahora bien, una dimensión fractal es una medida cuantitativa de la autosimilitud y de la relación escalar. Esta dimensión nos dice qué tantas nuevas partes de un objeto nos encontramos, cuando examinamos un objeto con resoluciones más finas. En rigor, la dimensión fractal hace referencia al espacio que llena las propiedades de un objeto. Es importante observar, adicionalmente, que los fractales poseen propiedades estadísticas sorprendentes, y estas propiedades son descritas mediante distribuciones estables (Liebovitch, 1998).

Ahora bien, ¿cómo se aborda el azar en el marco de la geometría de fractales? Mediante el cálculo de probabilidades, ya que es el único modelo matemático a disposición cuando queremos entender lo desconocido y lo incontrolable. De hecho, Mandelbrot distingue dos tipos de azar: el azar errante y el azar benigno, y es sobre el segundo sobre el que concentra sus análisis. Así, el azar benigno –o “inocuo, fácilmente controlable”-, designa a aquél en el que se puede confiar en que no producirá ninguna de las configuraciones variadas y disparatadas del azar errante.

Tal y como es sabido desde el estudio del caos, pero también –y particularmente de los fractales-, todo atractor extraño es un fractal o tiene una estructura fractal. De esta suerte, existe una sólida relación entre el estudio del caos y la geometría de fractales. Esta relación se hace evidente desde la propia obra de Mandelbrot (y no tanto desde la de Lorenz o Ruelle, por ejemplo). De hecho, el concepto de “extrañeza” –en la expresión “atractor extraño”-, deja de ser, gracias a la geometría de fractales, un

¹¹ Para una comprensión de las leyes de potencia en el estudio de dinámicas sociales, véase Maldonado, C. E., “La lógica del multilateralismo. Una red dinámica compleja”, en: *Oasis*, 2004-2004.

concepto topológico para convertirse en un concepto fractal. En verdad, basta con recordar que los fractales no son más extraños que las costas o las montañas, por ejemplo.

Ahora bien, ¿de qué manera cabe resaltar, a plena luz del día, la relación entre la geometría de fractales y la complejidad? Hay una puerta directa de comunicación, con todo y que es algo técnica. Se trata de las relaciones entre la geometría de Mandelbrot y los trabajos de Kolmogorov y Chaitin, centrados específicamente en torno a los algoritmos matemáticos; o más exactamente, a la comprensión de la complejidad con criterios algorítmicos. Kolmogorov y Chaitin coinciden en suministrar una medida de la complejidad, a saber: justamente la medida algorítmica¹².

Otra manera, acaso más elemental para establecer aquella relación, hace referencia a la multiescalaridad, o más exactamente, a la invariancia por cambios de escala. Esta idea significa sencillamente que, contrariamente a lo que de manera tradicional se afirmó, los cambios de escala de un fenómeno no generan cambios sustanciales ni en el fenómeno ni en la observación del mismo, sino, por el contrario, una vez que se ha reconocido la especificidad de la dimensión fractal, los cambios de escala enriquecen al objeto y al observador. Puntualmente dicho, la geometría de fractales consiste en una aplicación de lo infinitesimal a lo finito, y así, la invariancia resultante nos revela un universo pletórico de formas y estructuras, todas sólidamente conectadas entre sí, a pesar de su irregularidad y movilidad.

3.4. La cuarta de las ciencias de la complejidad es la teoría de las catástrofes, desarrollada por R. Thom. Se considera por lo general el año de 1977 como la consolidación de la teoría de las catástrofes, cuando Thom publica *Estabilidad estructural y morfogénesis*. Sin embargo, la obra de Thom comienza en 1951 cuando escribe su tesis doctoral sobre topología. Habiendo publicado pocos artículos, Thom desarrolla la topología hasta dar origen a la teoría del co-bordismo, gracias a la cual recibe en 1958 la Medalla Fields (el premio Nóbel en matemáticas).

¹² De hecho, cuando en la obra de Mandelbrot aparece el término de complejidad, se hace referencia a las curvas de Koch, y el término no tiene la connotación que hemos considerado en este texto.

A finales de la década de los cincuenta, Thom se concentra en el estudio de las relaciones entre el cálculo de variaciones y las singularidades topológicas, un tema desarrollado originariamente por el topólogo H. Whitney, de Princeton. “Singularidad” es el término empleado para designar un punto en el gráfico de una curva donde la dirección o la cualidad de la curvatura cambia. A partir de estas ideas, Thom se dedica al desarrollo de una teoría general de los modelos, tomando como base o hilo conductor la estabilidad estructural y las relaciones entre estabilidad e inestabilidad. Mejor aún, destacando la producción de formas y estructuras inestables como regla, antes que como excepción.

El concepto de “teoría de las catástrofes” no se debe a Thom, sino a E. Ch. Zeeman, y existe un debate fuerte entre Zeeman y Thom acerca del real y adecuado significado de las catástrofes. Lo que constituye el interés de Thom es la formación de profundos principios de estabilidad estructural en áreas tan diversas como la biología y el lenguaje mismo, principios análogos a los que tienen lugar en la física. Sin embargo, entre los antecedentes más claros de la teoría de catástrofes se encuentran C. H. Waddington, profesor de genética animal de la Universidad de Edimburgo, y el trabajo pionero de D’Arcy Thompson (que se encuentra también en la base de las biomatemáticas).

El campo general del estudio de Thom son las formas, razón por la cual comprenderlas equivale exactamente a geometrizar. La suya no es y no quiere ser otra cosa que una teoría morfológica, esto es, una teoría de las formas. Para ello, el trabajo de construcción de espacios y de diversas funciones se revela como esencial. Es exactamente en este punto en donde se produce una de las innovaciones más importantes de la obra de Thom: la teoría del cobordismo, que se ocupa de saber “cuándo dos variedades constituyen precisamente el límite común de una misma variedad” (Thom, 1993: 25).

Ahora bien, la teoría de las catástrofes se inicia en la matemática, pero no es matemática. Contra la idea de tipo fisicalista según la cual lo primero es el espacio-tiempo, Thom resalta que la entidad primitiva es el fenómeno visto por un observador. Pero, dado que existen o pueden existir varios (o muchos) observadores sobre un mismo fenómeno, el problema consiste, entonces, en sintetizar las distintas versiones que tenga cada observador. Esa labor de síntesis es la teoría de las catástrofes. Por consiguiente, se

trata de una *teoría cualitativa*, y en cuanto tal se encuentra en el mismo plano que la teoría de las bifurcaciones. De esta forma, el tema grueso consiste en las transiciones orden/desorden, y que es, por lo demás, la manera genérica de designar el objeto de trabajo en las ciencias de la complejidad.

En la misma dirección, la teoría de las catástrofes no es, de acuerdo con Thom, una teoría científica en el sentido corriente de la palabra. Thom prefiere designar a las catástrofes como una *metodología*, “o acaso una especie de lenguaje, que permite organizar los datos de la experiencia en las condiciones más diversas”. En otras palabras, no existen argumentos experimentales a favor de la teoría de las catástrofes. En otros lugares, Thom designa a su teoría como una teoría hermenéutica que, ante cualquier dato experimental, se esfuerza por elaborar el objeto matemático más simple que pueda generarlo.

Esta teoría se ocupa de describir las *discontinuidades* que pudieran presentarse en la evolución de un sistema. Thom compendia estas discontinuidades, precisamente, con el concepto de *catástrofes*, el cual, en francés, no tiene absolutamente ninguna connotación negativa o desastrosa como sí sucede en español¹³. Thom identifica siete catástrofes elementales, así (Woodcock y Davis, 1994):

- Catástrofe de pliegue, que es aquella que representa la conducta de todos los sistemas que dependen de una sola condición variable o factor de control;
- Catástrofe en cúspide, que ocurre en sistemas cuya conducta depende de dos factores de control;
- Catástrofe en cola de milano, que puede usarse como modelo de procesos en sistemas en los que la conducta depende de tres factores de control;
- Catástrofe en mariposa, que depende de cuatro factores de control;
- Catástrofe umbílica hiperbólica, que tiene cinco dimensiones;
- Catástrofe umbílica elíptica, tiene igualmente cinco dimensiones;
- Catástrofe umbílica parabólica, que posee seis dimensiones. Las tres últimas tienen, en lugar de un eje de conducta, dos, de suerte que la transición

¹³ El término para designar en francés aquello que en español se entiende como “catástrofe” es, más bien, el de *débauche*.

catastrófica debe imaginarse no como el salto de un punto a lo largo de una línea recta, sino como una línea saltando en un plano.

La expresión “elemental”, en referencia a estos siete modelos, designa sencillamente las formas básicas o fundamentales, pero no sencillas o simples.

Las catástrofes son generadas por bifurcaciones, lo cual significa propiamente que una morfología se produce en el conflicto entre dos o más atractores. Pero, entonces, el problema radica “en aclarar la naturaleza de las bifurcaciones *genéricas*, de las bifurcaciones *estructuralmente estables*” (Thom, 1993: 80). Desde luego, aquellas que interesan a Thom son las segundas. Con todo, es preciso reconocer que la noción de estabilidad estructural es demasiado sutil para la mayoría de las situaciones concretas, tanto del mundo como de la ciencia.

“La teoría de las catástrofes ofrece una metodología que permite, en cierta medida, enfrentarse a problemas de carácter filosófico con métodos de carácter geométrico y científico, que apelan a las técnicas de la topología diferencial y de la geometría diferencial” (*ibid.*: 93). En este contexto, es importante atender a la advertencia que hace Thom al comienzo de su libro fundamental. El desarrollo de una teoría general de los modelos, esto es, de la relación entre estabilidad estructural y morfogénesis (1997), está dirigido a especialistas de disciplinas rebeldes a toda matematización como la biología y las ciencias humanas. El hilo conductor es la evolución de las formas.

Los modelos matemáticos que son el objeto de la teoría de las catástrofes atribuyen toda morfogénesis a un conflicto, a una lucha entre dos o varios atractores. Desde este punto de vista, Thom no duda en recuperar la tradición proveniente de Anaximandro y Heráclito, y sitúa a su propia teoría como formando parte de ese estilo de pensamiento. Por la misma razón, la consecuencia más general del estudio de las catástrofes exige ser puesto con claridad a la luz del día, sobre la mesa: “*Las situaciones dinámicas que rigen la evolución de los fenómenos naturales son fundamentalmente las mismas que las que rigen la evolución del hombre y de las sociedades.* En la medida en que se utiliza la palabra conflicto como término que expresa una situación geométrica bien definida en un sistema dinámico, nada se opone a emplear ese término para describir rápidamente y cualitativamente una situación dinámica dada” (Thom, 1997: 337).

La afirmación más radical de parte de Thom consiste en el llamado a la necesidad de desarrollar una teoría de las formas. Es claro que hay profesiones y disciplinas que pueden trabajar sin una teoría, pero cuando ello sucede, no es muy claro de qué manera pueda hablarse de progreso en el conocimiento o de progreso en la ciencia. La derivación de esta idea es altamente significativa: sólo puede hablarse de progreso en la ciencia si cambia nuestra vida, es decir, si hace la vida más grata y mejor (Thom, 1993: 55 y sigs.)¹⁴.

Ahora bien, a la luz del pensamiento de Thom, es importante distinguir lo que depende de nosotros y lo que no depende de nosotros, lo cual no es sino una manera vaga para hablar de indeterminismo y determinismo, respectivamente. Lo que depende de nosotros es la variable, el argumento de la función, y aquello que no depende de nosotros es el determinismo rígido que determina el correspondiente valor de la función. El concepto de función designa más una imagen que un concepto.

Esta distinción mencionada tiene serias consecuencias de orden filosófico. Notablemente, se trata de la discusión en torno al debate determinismo-indeterminismo, y que categorialmente hablando se conoció (y se conoce, mejor) como el debate determinismo-emergencia. Las dos principales figuras de este debate fueron Prigogine y Thom, específicamente a partir de un artículo escrito por Thom con el título: “Alto al azar – silencio al ruido” (*Halte au hazard – silence au bruit*). En este artículo Thom argumenta en contra de la idea de Prigogine de “orden a partir del caos”¹⁵. La posición de Thom, y por consiguiente de la teoría de las catástrofes, es la de una defensa del determinismo. Más directamente, Thom no cree en el indeterminismo, ni por consiguiente en los problemas que giran alrededor de la libertad (Pomian, 1990).

(Para una reiteración del debate entre Prigogine y Thom, pero en otros términos y en un contexto diferente, véase el artículo de Thom “Determinismo e innovación”, y el de Prigogine, con el título “Enfrentándose con lo irracional”, así como el debate “Determinismo y libertad” en: Wagensberg (1986)).

¹⁴ Las referencias entonces a la fenomenología de Husserl, se hacen inevitables. Vale mencionar, de pasada, que el término “fenomenología” aparece con mucha frecuencia en la obra de Thom.

¹⁵ Este es el título en inglés del libro de Prigogine y Stengers *La nueva alianza: Order out of Chaos*.

Para terminar por lo pronto, quisiera precisar, de manera puntual, el debate Thom-Zeeman, acerca de los orígenes y, en particular, la naturaleza de la teoría de las catástrofes. Este debate, recogido por prácticamente toda la bibliografía *sobre* catástrofes, se encuentra compendiada en Zeeman (1977), capítulo 21: “Catastrophe Theory: Its Present State and Future Perspectives” (págs. 615 y sigs.). La importancia de este debate no se concentra tanto en el origen del concepto de “teoría de las catástrofes”, que ya se mencionó, sino, por el contrario, en la extensión misma y el sentido de la teoría.

Mientras que Zeeman, quien mantuvo sólidos nexos de amistad con Thom, reconoce que los principales aportes de Thom provienen de las matemáticas, sus propias contribuciones a la teoría provienen del campo de las ciencias sociales y humanas, la biología, la psicología, la sociología y la economía. El modo grueso como ello tiene lugar, es atendiendo a la dinámica de cambios catastróficos (= súbitos e irreversibles) y sus efectos divergentes. En general, dado el hecho de que ciencias como la biología y la mayoría de las ciencias sociales carecen de una teoría en el sentido más fuerte y riguroso de la palabra, el recurso a modelos, y notablemente, a una teoría general de los modelos, que es lo que caracteriza en propiedad a la teoría de las catástrofes, puede ser altamente productivo. Extrapolando podemos decir: este recurso es altamente útil, mientras se alcanza, por lo menos por parte de cada una de las ciencias sociales, una teoría propia y fuerte. Ello, para no hacer mención de una teoría general de los sistemas sociales humanos. Tendremos la ocasión de volver, más adelante, sobre esta idea.

3.5. En quinto lugar, como componentes de las ciencias de la complejidad cabe hacer mención de las lógicas no-clásicas. Sin embargo, esta introducción, por parte nuestra de las lógicas no-clásicas como constitutivas del conjunto de las ciencias de la complejidad requiere de una justificación.

La ciencia y la lógica, como por lo demás la lógica y la filosofía, son cosas diferentes, aunque no contrapuestas. No es posible identificar la ciencia, o una teoría científica, y ni siquiera un modelo explicativo con la lógica; por ejemplo, con principios, criterios o procedimientos lógicos. Supuesta en aquellos, la lógica es diferente de ellos.

Por así decirlo, la lógica es el esqueleto del cual dependen, como soportes, todos los órganos tejidos y miembros, así como su dinámica y articulaciones. Pero la vida misma del organismo no coincide con ni se funda en la lógica, aun cuando sí presupone, de manera necesaria al esqueleto. Pues bien, esta observación es válida tanto para la lógica clásica como para las lógicas no-clásicas.

Existe una razón precisa por la cual las lógicas no-clásicas merecen un lugar en el cuadro histórico-conceptual que hemos elaborado. Se trata del hecho de que son lógicas de sistemas abiertos. Ésta es la importancia del conjunto de las lógicas no-clásicas en el contexto de la complejidad.

En efecto, mientras que la lógica formal clásica es deductiva y da prevalencia a modelos, teorías y explicaciones de corte hipotético-deductivo, las lógicas no-clásicas no responden necesariamente a la deducción o, lo que es equivalente, la deducción no figura como fundamento del trabajo ni de los temas y problemas en estas lógicas. Existe, por tanto, una notable distancia entre estas lógicas y aquellos postulados que se fundan en Euclides, que se formalizan con Aristóteles y que culminan en la pretensión de Hilbert.

Se denominan lógicas no-clásicas –y en ocasiones, sistemas alternativos de notación–, aquellas lógicas que incorporan, trabajan o se fundan en temas, conceptos y problemas que fueron dejados de lado, por cualquier razón, por parte de la lógica formal clásica. En verdad, la lógica clásica, que se origina en Aristóteles, tiene una historia (Bochenski, 1968; Kneale and Kneale, 1984) que involucra numerosos autores y en la que hacen presencia diversos aportes a los fundamentos establecidos desde la antigüedad. Sin embargo, temas tales como el tiempo, la intuición, los contextos de relevancia, la incertidumbre o la indeterminación, en fin, las inconsistencias y la pluralidad de valores y su difusividad no fueron estudiados o bien nunca fueron siquiera vistos por parte de la historia de la lógica. Existe una discusión filosófica acerca de las relaciones entre la lógica clásica y las lógicas no-clásicas, y que debate si éstas son complementarias a aquélla, o bien si son rivales u opuestas (Haack, 1991). Esta discusión no ha concluido y no es éste el lugar para entrar en ella. Lo relevante es el hecho de que existen varios entrecruzamientos entre algunas de las lógicas no clásicas, por ejemplo, hay lógicas

polivalentes que son a la vez paraconsistentes; mecánica cuántica y lógicas paraconsistentes.

Quisiera presentar de manera puntual un cuadro de las lógicas no-clásicas, y específicamente, de aquellas que son relevantes para el estudio de los sistemas complejos no-lineales. Así, destacaré a la lógica paraconsistente, la lógica de la relevancia, la lógica modal, las lógicas polivalentes, y dentro de éstas en especial a la lógica difusa, la lógica temporal y la lógica cuántica.

En el contexto del estudio de los sistemas complejos no-lineales, la relevancia de las lógicas no-clásicas se hace manifiesta, en particular, gracias al diálogo de N. Da Costa – padre de las lógicas paraconsistentes- con los temas planteados por Turing y apropiados y desarrollados de un modo especial, posteriormente, por R. Penrose. Es posible, sin embargo, observar otros vasos comunicantes entre las lógicas no clásicas y las ciencias de la complejidad. Sin embargo, no existe un texto que de manera directa e inmediata establezca esta conexión¹⁶.

La presentación a continuación de las más importantes lógicas no-clásicas de cara al estudio de la dinámica no-lineal no implica necesariamente una jerarquía (Alchourrón, 1995). Debido al carácter histórico-conceptual de esta sección, debo, sin embargo, presentar las lógicas no-clásicas de una manera puntual. Una exposición más detallada y un comentario acerca suyo, más amplio, relativamente al estudio, puntual, de los sistemas complejos no-lineales, es una tarea que debe quedar para otro momento. Aquí, sea suficiente con el cuadro general que se presenta a continuación.

3.5.1. La(s) lógica(s) paraconsistente(s) es (son) la primera conexión fuerte con la idea de sistemas abiertos y, por consiguiente, complejos. Los antecedentes de esta lógica se remontan a Heráclito, Hegel, Marx; Meinong (1907), Lukasiewicz y Vasilev (1910), Jaskowski (1948). El problema central de estas lógicas es el reconocimiento de la importancia e incluso la utilidad de la inconsistencia, las paradojas o las aporías. Se trata, en otras palabras, de la lógica de teorías inconsistentes, pero no triviales.

¹⁶ Este es el tema de un trabajo que adelanto en la actualidad, como parte de un proyecto de investigación, en el CIPE en la Universidad Externado de Colombia.

El origen y desarrollo de las lógicas paraconsistentes se encuentran en N. da Costa (1963-) y la Escuela brasileña desarrollada por él, N. Rescher y R. Brandon (1964), N. Belnap (1977), Pinter (1980), Mortensen (1990). El ámbito principal en el que se ha desarrollado esta lógica es alrededor de los temas y problemas de la ontología, la física, la psicología y la inteligencia artificial. El nacimiento de las lógicas paraconsistentes tiene que ver, primero, con las lógicas polivalentes y después también con la lógica intuicionista (Bobenrieth, 1996).

3.5.2. La lógica de la relevancia es igualmente importante en el acercamiento a los sistemas caracterizados por complejidad creciente. El problema central de esta lógica es la de constituir una alternativa a la lógica clásica en la formalización del discurso ordinario; es una lógica esencialmente relativa. En verdad, el campo de trabajo de toda la lógica – clásica y no-clásica- es el lenguaje, a partir de una distinción de base entre el (o los) lenguaje(s) natural(es) y el (o los) lenguaje(s) artificial(es). Pues bien, la lógica de la relevancia quiere ser una alternativa a la formalización de los lenguajes naturales a partir del reconocimiento de los contextos (= relevancia) del propio lenguaje. Estos contextos definen la relatividad de los juegos de lenguaje.

Entre los antecedentes de esta lógica se destacan la filosofía analítica (específicamente a partir de la distinción entre lenguajes naturales y lenguajes artificiales), así como la disputa entre el intuicionismo y el formalismo lógico. Su origen y desarrollo es posible gracias al trabajo pionero de Ackermann (1956), y Anderson y Belnap (1962 y años después).

3.5.3. La lógica modal, por su parte, consiste en el estudio de las modalidades de verdad o de falsedad, que son: la necesidad, la posibilidad, la contingencia y la imposibilidad. Así, en contraste con la lógica formal clásica, no es ya cierto que los únicos valores sean los de verdad y falsedad, puesto que se asume, además, la importancia de la modalización de los mismos. Mientras que la falsedad carece de modalidades, la posibilidad, la contingencia y la imposibilidad son modalidades de la verdad.

Los antecedentes de esta lógica comprenden cuatro periodos, así: a) como prehistoria, deben mencionarse el nombre de Aristóteles hasta el año 1912 cuando C. I. Lewis desarrolla los primeros trabajos; posteriormente, la etapa sintáctica comprende los años 1912-1959 y los representantes más destacados son Lewis, Gödel, y von Wright; la tercera

etapa se denomina la etapa semántica, y cubre el período entre 1959 y los años sesenta, principalmente con los trabajos de S. Kripke, Hintikka; finalmente, la etapa de la metalógica modal generalizada, que es el momento cumbre, abarca desde finales de los años sesenta hasta hoy, y se condensa en los nombres y obra de Lemmon y Scott, Segerberg, Goldblatt, Van Benthem, Jansana.

3.5.4. Las lógicas polivalentes y un capítulo suyo muy destacado, la lógica difusa, pueden mencionarse en cuarta instancia. El problema central consiste en establecer qué y cómo existe un cierto campo fronterizo entre la verdad total y la total falsedad. Este campo está conformado por sistemas trivalentes, y más hasta sistemas infinivalentes.

Entre los antecedentes se encuentran Heráclito, Platón, R. Lulio, N. de Cusa; Peirce, Gödel, Détouches-Février, Reichenbach; Zadeh. Sin embargo, su origen y desarrollo comprende los trabajos de Lukasiewicz (1920); Post (1921); Kleene (1932); Bochvar (1939); los enfoques matriciales de Malinowski, 1979, Rautenberg, 1979 y Urquhart, 1986, así como el estudio algebraico de la lógica.

Al interior de las lógicas polivalentes merece un lugar propio la lógica difusa, desarrollada originariamente por Zadeh. El problema central de esta lógica consiste en adoptar como función característica de un conjunto una que tome sus valores o imágenes en un conjunto de más de dos valores. Es importante señalar que ésta es la lógica que se encuentra en la base de las nuevas tecnologías y, en especial, de los desarrollos de la computación y de los sistemas basados en la computación (McNeill and Freiberger, 1993).

El origen y desarrollo de la lógica difusa es posible gracias a los trabajos de N. Rescher (1969), y en especial de L. Zadeh (1965). Sus principales aplicaciones y desarrollo se encuentran en esferas como la inteligencia artificial y las lógicas anotadas.

3.5.5. Una lógica particularmente importante es la lógica temporal, llamada en ocasiones también como lógica del tiempo (Gardies, 1979). El problema central de esta lógica consiste en mostrar qué y cómo el tiempo puede modificar, y de hecho modifica, el valor de verdad de las proposiciones. Así, mientras que el tiempo permanece en la lógica clásica como un motivo extralógico, es propio de la filosofía, la ciencia y la lógica

contemporánea, en particular en el curso del siglo XX, comprender que el tiempo también puede ser un motivo lógico –y no ya simplemente científico o filosófico–.

Entre los antecedentes de esta lógica, como por lo demás de varios de los motivos de las lógicas no-clásicas, es preciso mencionar, una vez más a Aristóteles, pero con él, también, posteriormente, a la Escuela Megárica. Sin embargo, el origen de esta lógica se encuentra en los trabajos de R. Prior en la década de los cincuenta. Y los temas, campos y áreas de trabajo cubren el cálculo de eventos, el razonamiento por defecto, las teorías de la programación.

3.5.6. Finalmente, en el cuadro aquí presentado, la lógica cuántica ocupa, de igual forma, un lugar destacado. El problema central de esta clase de lógica es el de determinar que la lógica cuántica es, en efecto, la lógica del mundo empírico, al modo como, por otra parte, la mecánica cuántica lo afirma.

En consecuencia, es inevitable considerar que entre los antecedentes de la lógica cuántica se hallan las herramientas formales, los conceptos y los problemas de la mecánica cuántica, la teoría de la relatividad –en particular la teoría general de la relatividad–, y el principio de incertidumbre de W. Heisenberg.

Sin embargo, el origen de esta lógica se encuentra en los trabajos de Birkhoff y von Neumann en 1936, el lenguaje semiinterpretado desarrollado por Van Fraassen hacia 1970, la semántica de S. Kripke, y la orto-lógica –que es una traducción de una lógica cuántica débil– de Goldblatt, en 1977.

Una vez expuesto el cuadro histórico-conceptual de las ciencias de la complejidad, se impone una observación final de alta importancia. Éstas son las ciencias de la complejidad. Otras teorías, modelos y campos de trabajo serán mencionados en la sección siguiente. Sin embargo, lo contrario no es cierto. Es decir, no es cierto que cuando se trabaja en caos, o en fractales, por ejemplo, se trabaje en sistemas complejos, pero cuando se trabaja con sistemas, fenómenos o comportamientos complejos sí es posible que se trabaje con, o se atravesase por, dominios como el caos o los fractales, por ejemplo.

4. CONCEPTOS Y PROBLEMAS, MODO DE TRABAJO Y RETOS DE LA COMPLEJIDAD

La forma básica de comprender a los sistemas complejos es en términos de dinámicas no-lineales. Pues bien, la no-linealidad significa que todo problema tiene más de una solución posible, y en consecuencia, la dinámica no-lineal hace referencia a comportamientos y procesos no deterministas, emergentes y autoorganizativos que dan lugar, precisamente, a sistemas de complejidad *creciente*. En otras palabras, en este marco, no existe una única solución –ni, por extensión, tampoco una solución óptima- a un problema determinado. Así, los criterios de maximización y de optimización de la racionalidad clásica, que tenían un carácter predominante, quedan reducidos al análisis de una situación y de un problema *local*.

Una característica –antes que una dificultad- en el estudio de los sistemas complejos no lineales y, por consiguiente, también un rasgo propio de las ciencias de la complejidad es que no existe una única comprensión o definición de complejidad. Por el contrario, las comprensiones y definiciones de complejidad varían de un autor a otro, de una tradición disciplinar a otra. No obstante, en términos básicos, podemos distinguir tres ideas generales de complejidad, así:

- Complejidad dinámica. Hace referencia a los procesos y evolución de un sistema o fenómeno caracterizado como de complejidad creciente. Aquí, lo relevante consiste en el trabajo de construcción o de reconstrucción histórica de la complejidad.
- Complejidad estructural. El aspecto destacado aquí es el de los componentes de un sistema y sus interacciones. En rigor, la complejidad es explicada como el resultado de las interacciones no-lineales entre las partes o los componentes de un sistema.
- Complejidad algorítmica. Esta es la comprensión de complejidad en términos de la información necesaria para describir el comportamiento de un sistema, o también, como la determinación del tipo de comportamiento –de evolución, notablemente-, que tiene un sistema para resolver un problema o para superar un problema determinado.

Pues bien, en cualquier caso, el problema más difícil en el estudio de la complejidad consiste en la medición misma de la complejidad. De hecho, la comprensión o definición de complejidad se encuentra en estrecha relación con el problema de la medición de la misma, de tal suerte que ambos se implican recíproca y necesariamente. Entre los trabajos y autores más destacados acerca de la medición de la complejidad, Kolmogorov y Chaitin se erigen como referentes obligados. Existe un consenso entre la comunidad de teóricos e investigadores sobre complejidad acerca de la importancia y el carácter pionero de los trabajos de Kolmogorov y Chaitin. El rasgo común a ambos consiste en la adopción de la medición de aleatoriedad como la medición de la complejidad misma de un sistema no-lineal.

Los conceptos constitutivos de la complejidad son múltiples. Aunque no cabe hacer una lista de los mismos –entre otras cosas debido a que, como toda lista, ésta quedaría incompleta, con seguridad-, sí cabe destacar los siguientes: autoorganización, emergencia, no-linealidad, irreversibilidad, tiempo y temporalidad, estructuras disipativas, recursividad, bucles de retroalimentación (positivos, notablemente) (Maldonado, 2001a).

Y. Bar-Yam destaca como propiedades centrales de los sistemas complejos la existencia de elementos (y su número), las interacciones –entre los elementos de un sistema- (y la fuerza de su interacción), los procesos de formación o de operación y sus escalas temporales, la diversidad o la variabilidad del sistema, el fenómeno o el comportamiento complejo considerado, la importancia del medio ambiente y sus demandas o exigencias sobre las partes del sistema considerado, en fin, igualmente, las actividades y los objetivos de las mismas, que tienen los elementos de un sistema dado. En rigor, la identificación de estas propiedades constituye un primer paso en el proceso de cuantificación de todas las propiedades de los sistemas complejos. Debe entenderse, por tanto, que esta línea de análisis es relevante cuando se atiende al tema de una complejidad cuantitativa.

De otra parte, de acuerdo con P. Anderson (1999), en el estudio de la complejidad se han destacado ocho caminos. Estos son:

- i) La moderna teoría matemática de la complejidad, y cuyos pilares son los trabajos pioneros de A. Turing y de J. von Neumann. Se trata de la teoría de la complejidad, tal y como se entiende desde las matemáticas y las ciencias de la computación;
- ii) La teoría matemática de la información de Shannon;
- iii) La teoría ergódica, los mapas dinámicos y la teoría del caos; esto es, se trata de la física, las matemáticas y las ciencias de la computación;
- iv) La vida artificial, un programa de trabajo iniciado por Th. Ray y C. Langton;
- v) Las multiplicidades aleatorias y la ergodicidad rota, las redes neuronales, los estudios sobre percolación, localización, y otros semejantes;
- vi) La criticalidad autoorganizada elaborada originalmente por P. Bak y, consiguientemente, los estudios sobre factales;
- vii) La inteligencia artificial y los campos afines como el estudio de sistemas expertos, los algoritmos genéticos y el trabajo con otras metaheurísticas;
- viii) El estudio del cerebro, humano o animal, y que se condensa en el título de “wetware” (programas húmedos), entre quienes se encuentran a J. Holland, G. Cowan y M. Gell-Mann.

Sobre estas ocho vías en el camino hacia la elaboración de una teoría (general) de la complejidad, es notable la ausencia, o por lo menos el lugar secundario que las ciencias sociales y humanas cumplen o han cumplido hasta el momento. Es imperativo, en consecuencia, hacer un énfasis acerca de las relaciones entre ciencias de la complejidad y ciencias sociales, poniendo un particular énfasis en el problema de la medición de los sistemas sociales humanos. Ésta es un área sobre la cual ya pueden anticiparse algunos pasos sólidos iniciales (Maldonado, 2004).

Ahora bien, es preciso recordar que al comienzo de este texto decíamos que el trabajo en complejidad es, por lo general, de dos tipos: teórico, y práctico o instrumental. Esta distinción, sin embargo, es puramente metodológica, puesto que en realidad, en el estudio de la complejidad ambas dimensiones están fuertemente entrelazadas. Con todo, en verdad, de ambos planos el más *generalizado* es el práctico o instrumental, a saber: la simulación y el modelamiento. Hay una razón histórico-cultural para ello. Se trata del desarrollo y la importancia creciente del computador y, en general, de la computación. Las ciencias de la complejidad al mismo tiempo responden a la importancia cultural del

computador, y contribuyen, de un modo específico, al desarrollo mismo de la computación, notablemente en el nivel de la programación y, por tanto, de las matemáticas –aplicadas-, que se encuentran en la base de la computación y la programación.

El plano teórico fue ya destacado en las iniciales de este trabajo. Quisiera, en consecuencia, concentrarme en lo sucesivo, en el plano práctico o instrumental del estudio de la dinámica no-lineal. Mis reflexiones se concentran, por tanto, en el modo de trabajo en complejidad vinculado a, derivado y dependiente de, el computador.

Es posible elaborar una analogía. Así como la regla y el compás fueron determinantes para el desarrollo del pensamiento matemático, y en consecuencia filosófico y epistémico, de los griegos; de la misma manera que el lápiz y el papel fueron importantes en el tipo de pensamiento –notablemente en la lógica- del medioevo; de la misma forma en que la impresora fue determinante para la salida de la Edad Media y el desarrollo de la modernidad; pues bien, análogamente, el computador es la herramienta –cultural-, determinante para el surgimiento de, y el trabajo con, las ciencias de la complejidad. Nadie ha llamado tan vivamente la atención en este último sentido como H. Pagels, y es ya un lugar común reconocer que la *simulación* es, hoy por hoy, un modo excelso de trabajo en ciencias de la complejidad.

De esta suerte, si la presentación histórico-conceptual de las ciencias de la complejidad presentada arriba tuvo un carácter discursivo, es preciso, ahora, complementar esa presentación. Este complemento apunta en la dirección que afirma que cuando se trabaja con ciencias de la complejidad es posible –y en muchas ocasiones incluso necesario- trabajar sobre o atravesar alguna(s) de la(s) ciencia(s) y teoría(s) anterior(es). Sin embargo, lo contrario no es cierto. Esto es, no por trabajar fractales, o caos, por ejemplo, se trabaja sobre sistemas complejos. Esta advertencia es igualmente válida cuando se hace referencia a la forma más generalizada de trabajo en complejidad: la simulación y el modelamiento.

La visualización de la no-linealidad fue posible, en verdad, gracias al desarrollo del computador, y en especial, a los lenguajes –matemáticos- de programación desarrollados. En este sentido es indispensable mencionar la importancia de los

autómatas celulares –desarrollados inicialmente por J. von Neumann-, el programa-juego *Tierra*, desarrollado por Ray, y ulteriormente el programa sobre vida artificial, de Ch. Langton. El hilo conductor que teje estos tres momentos está constituido por la continuidad de un mismo programa compuesto por tres fases: la inteligencia artificial, los sistemas expertos y la propia vida artificial. De éstos, el más sugestivo debido a su extensión hacia otras esferas del conocimiento, es la vida artificial. El programa sobre vida artificial consiste en estudiar la vida no sólo tal y como es, sino, tal y como podría ser (*life as it could be*). En este sentido, las ciencias de la complejidad se dice que son ciencias de la vida.

Esta última afirmación requiere, con todo, una observación puntual. Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, pero las ciencias de la vida no son, por ello, ciencias de la complejidad. En verdad, el fenómeno de máxima complejidad conocido es la vida, o mejor, son los sistemas vivos. Ahora bien, es propio de las ciencias de la complejidad –por ejemplo gracias al recurso a la biología evolutiva o a la biología teórica (S. Kauffman)-, poner de manifiesto que la vida no es un estrato, una sustancia o una entidad de algún tipo especial. Por el contrario, la vida es un comportamiento, o también, un sistema de organización. Pero si ello es así, como es efectivamente el caso, entonces una contribución significativa de las ciencias de la complejidad consiste en que permiten ver otras dimensiones de la realidad a la manera de sistemas vivos.

Así, por ejemplo, comportamientos, sistemas o fenómenos tan diversos entre sí como los mercados financieros, las ciudades y su dinámica, las comunidades de insectos sociales, los nichos ecológicos en toda la acepción más amplia de la palabra, los fenómenos de innovación y de producción de innovación, las emergencias, la política y la economía, por ejemplo, pueden ser vistos a la luz de la biología evolutiva, o también, a la manera de organismos que existen en nichos y sistemas altamente sensibles. Exactamente de la forma como la biología o la ecología nos enseñan que existen y se comportan los sistemas vivos.

Es en esta dirección como, incluso –aunque no prioritariamente- a título retórico, se ha sostenido que mientras que la física fue la ciencia de la primera mitad del siglo XX, la biología lo sería de la segunda mitad del siglo XX y, ulteriormente, las biomatemáticas, que es el modelo explicativo que se encuentra en la base de la biología, lo sería del siglo

XXI (o por lo menos de la primera mitad del siglo XXI, a la espera de lo que haya o pueda acontecer posteriormente).

Como quiera que sea, el trabajo más sólido, en el sentido práctico, del estudio sobre los sistemas complejos se debe a J. Holland. Padre de los algoritmos genéticos, la herramienta, durante mucho tiempo, más fructífera en el trabajo con ciencias de la complejidad, Holland fue el primero en llamar la atención sobre el hecho de que la complejidad es el resultado de procesos adaptativos (Holland, 1995). Mejor aún, los sistemas complejos actúan como, o mejor aún, son *agentes adaptativos*. Exactamente en esta dirección, y en cierto modo sobre la base del trabajo pionero de Holland, M. Gell-Mann hablará de la complejidad como de sistemas complejos adaptativos, y que es una de las formas más reconocidas o aceptadas para llamar a los sistemas complejos.

En cualquier caso, ya sea en su dimensión teórica o bien de simulación, las ciencias de la complejidad dejan suficientemente en claro en la explicación de la dinámica no-lineal, que se rompe la idea de ciencia en sentido tradicional de objetividad, completud, ausencia del observador. En efecto, la complejidad del mundo depende exactamente de nuestra presencia en él. Y más ampliamente, la complejidad de la naturaleza depende de la presencia en ella de sistemas vivos que actúan sobre ella de modos sorprendidos. La forma más reciente como hemos descubierto que actúan es en paralelo, y no ya serial o secuencialmente, que es la creencia predominante durante veinticinco siglos de historia occidental.

En efecto, la ciencia no es entendida ya más como un mecanismo de control, sino, mejor aún, de participación, actuación y aprovechamiento de la complejidad misma. Este es un rasgo que ha sido puesto de manifiesto, con énfasis, por parte de autores tan distintos como R. Axelrod, R. Cohen, y J. de Rosnay.

Finalmente, para terminar esta sección, quisiera detenerme, de manera puntual, en una consideración acerca de los retos que enfrenta, hacia futuro, el estudio de la complejidad.

El estudio de los sistemas complejos constituye una auténtica revolución científica, en el sentido acuñado por Kuhn. Ciencia de punta, mejor, ciencia de frontera, la comunidad

de estudiosos e investigadores en sistemas, fenómenos y comportamientos complejos es creciente en el mundo. Sin embargo, el estudio de la complejidad encuentra un enorme reto desde hace ya un tiempo, actualmente, y hacia futuro. Sin lugar a dudas, se trata del principal reto, a saber: No existe una teoría (unificada) de los sistemas complejos. En este sentido, la mejor aproximación al estatuto epistemológico o también al estatuto filosófico de las ciencias de la complejidad es quizás el elaborado por R. Thom en el sentido de una teoría general de modelos. Creo que es en este sentido como cabe entender los ocho caminos presentados antes por P. Anderson.

En verdad, la mayor parte de los trabajos sobre complejidad consiste en modelamientos y simulación y los desarrollos en este plano son, al mismo tiempo, significativos y apasionantes. La principal contribución de este plano ha consistido, sin duda, en el plano cognitivo. El mundo y los fenómenos y procesos dinámicos no-lineales se han hecho, en verdad, altamente más inteligibles. Hoy entendemos mejor la naturaleza, el mundo y la sociedad más que nunca antes jamás. Existe, manifiestamente, un avance en el conocimiento gracias a las ciencias de la complejidad.

No obstante, se hace necesaria aún una teoría general –no digamos unificada- de la dinámica no-lineal que es común tanto al cerebro como a los mercados financieros, a los ecosistemas como a las simulaciones y creación de la vida artificial, en fin, tanto a las redes en los sistemas informáticos, tanto como al estudio de las relaciones internacionales, por ejemplo. *Ésta constituye, sin lugar a dudas, la principal veta de trabajo actualmente y hacia futuro en el estudio de la complejidad.*

La primera y más inmediata característica de los sistemas complejos consiste en su impredecibilidad. Sin embargo, la ausencia de predicción de los sistemas, fenómenos y comportamientos complejos no implica, en manera alguna, su inteligibilidad. Todo lo contrario. Es precisamente gracias a que hemos llegado a reconocer recientemente que lo verdaderamente determinante en ciencia –y por extensión en filosofía- consiste en la explicación, y no en la predicción, los sistemas complejos se aparecen, por tanto, como el más apasionante de los temas y problemas de estudio y comprensión. En particular, se trata del hecho de que la impredecibilidad está íntima y necesariamente ligada a la idea de la irreversibilidad de los cambios y al carácter súbito –esto es, sorpresivo- de los cambios.

La inteligibilidad de lo impredecible es en efecto posible gracias a la ayuda del computador, y más exactamente, gracias a la simulación. Si hay un área en la que la simulación pueda ser altamente apasionante y fructífera es en la esfera de las ciencias sociales; esto es, en la simulación de sistemas sociales humanos. Sin embargo, debido a la enorme dificultad técnica, los trabajos en esta dirección no son tan amplios ni sólidos como en ciencias básicas y naturales.

La simulación consiste, en términos básicos, en el trabajo con posibilidades y futuribles, lo cual tiene como resultado el reconocimiento, fundamental, de que las ciencias de la complejidad son ciencia de posibilidades y de futuro, y no ya simplemente ciencia de lo real y lo actual. Por ejemplo, de tiempos posibles, de escenarios futuros, de dinámicas probables. Es por esta razón por la que el concepto de “espacio de fases” no sólo es tan empleado sino, también, es de tanta ayuda en el estudio y explicación de los sistemas de complejidad creciente.

Como quiera que sea, el más difícil e importante de los problemas de la complejidad hace referencia a su medición. ¿Cómo medir la complejidad de un sistema? Para entender este problema es esencial recordar que la ciencia sólo se interesa por lo que es medible y sólo habla de aquello que se puede medir. Sin embargo, al mismo tiempo, es igualmente importante tener en cuenta que la principal y la única forma de medición no es cuantitativa. Además, recientemente, hemos hecho el aprendizaje de que son posibles y tienen sentido también mediciones cualitativas. Exactamente en esta dirección han surgido las matemáticas cualitativas. Pero éste ya es otro tema aparte.

Lo que sí cabe observar es que en el estudio de la dinámica no-lineal se propusieron diversas mediciones de complejidad. En estas mediciones, la ayuda e incluso la dependencia del computador es algo incuestionable. No en vano S. Wolfram (2002) ha denominado al estudio de los sistemas complejos como una nueva ciencia, situando, por lo demás, a la complejidad computacional en el foco de todas las miradas.

5. IMPLICACIONES Y ALCANCES CULTURALES Y POLÍTICOS DE LA COMPLEJIDAD

El estudio de la dinámica no-lineal fue pospuesto desde finales del siglo XVIII hasta el siglo XX cuando, con la ayuda del computador, se hizo posible visualizar y resolver los temas y problemas de la no-linealidad. A partir de la emergencia del computador, y con ellos, de las ciencias de la computación y la teoría matemática de la información, la no-linealidad se convierte por primera vez, y de manera generalizada, en un tema recurrente y necesario. Mejor aún, inevitable. Los cambios y procesos, las dinámicas y los comportamientos más significativos en el mundo son siempre no-lineales. Pero si ello es así, las ciencias de la complejidad deben y pueden cumplir un papel destacado.

H. Pagels sostenía que quien domine las ciencias de la complejidad podrá dominar el mundo. “Estoy convencido de que las sociedades que dominen las nuevas ciencias de la complejidad y puedan convertir ese conocimiento en productos nuevos y formas de organización social, se convertirán en las superpotencias culturales, económicas y militares del próximo siglo. Aunque hay grandes esperanzas de que así se desarrollen las cosas, existe también el terrible peligro de que esta nueva proyección del conocimiento agrave las diferencias entre quienes los poseen y quienes no” (1990: 51). En verdad, el control de que habla Pagels no es otro que el de las incertidumbres, las inestabilidades, etc. En fin, de lo inesperado, y no simple y llanamente de lo probable. Para entender esta idea es fundamental reconocer que la ciencia no es ya un sistema explicativo del mundo (*Weltanschauung*), sino, más exactamente, una forma de acción en el mundo. Ésta es quizás una de las diferencias más notables entre la ciencia contemporánea y la ciencia clásica.

Teóricos e investigadores con formaciones tan diversas como E. Hobsbawn (historia), N. Chomsky (lingüística) o P. Bordieu (sociología), por ejemplo, han coincidido en llamar la atención sobre el hecho de que América Latina en general, y Colombia en particular, constituyen estupendos laboratorios de pensamiento, debido, precisamente, a los fenómenos complejos –en toda la extensión y profundidad de la palabra- que tienen lugar en esta parte del mundo. La lista de esta clase de fenómenos sería prácticamente interminable y abarcaría situaciones y procesos tan distintos tales como: el conflicto armado colombiano, la corrupción, las dinámicas sociales de todo tipo, las características de las élites políticas y económicas nacionales, relativamente, por ejemplo, a las del resto de América Latina, el tipo de democracia imperante en el país –denominada con alguna frecuencia como “democracia formal”, entre otras definiciones-

, la dinámica económica y financiera y la sensibilidad a la presencia y decisiones de otras naciones y gobiernos con economías y políticas más fuertes en la región, la riqueza cultural y la inmensa diversidad biológica, genética y cultural, en fin, la situación geográfica misma del país, por ejemplo.

Pero si ello es así, entonces el estudio de las ciencias de la complejidad y la apropiación de sus herramientas conceptuales, lógicas y metodológicas, se revela como una ayuda con un valor incalculable para explicar justamente las dinámicas que no pueden ser explicadas y mucho menos resueltas con la ciencia normal (Kuhn) imperante hasta el momento. Es ya un lugar común sostener que el país se encuentra sobrediagnosticado, pero que no por ello se han encontrado las herramientas suficientes para superar los problemas del pasado y del presente. Otra lectura distinta, pero igualmente válida, es aquella que sostiene que, por el contrario, los diagnósticos laborados sobre el país, no son del todo satisfactorios debido a que existen numerosas cargas e intereses en los estudios realizados.

En cualquier caso, por decir lo menos, cabría explorar la simulación de realidades posibles –simulación y no simplemente modelamiento-, a fin de explorar acciones posibles, programas plausibles, en fin, escenarios probables. A la luz de las ciencias de la complejidad, no es ya cierto que la historia de un fenómeno determine ni explique el estado actual ni mucho menos el futuro posible del fenómeno considerado. La teoría de turbulencias, el estudio de las inestabilidades, la consideración de equilibrios dinámicos e inestables, en fin, la identificación de atractores extraños es algo que, como regla general, no ha sido ampliamente considerado en el estudio acerca de las dinámicas sociales, económicas, políticas y culturales, en toda la extensión de la palabra, en el país.

El grueso de la ciencia –en sentido amplio- que se enseña y se trabaja en el país, es ciencia normal en el sentido kuhniano de la palabra. Desde luego que es ciencia que *funciona* -teórica e instrumentalmente-. Pero los criterios de eficiencia y/o eficacia no pueden ya ser los únicos ni los más determinantes para la comprensión de la ciencia – conocimiento e información, cultura y educación- que existe en una sociedad determinada. El marco grueso de las consideraciones es, por tanto, el de las relaciones ciencia-sociedad, un tema que, entre nosotros, se encuentra lejos aún de ser

adecuadamente entendido. Pues bien, la ciencia normal es ciencia que se funda en una filosofía reduccionista y que se revela incapaz de comprender ni explicar, y mucho menos actuar, sobre fenómenos, sistemas o comportamientos sorprendivos, emergentes, autoorganizativos, en fin, caóticos y alejados del equilibrio.

6. CONCLUYENDO

Las ciencias sociales y humanas poseen rasgos, objetos, temas y problemas de mayor complejidad que las ciencias básicas y naturales. El resultado es altamente sorprendente. Desde el punto de vista de la complejidad, las ciencias sociales y humanas son más ciencias que lo que la tradición clásica insistió en enseñarnos. Pero esta formulación mía es en realidad equivocada. La menciono tan sólo por el valor del espíritu que contiene o que la rodea.

En rigor, las ciencias de la complejidad se erigen como ese *locus* en el que por primera vez, de manera efectiva y necesaria, se impone un diálogo al mismo nivel entre las ciencias básicas y las ciencias sociales, entre la ciencia y la filosofía, en fin, entre ciencia y sociedad.

Carece de sentido hacer ciencia sin un fundamento material. Este es, por lo demás, el primero de los criterios que sirven para distinguir la ciencia de la pseudo-ciencia. Pues bien, en el marco de las ciencias básicas y naturales, el fundamento material es la física. No tiene, en absoluto, sentido hacer ciencia –en general-, sin un fundamento físico. Por ejemplo, sin una referencia a, y sin un conocimiento de, la física. Análogamente, en las ciencias sociales y humanas, el fundamento material es la economía. Y en esta misma dirección, una ciencia verdaderamente significativa es aquella que tiene en cuenta, por lo menos, o que se sienta, a partir de la economía. De esta suerte, la física y la economía cumplen funciones análogas.

Pues bien, uno de los méritos de las ciencias de la complejidad radica en mostrar que existe tanto una comunidad de espíritu como de problemas entre ciencias aparentemente tan disímiles entre sí como la economía y la física. Cuando este encuentro y diálogo tiene en efecto lugar, nos referimos, en rigor, a la nueva física tanto como a la nueva economía. Esto es, a aquel conjunto de ciencias centradas en torno a fluctuaciones,

inestabilidades, no-linealidad, emergencias, no deterministas ni reduccionistas, y que saben y trabajan a partir de bucles de retroalimentación positiva. Este diálogo no es sino una expresión de la tercera cultura, como decíamos al comienzo. Así, la ciencia puede realizar significativos aportes al mundo, esto es, tanto a su explicación como a su construcción, en función de grados de libertad, sistemas abiertos y alejados del equilibrio, en fin de evoluciones de complejidad creciente. Tal es el horizonte que se anticipa desde el estudio de, y el trabajo con, sistemas complejos no-lineales.

Los cambios verdaderamente significativos –por interesantes, por apasionantes, por preocupantes-, son aquellos que en el mundo y en la vida tienen lugar súbitamente. Desde luego que estos cambios se incuban, por así decirlo, durante un tiempo, pero aquello que los caracteriza es la sorpresa y su irreversibilidad. La ciencia y la filosofía, tanto como la cultura humana en general, siempre supo de ellos. Pero nunca fueron el objeto explícito de investigación. Esta falencia abrió las puertas para el providencialismo y el fatalismo de todo tipo. Las ciencias de la complejidad –esto es, notablemente, la termodinámica del no-equilibrio, el caos, las catástrofes, los fractales, las lógicas no-clásicas-, constituyen el primer esfuerzo serio y radical por hacer de los cambios súbitos un objeto y un campo de trabajo. Ésta es la especificidad y la contribución de las ciencias de la complejidad a la cultura humana. Sólo que, debido a la novedad de este programa de investigación, existen numerosas dificultades para su estudio y su incorporación social y cultural; por ejemplo, en la vida regular de la academia, de las organizaciones e instituciones sociales de todo tipo. La dificultad de la tarea no menoscaba su importancia ni el placer del trabajo de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

Alchourrón, C., (ed.), (1995). *Lógica*. Madrid: Trotta/Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Anderson, P., (1999). “The Eightfold Way to the Theory of Complexity”, en: Cowan, Pines, Meltzer (eds.), págs. 7-16.

Axelrod, R., (1984). *The Evolution of Complexity*. New York: Basic Books.

-----, (1997). *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Axelrod, R., and Cohen, M., (1999). *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*. New York: The Free Press.

Badii, R., and Politi, A., (1997). *Complexity. Hierarchical Structures and Scaling in Physics*. Cambridge University Press.

Bak, P., (1996). *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer Verlag.

Bar-Yam, Y., (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley.

Bobenrieth, A., (1996). *Inconsistencias. ¿Por qué no? Un estudio filosófico sobre la lógica paraconsistente*. Bogotá: Colcultura.

Bochenski, I. M., (1968). *Historia de la lógica formal*. Madrid: Gredos.

Bossomaier, T., Green, D., (1998). *Patterns in the Sand. Computers, Complexity, and Everyday Life*. Reading, MA: Perseus Books.

Briggs y Peat, (1999). *Las siete leyes del caos*. Barcelona: Tusquets.

Campos Romero, D., Isaza Delgado, J. F., (2002). *Prolegómenos a los sistemas dinámicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Casti., J., (1990). *Paradigms Lost. Tackling the Unanswered Mysteries of Modern Science*. New York: Avon Books.

-----, (1995). *Complexification. Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. New York: Harper.

Cohen, J., and Stewart, I., (1994). *The Collapse of Chaos. Discovering Simplicity in a Complex World*. Penguin Books.

Cowan, G., Pines, D., Melzter, D., (eds.), (1999). *Complexity. Metaphors, Models, and Reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.

Chaisson, E. J., (2001). *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Harvard University Press.

Chaitin, G., (19xyz). *The Unknowable*. Springer-Verlag.

Da Costa, N., (2000). *El conocimiento científico*. México: UNAM (original en portugués, 1997).

Fernández Díaz, A., (1994). *La economía de la complejidad. Economía dinámica caótica*. Madrid: McGraw Hill.

Gardies, J.-L., (1979). *Lógica del tiempo*. Madrid: Paraninfo.

Gell-Mann, M., (1996). *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo*. Barcelona: Tusquets.

Haack, S., (1991). *Filosofía de las lógicas*. Madrid: Cátedra (Primera edición en inglés, 1978, Cambridge University Press).

Holland, J., (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press.

-----, (1995). *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Perseus Books.

-----, (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley.

Kauffman, S., (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.

-----, (2000). *Investigations*. Oxford University Press.

Kellert, S. H., (1993). *In the Wake of Chaos. Unpredictable Order in Dynamical Systems*. Chicago/London: The University of Chicago Press.

Kneale, W., and Kneale, M., (1984). *The Development of Logic*. Oxford: Clarendon Press.

Lewin, R., (1995). *Complejidad. El caos como generador del orden*. Barcelona: Tusquets.

Liebovitch, L., (1998). *Fractals and Chaos. Simplified for the Life Sciences*. New York: Oxford University Press.

Lorenz, E. N., (2000). *La esencia del caos. Un campo de conocimiento que se ha convertido en parte importante del mundo que nos rodea*. Madrid: Debate.

McNeill D., and Freiberger, P., (1993). *Fuzzy Logic. The Revolutionary Computer Technology that is Changing our World*. New York: Tauschstone.

Mainzer, K., (1998). *Thinking in Complexity*. Springer Verlag.

Maldonado, C. E., (1999). "El programa contra el dualismo de R. Penrose", en: *Universitas Philosophica*, No. 31, pp. 31-54.

-----, (2000). "Ideas acerca de la historia y futuro de las relaciones entre ciencia y filosofía", en: M. Rujana, (comp.), *Problemas actuales de la filosofía*. Bogotá: Universidad Libre.

-----, (Ed.), (2001a). *Visiones sobre la complejidad*. 2ª Ed., Bogotá: Universidad El Bosque.

-----, (2001b). “¿Qué es la filosofía de la ciencia? El caso de la física cuántica”, en: Revista *Momentum*, No. 20, Depto. de Física, Universidad Nacional de Colombia, pp. 27-43.

-----, (2003c) “Un problema difícil en ciencia y filosofía: cómo medir la complejidad de un sistema”, en: *Perspectivas epistemológicas*. Memoria III Encuentro Nacional de Filosofía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Septiembre, págs. 30-43

-----, (2004a). “El problema de la filosofía del conocimiento y el estudio de los sistemas complejos”, en: *Praxis Filosófica*, Universidad del Valle, No. 17 (en prensa).

-----, (compilador), (2004b). *Complejidad de la ciencia – Ciencias de la complejidad*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia (en prensa).

Mandelbrot, B., (1997). *Geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona: Tusquets.

-----, (1996). *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Barcelona: Tusquets.

Maturana, H., Varela, F., (1990). *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del conocimiento humano*. Madrid: Debate.

Murphy y O’Neill (eds.), (1999). *La biología del futuro*. Barcelona: Tusquets.

Nicholis, G., Prigogine, I., (1987). *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. Madrid: Alianza Editorial.

Pagels, H., (1991). *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.

Penrose, R., (1990). *The Emperor’s New Mind. Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. London: Vintage.

Pomian, K., (ed.), (1990). *La querelle du déterminisme*. Paris: Gallimard.

-----, (1994). *Shadows of the Mind. A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford: Oxford University Press.

Prigogine, I., (1980). *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W. H. Freeman and Co.

-----, (1993). *El nacimiento del tiempo*. Barcelona: Tusquets.

-----, (1993). *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden*. Barcelona: Tusquets.

- , (1999). *Las leyes del caos*. Barcelona: Crítica.
- , (1997). *El fin de las certidumbres*. Santiago de Chile: Ed. Andrés Bello.
- Prigogine, I., Stengers, I., (1983). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza.
- Rae, A., (1998). *Quantum Physics: Illusion or Reality?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Rescher, N., (1998). *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick (U.S.A.) and London (U.K.): Transaction Publishers.
- Ruelle, D., (1995). *Azar y caos*. Madrid: Alianza.
- Stewart, I., (1998). *De aquí al infinito*. Barcelona: Crítica/Drakontos.
- Stewart, I., y Golubitsky, M., (1995). *¿Es Dios un geómetra?* Barcelona: Crítica.
- Thom, R., (1997). *Estabilidad estructural y morfogénesis*. Barcelona: Gedisa.
- , (1993). *Parábolas y catástrofes. Entrevista sobre matemática, ciencia y filosofía*. A cargo de G. Giorello y S. Morini. Barcelona: Tusquets.
- , (1990). *Esbozo de una semiofísica. Física aristotélica y teoría de las catástrofes*. Barcelona: Gedisa.
- Wagensberg, J., (ed.), (1986). *Proceso al azar*. Barcelona: Tusquets.
- , (1994). *Ideas acerca de la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets.
- Waldrop, M., (1992). *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Chaos*. New York: Simon & Schuster.
- Wolfram, S., (2002). *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, Inc.
- Zeeman, E. C., (1978). *Catastrophe Theory. Selected Papers 1972-1977*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Zimmerli, W. Ch., & Sandbothe, M., (1993). *Klassiker der modernen Zeitphilosophie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.