

Carlos Eduardo Maldonado Castañeda  
—editor académico—

# COMPLEJIDAD: REVOLUCIÓN CIENTÍFICA Y TEORÍA



**Colección Complejidad**  
Facultad de Administración



**UR**

# Complejidad: revolución científica y teoría

*Carlos Eduardo Maldonado Castañeda*

–editor académico–



COLECCIÓN COMPLEJIDAD FACULTAD DE ADMINISTRACIÓN

© 2009 Editorial Universidad del Rosario  
© 2009 Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario,  
Facultad de Administración  
© 2009 Carlos Eduardo Maldonado Castañeda, Eugenio Andrade,  
Díógenes Campos Romero, Efraín A. Domínguez Calle, Nelson A. Gómez Cruz,  
Viktor V. Kovalenko, Sergio Néstor Osorio García, Jorge E. Villamil Puentes

ISBN: 978-958-738-030-9

Primera edición: Bogotá D.C., septiembre de 2009  
Coordinación editorial: Editorial Universidad del Rosario  
Corrección de estilo: Andrés Cote  
Diseño de cubierta: Lucelly Anaconas  
Diagramación: Ángel David Reyes Durán  
Impresión:  
Editorial Universidad del Rosario  
Carrera 7 N° 13-41, oficina 501 • Teléfono 297 02 00, ext. 7724  
Correo electrónico: editorial@urosario.edu.co

Todos los derechos reservados. Esta obra no puede ser reproducida  
sin el permiso previo por escrito de la  
Editorial Universidad del Rosario

---

Complejidad: revolución científica y teórica / Carlos Eduardo Maldonado Castañeda,  
editor académico. —Facultad de Administración. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario, 2009.  
180 p.—(Colección Complejidad de Administración).

ISBN: 978-958-738-030-9

Análisis de sistemas / Complejidad (filosofía) / Filosofía de la ciencia / Metodología de la  
investigación / Teoría del conocimiento / I. Maldonado Castañeda, Carlos Eduardo / I. Título / II.  
Serie.

501 SCDD 20

---

Impreso y hecho en Colombia  
*Printed and made in Colombia*

# Contenido

Prefacio .....	11
Introducción .....	15
Caos y complejidad en el marco de cuatro revoluciones científicas .....	21
Diógenes Campos Romero	
1. Introducción .....	21
2. Las dos primeras revoluciones de la ciencia .....	22
3. El problema de tres cuerpos .....	25
4. La tercera revolución de la ciencia.....	30
5. Hacia una cuarta revolución de la ciencia .....	31
Bibliografía.....	33
Modelación estocástica de sistemas complejos: adaptación y bifurcación como mecanismos de evolución.....	34
Efraín Antonio Domínguez Calle, Viktor V. Kovalenko	
1. Introducción .....	35
2. Núcleo determinístico del pronóstico de afluencias .....	36
3. Introducción de incertidumbre, ecuación de Fokker-Planck-Kolmogorov.....	40
4. Aplicación práctica de la ecuación de Fokker-Plank-Kolmogorov para el pronóstico estocástico de afluencias .....	44
5. Solución <i>pseudo</i> estacionaria de la ecuación de Fokker-Planck- Kolmogorov .....	53

6. Mecanismos de adaptación y bifurcación en la evolución de procesos hidrológicos.....	59
6.1. Ejemplo de un mecanismo adaptativo de desarrollo en sistemas hidrológicos (respuesta asimétrica de la cuenca ante influencias simétricas) .....	61
6.2. Mecanismos de evolución por bifurcaciones.....	63
7. Conclusiones .....	68
Bibliografía.....	69

## **Ingeniería de sistemas complejos..... 71**

Jorge Eliécer Villamil Puentes, Nelson Alfonso Gómez Cruz

1. Introducción .....	71
2. Tres tipos de ingeniería .....	72
3. Ingeniería de sistemas complejos .....	74
4. Ingeniería convencional e ingeniería de sistemas complejos.....	76
5. Régimen de la ingeniería de sistemas complejos.....	77
6. Conclusiones .....	81
Bibliografía.....	81

## **Hacia una teoría general de la complejidad ..... 83**

Eugenio Andrade

1. Introducción .....	83
2. Siglo XIX.....	84
2.1. Laplace.....	84
2.2. Darwin.....	85
2.3. Boltzmann y Maxwell .....	87
3. Siglo XX.....	90
3.1. Mecánica estadística y neodarwinismo.....	90
3.2. ¿Existe o no el tiempo? .....	95
3.3. Cosmología evolucionista .....	99
3.4. La evolución como entropía.....	103
4. Conclusión .....	109
Bibliografía.....	111

**Exploración de una teoría general de la complejidad ..... 113**

Carlos Eduardo Maldonado

1. Introducción .....	113
2. Abriendo el mapa de una TGC.....	115
3. Cómo no puede ser la TGC.....	121
4. El problema de las teorías en el contexto nacional y latinoamericano .....	124
5. Exploración de la TGC .....	127
5.1. Síntesis.....	127
5.2. Teoría de segundo orden.....	128
5.3. Teoría subdeterminada.....	130
6. Rasgos de una TGC .....	132
7. En el camino hacia una TGC.....	137
8. Complejidad y lógica .....	139
Bibliografía.....	142

**De la “teoría crítica de la sociedad” a la “paradigmatología”**

**de Edgar Morin..... 144**

Sergio Néstor Osorio García

1. Introducción .....	145
2. Notas sobre el término “paradigma” .....	146
2.1. El término “paradigma” y sus usos.....	146
2.2. Una reconstrucción del planteamiento de Thomas Kuhn.....	148
2.3. El cambio de paradigmas en la filosofía y en las ciencias sociales .....	153
2.3.1. En la filosofía .....	153
2.3.2. En las ciencias sociales .....	155
3. El pensamiento subyacente: paradigmatología de Edgar Morin.....	157
3.1. Reencuadrando el término de “paradigma” .....	159
3.2. Características del paradigma moriniano .....	161
4. Hacia la superación del gran paradigma de Occidente: de la “teoría crítica de la sociedad” a la “paradigmatología” en Edgar Morin .....	164
4.1. Interpretación paradigmática de la ciencia moderna.....	165

4.2. La interpretación moriniana de “la edad de hierro de la era planetaria” .....	170
Bibliografía.....	173
Los autores.....	177

## Prefacio

Es una característica de la ciencia actual –y del mundo contemporáneo– la imposibilidad de estudiar un fenómeno o resolver un problema sin atender, al mismo tiempo, al contexto, al marco o al universo del fenómeno (o del problema) y a las relaciones de diverso tipo que tiene y que atraviesan el problema (o al fenómeno).

De esta suerte, la inter y transdisciplinariedad es una exigencia –no ya simplemente una posibilidad o una opción– y un modo de trabajo crecientemente importante. Pero este diálogo y trabajo entre ciencias y disciplinas, entre ciencia y filosofía, entre ciencia y arte incluso, no tiene lugar sin dificultades y obstáculos enormes, provenientes de la tradición –fuerte– que se erige sobre la creencia en las jerarquías del conocimiento y, por tanto, sobre la creencia en la necesidad o la inevitabilidad de la disciplinariedad.

En este contexto se inscribe y se desarrolla el trabajo en torno a los fenómenos, sistemas y comportamientos caracterizados por complejidad creciente, autoorganización, emergencia, no-linealidad. Y sin embargo, quienes trabajan e investigan con seriedad en este campo, se han formado, hasta la fecha, en ciencias y disciplinas particulares. Son, por así decirlo, el último resultado de la disciplinariedad. Pero es disciplinariedad que sabe del significado, las consecuencias y las críticas a las “dos culturas” (C.P. Snow). Y por ello, con denuedo, se abre a otros lenguajes, otros modelos explicativos, incluso, a otros modos de interrogar el mundo y de verlo.

Ahora bien, no se trata simplemente de ir al encuentro de otros lenguajes, modelos y cuerpos de conocimiento, como si ya estuvieran allí y vinieran a sumarse o a complementarse con los primeros, por el contrario, el encuentro se produce como el trabajo de creación o construcción de lenguajes, explicaciones, metodologías y demás, perfectamente novedosos.

Los ensayos –he aquí un término equívoco, particularmente cuando nos referimos a las ciencias de la complejidad– que componen este libro tienen en común la preocupación por superar las fronteras del conocimiento entre disciplinas científicas, y todos comparten, al mismo tiempo, la pasión por el estudio de un mundo crecientemente complejo. Ya sea desde la física, la ingeniería, la biología, la filosofía o la sociología, por ejemplo, estos ensayos apuntan en otra dirección, a saber: aquella en la que surge –o se encuentra– un mundo de más y mejores posibilidades. Precisamente por ello, los trabajos aquí reunidos están inscritos en una revolución: revolución científica, revolución del conocimiento, en fin, revolución en el conocimiento; no en última instancia toman distancia de la tradición científica, filosófica y cultural que afirma al conocimiento en términos de parcelas aisladas unas de otras y jerarquizadas (bajo cualquier pretexto o argumento).

La ciencia, huelga decirlo, es una actividad que hacen los científicos –pensadores, inventores, descubridores–. Pero es, a la vez, un resultado que emerge por encima suyo y como resultado de sus interacciones, proyectos, logros y fracasos. La ciencia es una actividad humana que trasciende la experiencia meramente humana. Así se tejen las revoluciones científicas.

Una de esas actividades constitutivas del mundo y de la vida son los encuentros –que generan diálogos, proyectos conjuntos, en ocasiones incluso desavenencias, discordias y debates–. Pues bien, este libro es exactamente el resultado de un encuentro que ha logrado proyectarse en el tiempo, a partir de proyectos individuales, grupos de investigación diferentes, incluso universidades y espacios diversos. Este encuentro tuvo una finalidad expresa: generar sinergias, tender puentes, ampliar horizontes.

Pero este libro no es el único resultado de estos encuentros –continuados y proyectados en el tiempo–. Otros lo han precedido (cfr. *Visiones sobre la complejidad*, 1ª ed. 1999, 2ª ed. 2001; *Complejidad de la ciencia - ciencias de la complejidad*, 2005; *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones*, 2007), y, paralelamente otros más han sido y están siendo gestados. La trama de la vida se amplía y se fortalece y, con ello, la vida misma se hace mejor y más grata.

Un hilo conductor teje los distintos textos que dan lugar a este libro. Se trata del reconocimiento explícito de que las ciencias de la complejidad son una auténtica revolución científica –en el sentido, por ejemplo, sentado por Th. Kuhn–, y de que esta revolución confronta un reto enorme, a saber: el establecimiento, la

formulación o el desarrollo de una teoría. De esta suerte, revolución científica y teoría son los dos ejes, por así decirlo, que permiten trabajar a las ciencias de la complejidad, para lo cual la compilación en este libro contribuye de buena manera. De aquí la justificación del título que hemos propuesto al resultado del encuentro y las contribuciones entre científicos y filósofos con formaciones diversas.

Una cosa debe quedar en claro con respecto a este libro. En él se reúnen no tanto textos escritos por simple interés o como experimento –aunque sea serio; que es justamente lo que se designa en español, y otros idiomas contemporáneos, con las palabras *ensayo*, *essai*, *essay*, etc.–, sino que se recoge el diálogo de un trabajo que corresponde a un compromiso de cada uno de los autores con el tema o el problema tratado. Este compromiso se expresa en la mayoría de los casos en la inscripción o la pertenencia a algún proyecto o grupo de investigación. Pero además, y principalmente, a una línea de investigación que todos y cada uno de los autores ha venido desarrollando y que podría rastrearse, hacia atrás, en otros trabajos publicados o en la participación en otras redes y grupos de trabajo acerca de complejidad. Por consiguiente son más, bastante más que ensayos. Pero no se trata tampoco de artículos científicos (*papers*), no solamente por su lenguaje y estructura, sino porque cada uno tenía en claro que se trataba de la contribución a un libro. “Capítulo de libro” es la designación genérica en estos casos. Y sin embargo, y es lo que se trata de hacer manifiesto, se trata de textos que pueden y deben tejerse como unidad (“unidad hologramática”, diría alguno de los coautores de este libro). Esta unidad es la de la presentación, la propuesta e incluso la apuesta (es decir, una empresa de riesgo e inteligencia) por una tesis, o por una vía exploratoria, en fin, incluso también por un proyecto propio al que, con tonos, énfasis y modalidades diferentes, han decidido apostarle fuerte. De aquí el valor y la autenticidad de este libro.

El trabajo en ciencias de la complejidad consiste fundamentalmente en tres grandes áreas en el mundo. Estas son: los trabajos sobre simulación y aplicaciones, el estudio del problema –difícil y apasionante– de la medición (o mediciones) en/de complejidad, y el problema del desarrollo de una teoría de la complejidad. Pues bien, los trabajos que componen este libro forman parte de estos tres grandes ejes de trabajo, o atraviesan varios de estos ejes.

El libro empieza con la contribución de Diógenes Campos –actualmente vicerrector de la Universidad Jorge Tadeo Lozano–, que precisa el sentido en el que podemos hablar de las ciencias de la complejidad como una revolución científica.

Le siguen dos textos escritos desde la ingeniería: el de Efraín A. Domínguez C., en colaboración con Viktor V. Kovalenko, profesores de la Pontificia Universidad Javeriana y de la Universidad Estatal Hidrometeorológica de Rusia, respectivamente, sobre modelación estocástica de sistemas complejos, con seguridad uno de los temas constitutivos de lo que puede denominarse como el núcleo duro *-hard core-* en los estudios sobre complejidad. Posteriormente, Jorge Villamil, conjuntamente con el más destacado de todos sus estudiantes, Nelson Gómez, ambos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, avanzan en la línea de desarrollo de una ingeniería de sistemas complejos, un área sobre la cual no son numerosos los textos y las investigaciones. Siguen a continuación dos textos diferentes sobre un mismo tema o problema, el abordaje de una teoría *-básica o fundamental-* de la complejidad. El primero, escrito por Eugenio Andrade, profesor de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, se enfoca en la historia de los antecedentes que permiten avanzar en la búsqueda de una teoría de la complejidad. El segundo, de Carlos Eduardo Maldonado, de la Universidad del Rosario, es una exploración menos histórica y más heurística del mismo problema. Finalmente, el libro cierra con la contribución de Sergio N. Osorio G., de la Universidad Militar Nueva Granada, que estudia el concepto de paradigma y la propuesta sobre la formación de conceptos, a la luz de las ideas de E. Morin, con lo cual, desde otro ángulo perfectamente distinto, por así decirlo, se forma un bucle con el problema o el aire con el que se inaugura el libro.

# Introducción

El estudio de los fenómenos caracterizados por complejidad creciente, emergencia, no-linealidad y autoorganización nace y permanece nutrido durante un tiempo largo en el contexto de las ciencias físicas. No en vano, buena parte del lenguaje de la complejidad proviene de elementos tales como sinergia, ergodicidad, linealidad y no-linealidad, la importancia de aspectos hamiltonianos y el debate con aspectos lagrangianos; igualmente, los problemas relativos a la predictibilidad, verificación y falseación de las teorías –todos ellos de claro cuño físico–. Pues bien, el primer texto de este libro, escrito por el profesor Diógenes Campo, de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, tiene el mérito de situar a los estudios sobre caos y complejidad en el panorama de las ciencias físicas, poniendo especial énfasis en la manera como, apropiadamente, la complejidad constituye la cuarta revolución científica, desde cuando emerge la modernidad.

De esta suerte, mientras que las tres primeras revoluciones científicas –en el contexto de las ciencias físicas– asisten al nacimiento y apogeo de la mecánica clásica, con Galileo y con Newton, al nacimiento de la teoría de la relatividad, de la mecánica cuántica y la teoría del caos, la cuarta revolución científica, aún en curso, tiene de particular el hecho de que no se trata ya de una ciencia singular ni tampoco de una teoría particular, sino, mejor, de un conjunto de ciencias y teorías dedicadas al estudio y comprensión de lo que hace “complejo” a un fenómeno determinado.

En otras palabras, la cuarta revolución científica es la apertura de una ciencia particular a un conjunto o serie de ciencias, modelos y teorías que confluyen en la pasión por dinámicas autoorganizativas, no-lineales, estados y puntos críticos con espacios de fase y transiciones de fase, leyes de potencia y percolación. Nuevos conceptos, nuevas líneas de explicación, en fin, nuevos fenómenos son

abiertos y descubiertos, y tienen como función mínima común el reconocimiento explícito de que los sistemas complejos son esencialmente abiertos. Dicho en otros términos, asistimos, por primera vez en la historia de la humanidad, al reconocimiento abierto de que los sistemas cerrados y los sistemas aislados son inexistentes o imposibles, o sencillamente, se trata, en el mejor de los casos, de simplificaciones y abstracciones que poco contribuyen a entender la complejidad del mundo y de la naturaleza.

Pues bien, sobre esta base, el siguiente texto que compone este libro, escrito por los profesores Efraín Antonio Domínguez, de la Universidad Javeriana, y Viktor Kovalenko, de la Universidad Estatal Hidrometeorológica de Rusia, se concentra en la modelación estocástica de sistemas complejos, con lo cual se pone de manifiesto que la adaptación y la bifurcación constituyen mecanismos distintivos de la evolución de los sistemas complejos. Así, el tema es el estudio probabilístico de la complejidad, en el que las relaciones –tradicionales– de causa-efecto determinísticas son sustituidas por relaciones de causa-efecto difusas.

Presentando conceptos de la teoría de funciones aleatorias, este segundo texto elabora una descripción de sistemas complejos a través de curvas de densidad probabilística, aplicadas o referidas al régimen hidrológico del embalse de Betania, uno de los más importantes de Colombia. Para ello, estudia la ecuación de Fokker-Planck-Kolmogorov, que aunque altamente técnica, tiene el mérito de mostrar el comportamiento de procesos de corta memoria, denominados procesos markovianos simples o redes simples de Markov.

Este es un modo específico de trabajo, con herramientas de la física y de la ingeniería, que tiene la finalidad de mostrar específicamente de qué manera, como lo sostiene I. Prigogine, el orden resulta de las fluctuaciones, y cómo uno de los frentes de trabajo principales de las ciencias de la complejidad consiste en identificar patrones allí donde aparentemente hay caos y turbulencias. Así, mientras que la ciencia clásica descalifica o relega a lugares secundarios los fenómenos aleatorios, en complejidad estos constituyen el tema central de trabajo, y por consiguiente, el tema es el de la posibilidad de elaborar pronósticos con/de fenómenos de memoria corta. El resultado es que la complejidad es la mixtura, por así decirlo, entre azar y necesidad, entre procesos determinísticos y probabilísticos, en fin, entre simplicidad y complejidad, o también entre control y aleatoriedad.

El tercer texto que compone este libro, “Ingeniería de sistemas de complejos”, escrito por Jorge Villamil y Nelson Cruz, ingenieros de la Universidad Distrital

Francisco José de Caldas, aborda uno de los temas más recientes y promisorios en la interfase entre complejidad e ingeniería, a saber: la importancia de aquellos sistemas tecnológicos que, aunque producidos por los seres humanos, son cada vez más autónomos e independientes del control humano. Con seguridad la arista más destacada de esta parte de la tecnología es la vida artificial.

Contrastando la ingeniería de sistemas abiertos con la ingeniería convencional –o normal, en términos Kuhnianos–, el énfasis se desplaza hacia el reconocimiento de y el trabajo con sistemas tecnológicos en entornos abiertos y cambiantes, en los que existe información incompleta y control restringido de funciones y variables. Así, el valor principal del texto es el de poner de manifiesto que los temas referentes a sistemas tecnológicos complejos no son exclusivos de ingenieros, sino que tienen un significado y una impronta social y cultural determinante.

El resultado más destacado es que mientras que la ingeniería convencional descansa en el concepto de “producto”, la ingeniería de sistemas abiertos se funda en el concepto de “organización”, que tiene un espectro no solamente más amplio y universal, sino, adicionalmente, más orgánico y evolutivo. De este modo, el foco se desplaza del concepto de competencia hacia el concepto de cooperación; dicho técnicamente, cooperación entre agentes. Por decirlo de manera rápida, se trata sencillamente de la cooperación entre escalas y dimensiones diversas en las que la tecnología, la sociedad, la ciencia y la ingeniería aprenden a trabajar mancomunadamente en la búsqueda de espacios de soluciones específicas pero que tienen repercusiones de amplio espectro con respecto a otros problemas, retos y soluciones adicionales posibles.

Hasta aquí tenemos tres textos distintos pero complementarios entre sí, cuya función mínima común es poner de manifiesto de qué manera se trabaja en problemas específicos de complejidad, y cómo este trabajo se enmarca en el panorama de la ciencia en general y de la ingeniería en particular, teniendo siempre como referencia elementos sociales, culturales o históricos. Sin embargo, existe una dificultad grande en el trabajo con sistemas complejos adaptativos. Se trata del hecho de que no existe, hasta la fecha, algo así como una teoría general o universal de la complejidad, algo que aparece claramente mencionado desde el primer texto de este libro.

Pues bien, los dos textos que siguen se centran en esta dificultad y exploran posibilidades de allanarla.

“Hacia una teoría general de la complejidad”, escrito por el profesor Eugenio Andrade, de la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), de entrada llama la atención sobre el hecho de que una teoría general de la complejidad no tiene que obedecer a los criterios tradicionales de lo que es una teoría, marcados usualmente por las ciencias físicas. Más bien, sugiere el autor, podríamos buscar en otra dirección. Se trata de una convergencia en la que la física y la biología aprenden la una de la otra y se transforman recíprocamente.

Para ello, se hace indispensable un recorrido histórico de la manera como el concepto de evolución sirve como hilo conductor, por así decirlo, para el acercamiento de las ciencias físicas y las ciencias biológicas. De esta forma, el hilo conductor es el estudio de lo que son los sistemas vivos, y cómo esta clase de sistemas –sistemas que exhiben vida– ponen el dedo, si cabe la expresión, en el más apasionante y difícil de los problemas: el tiempo. ¿Son los sistemas complejos independientes del tiempo o bien son generadores de temporalidad? El título del debate es el de la dilucidación de las posiciones entre externalismo e internalismo, dos expresiones en las que se dirime si el tiempo es relativo a cada observador, o bien si es una unidad global única y congruente para diversos observadores. El debate es nuclear para toda la tradición científica, y con ella y más allá de ella, también para la tradición filosófica y cultural del mundo occidental.

La cosmología resultante de la incorporación de la perspectiva evolucionista con la física es la de un universo de complejidad creciente: “cosmología evolucionista”, justamente. En ella, el tiempo tiene una direccionalidad –una “flecha”– que ya no puede ser descartada ni considerada simplemente como una variable (más). Con ello, en realidad, asistimos a una visión no antropomórfica (o antropocéntrica, si se quiere) de la realidad y del mundo: un resultado sorprendente si se lo mira con los ojos de la tradición. Como consecuencia, la evolución de la vida corresponde a una sucesión de bifurcaciones, y por tanto el futuro no está predeterminado. En otras palabras, la evolución, aunque dirigida y orientada hacia una mayor complejidad, es abierta e impredecible.

Por su parte, el siguiente texto que compone esta compilación, “Exploración de una teoría general de la complejidad”, escrito por Carlos Eduardo Maldonado, profesor de la Universidad del Rosario, aborda en paralelo cómo no puede ni debe ser entendida una teoría general de la complejidad y cómo cabe explorar la plausibilidad de una teoría semejante.

El trabajo con teoría en general es un asunto que en ciencia normal, en el sentido más amplio de la palabra, va de suyo; es decir, lo habitual es que las ciencias trabajen con teorías de tal o cual tipo, pero poco o nada se ocupen de aspectos tales como de qué manera surgen y se mantienen las teorías, cómo se derriban o pierden validez, y más generalmente, qué es una (buena) teoría científica. Las ciencias de la complejidad no pueden ni deben ser ajenas a estas cuestiones. Mucho menos en un contexto social, histórico y cultural como el de América Latina.

Como quiera que sea, una teoría de la complejidad puede ser pensada en términos de tres posibilidades: como síntesis, como teoría de segundo orden (o de orden superior, a la manera de la lógica), y como una teoría subdeterminada. Sobres estas opciones, el texto propone ocho rasgos propios que tiene –o habrá de tener– una teoría semejante. Estos sirven como patrones o aires de familia, por así decirlo, que permiten avanzar en el trabajo, arduo, de formulación de una teoría que, en todos los aspectos, contrasta con las teorías científicas (y filosóficas) habidas hasta la fecha.

Quizás la vía más idónea, entiende el autor, aparece por el camino de las lógicas no-clásicas, con lo cual se sugiere la incorporación de esta clase de lógicas en el “corpus” de las ciencias de la complejidad.

Finalmente, el último texto de esta compilación se concentra en el estudio de la paradigmatología de Edgar Morin, y está escrito por el profesor Sergio Néstor Osorio, de la Universidad Militar Nueva Granada.

Mientras que los textos anteriores se concentran en las ciencias de la complejidad, este último se enfoca en el pensamiento complejo, una de las aristas más sugestivas en el estudio de la complejidad en general, y cuyo referente es la obra del sociólogo francés Edgar Morin.

La complejidad, afirma el autor, es manifiestamente un nuevo paradigma. Así, el tema es el de cómo acceder y cómo lograr que otros, que no han entrado al estilo de pensamiento, de lenguaje y de actitudes y acciones que implica la complejidad en general, puedan entrar y vivir en el modo de pensamiento que significa “complejidad”. Como se aprecia, el reto es de amplia envergadura y de largo alcance. Para abordarlo, el autor parte, si podemos decirlo así, del (buen) pretexto que es la teoría crítica de la sociedad, para desde ella extraer los motivos más sugestivos que permitan realzar la paradigmatología al entender de

E. Morin; es decir, hacia una nueva y diferente manera de pensar y de comprender los fenómenos y procesos del mundo y la naturaleza.

A todas luces, nos encontramos en medio de una revolución científica, con lo cual el bucle abierto por el primero de los textos de esta compilación y proseguido por los demás se cierra. Solo que en el texto de Osorio se extiende el sentido de revolución científica también a las ciencias sociales y humanas y a la filosofía. De esta suerte, debe ser claro que con el término “paradigma” se hace referencia específicamente a estructuras intencionales y sistemáticas de la producción de conocimiento social, que contribuyen a orientar la acción, tanto de individuos como de colectivos sociales. Con ello, lo que se hace claro es que estamos en camino hacia una nueva humanidad.

Este libro está dirigido a un público amplio –científicos, humanistas, ingenieros–, y en general a quien se aventura a pensar y a trabajar en términos no-disciplinares. Con toda seguridad, el mérito del trabajo en ciencias de la complejidad consiste en indisciplinar a las ciencias, una expresión ya en boga, y que de un lado apunta hacia la idea de una “tercera cultura” (Brockman), tanto como hacia una “nueva alianza” (I. Prigogine).

Existe, a todas luces, una masa crítica que trabaja en complejidad y que está interesada, en profundidad y con total seriedad, en estos temas. La prueba son los diversos eventos académicos y científicos, las compilaciones y las publicaciones, cada vez con calidad más eximia y de amplio cubrimiento inter y transdisciplinar. Este libro quiere contribuir a esta historia y a estos procesos.

# Caos y complejidad en el marco de cuatro revoluciones científicas

Diógenes Campos Romero\*

## Resumen

Esta contribución<sup>1</sup> tiene como propósito ubicar la teoría de los sistemas caóticos y las teorías de la complejidad en el marco de las revoluciones científicas que han transformado las ciencias físicas.

## 1. Introducción

Con motivo del Año Mundial de la Física (2005) me referí al tema “Caos y complejidad, su historia y aplicaciones” (Campos, 2005), mientras que en una contribución del año 2006 el interés se centró en “Modelos en la ciencia: sistemas simples, complicados y complejos” (Campos, 2006). La presente contribución tiene como propósito avanzar en esta línea de pensamiento para ubicar la teoría de los sistemas caóticos y las teorías sobre la complejidad en el marco de cuatro revoluciones científicas que han transformado las ciencias físicas. La mirada desde estas ciencias es una entre muchas perspectivas posibles, pues las teorías del caos y la complejidad no están restringidas a las ciencias físicas.

---

\* Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. Contacto: dcamposr@utadeo.edu.co

<sup>1</sup> Resumen del trabajo expuesto en el Segundo Encuentro Interuniversitario sobre Complejidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 3 de mayo de 2007.

## 2. Las dos primeras revoluciones de la ciencia

Las dos primeras revoluciones de las ciencias físicas se deben a Galileo Galilei (1564-1642) y a Isaac Newton (1643-1727), respectivamente. No es mi propósito profundizar en detalles históricos, pero conviene que el lector se ubique en la época en que predominaba la filosofía de Aristóteles (384-322 a.C.), en la que se creía que la Tierra era el centro del universo, que el Sol y los planetas giraban alrededor de la Tierra, que la velocidad de caída de un cuerpo era proporcional a su peso. Galileo, con sus experimentos, transformó la imagen aristotélica del comportamiento del universo, logró que la evidencia experimental prevaleciera sobre las creencias y que el experimento se usara como criterio para decidir sobre la verdad. Galileo aporta así la primera revolución científica, que se convierte en un pilar de la ciencia contemporánea (Jackson, 1992):

La ciencia incorpora el experimento como parte fundamental de su estructura y a su vez delimita el dominio de su competencia, en la medida en que ciencia es esa actividad humana que busca entender esa parte de la naturaleza cuyo estudio se puede hacer con base en experimentos cuantificables (idealmente reproducibles).

La segunda revolución de la ciencia se debe a Isaac Newton, quien durante sus estudios en Cambridge estuvo expuesto a muchas ideas, en especial a la mecánica y astronomía copernicana de Galileo y a las ideas del filósofo francés René Descartes (1596-1650). Para Descartes, la razón era el fundamento y la guía para buscar la verdad, su método fue concebido también como un método para hacer ciencia, basado en unas reglas metodológicas (*The Internet Encyclopedia of Philosophy*):

1. Nunca aceptar cualquier cosa como verdad, a no ser que exista conocimiento evidente sobre su veracidad.
2. Dividir el problema que se examina en tantas partes como sea necesario, de tal manera que se pueda resolver de la mejor manera posible.
3. Organizar el estudio de los problemas de manera ordenada: comenzar con los objetos más simples y avanzar, etapa por etapa, hacia conocimiento más complejo; suponer algún orden aun en objetos que no tienen un orden natural de prioridad.

4. Hacer enumeraciones exhaustivas y revisiones comprensibles, tanto como sea posible, de tal manera que se esté seguro de no excluir cosa alguna.

En este marco de referencia, la ciencia experimenta un salto gigantesco cuando Newton considera dos partículas,  $\alpha$  y  $\beta$ , de masa  $m_\alpha$  y  $m_\beta$ , con posiciones en el espacio  $r_\alpha$  y  $r_\beta$ , y reconoce que si la partícula  $\beta$  ejerce sobre la partícula  $\alpha$  una fuerza de atracción  $F_{\alpha\beta}$ , entonces la partícula  $\alpha$  experimenta una aceleración que se puede determinar mediante la ecuación:

$$m_\alpha \frac{d^2 r_\alpha}{dt^2} = F_{\alpha\beta} = -G \frac{m_\alpha m_\beta}{|r_\alpha - r_\beta|^2} \times \frac{r_\alpha - r_\beta}{|r_\alpha - r_\beta|} \quad (1)$$

Newton estableció así la existencia de una ley natural, la de la gravitación universal, que no diferencia entre los fenómenos terrestres y los fenómenos celestiales: el movimiento de los proyectiles en la Tierra y el movimiento de los planetas queda unificado pues su comportamiento está regido por la misma ley. Un historiador de la ciencia escribe (Bernal, 1985):

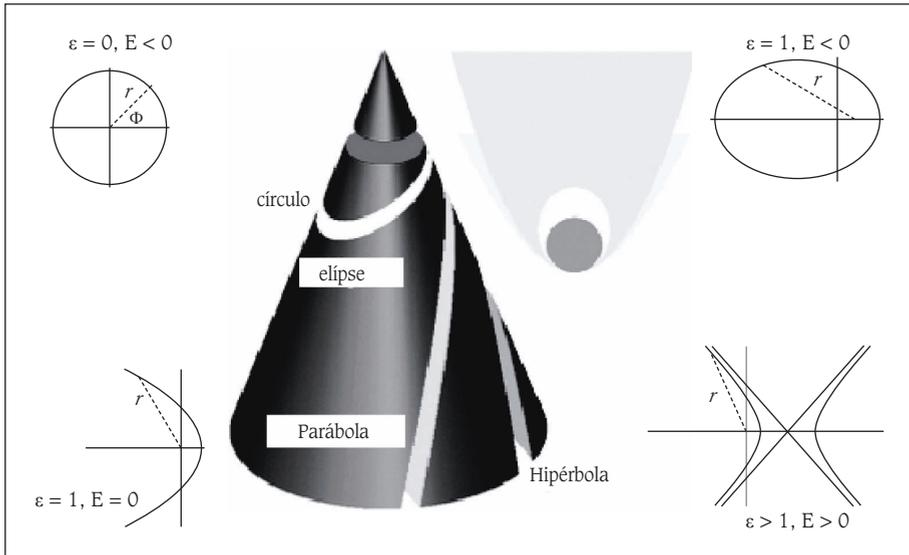
La teoría de la gravitación de Newton y sus contribuciones a la astronomía marcan la etapa final de la transformación de la imagen aristotélica del mundo que había iniciado Copérnico. La visión de esferas, manejadas por ángeles bajo las órdenes de Dios, la substituye Newton por un mecanismo que funciona con base en una simple ley natural, que solo necesita intervención divina para crearla y ponerla en funcionamiento.

Como una extensión de la ley de gravitación universal, la ciencia contemporánea acepta que un sistema natural dado se puede modelar; es decir, que el “sistema real” se puede representar en una forma simplificada por un “mundo formal” de ecuaciones matemáticas, que, para los fines de la presente exposición, forman un conjunto matricial de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(x(t), t; \mu), \quad x(t_0) = x_0 \quad (2)$$

Los símbolos  $x(t)$  y  $\mu$  designan el estado del sistema en el instante de tiempo  $t$  y los parámetros del sistema, respectivamente; en analogía con la fuerza gravitacional, la función  $F(x; t; \mu)$  describe el comportamiento dinámico del sistema natural que es objeto de estudio.

Figura 1. La ley de Newton permite describir la trayectoria de la masa efectiva que representa dos cuerpos que interactúan gravitacionalmente. Figura adaptada de [www.wikipedia.org/wiki/Conic\\_section](http://www.wikipedia.org/wiki/Conic_section) y Campos e Isaza (2002)



El sistema de ecuaciones diferenciales (2) se escribe en forma integral:

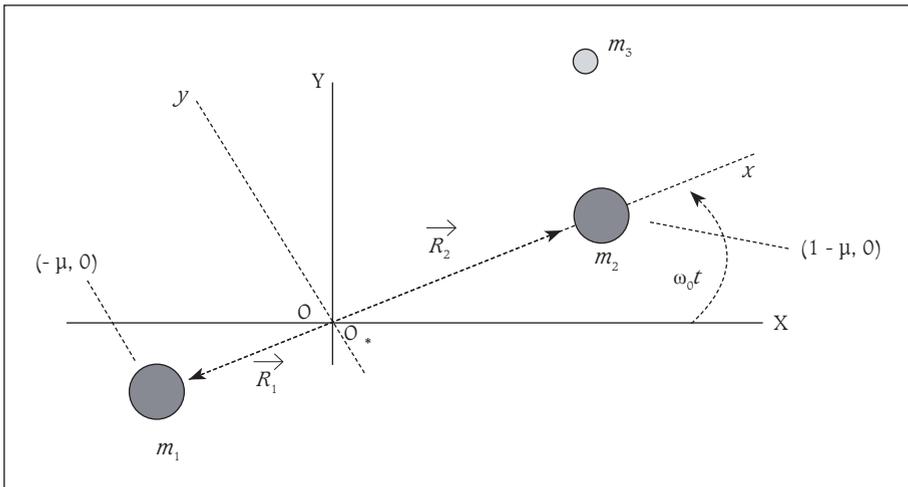
$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t F(x(t'), t'; \mu) dt' \quad (3)$$

Lo cual significa que el conocimiento del estado del sistema en un instante inicial  $t_0$  y el conocimiento de las leyes que rigen la dinámica del sistema permiten conocer el estado del sistema en cualquier otro instante de tiempo,  $t$ .

El éxito del astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742) sobre el regreso del cometa que hoy en día lleva su nombre, y la predicción de la existencia del planeta Neptuno, en 1845 y 1846, en trabajos independientes de John Couch Adams y Urbain Le Verrier, fueron éxitos de la teoría newtoniana de la gravitación

universal que consolidaron la idea de un universo determinista con un futuro predecible. A esta imagen contribuyó también el éxito de la teoría de Newton de resolver el problema de dos cuerpos sujetos a la interacción gravitacional, para encontrar que las soluciones son círculos ( $\epsilon = 0$ ), elipses ( $\epsilon < 1$ ), parábolas ( $\epsilon = 1$ ) o hipérbolas ( $\epsilon > 1$ ), según el valor de la excentricidad  $\epsilon$  de la trayectoria y la energía total del sistema (figura 1).

Figura 2. Problema restringido de tres cuerpos. En el sistema rotante, en coordenadas adimensionales, las posiciones de las masas principales son  $(-\mu, 0)$  y  $(1-\mu, 0)$



### 3. El problema de tres cuerpos

La imagen de un mundo determinista y predecible experimenta un cambio radical cuando la teoría de Newton se aplica a un sistema de tres cuerpos sujetos a la interacción gravitacional. Como ilustración considérese el problema restringido de tres cuerpos (masas  $m_1$ ,  $m_2$  y  $m_3$ ) que se fundamenta en las siguientes suposiciones (figura 2):

1. Las masas finitas  $m_1$  y  $m_2$  son los cuerpos principales, mientras que el tercer cuerpo es de masa despreciable. Por ejemplo, el Sol y la Tierra (cuerpos principales) y un satélite.
2. Los cuerpos principales se mueven en órbitas circulares alrededor de su centro de masa  $O$ , con velocidad angular constante  $\omega_0$ .

3. El movimiento orbital del tercer cuerpo está en el plano orbital de los dos cuerpos principales.

En coordenadas adimensionales apropiadas,<sup>2</sup> el sistema dinámico consta de una partícula ( $m_3$ ) de dos grados de libertad que, en el sistema de coordenadas rotantes, se describe por el hamiltoniano

$$H(x, y, p_x, p_y) = \frac{1}{2}(p_x + y)^2 + (p_y - x)^2 + V(x, y) \quad (4)$$

donde

$$V(x, y) = -\frac{1}{2}(x^2 + y^2) - \frac{1-\mu}{r_1} - \frac{\mu}{r_2} \quad (5)$$

es la energía potencial de  $m_3$ ;  $p_x = v_x - y$  y  $p_y = x + v_y$  son momentos lineales;

$$r_1 = \sqrt{(x + \mu)^2 + y^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x - 1 + \mu)^2 + y^2}$$

designan las distancias de la partícula  $m_3$  a las masas  $m_1$  y  $m_2$ , respectivamente; el parámetro  $\mu$  está en el rango  $0 \leq \mu \leq 0.5$ .

Este sistema sólo tiene una constante de movimiento conocida, que es la energía  $E$  o, lo que es equivalente, la constante de Jacobi:

$$C = -2E = \frac{2(1-\mu)}{r_1} + \frac{2\mu}{r_2} + (x^2 + y^2) - \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \quad (6)$$

La existencia de solo una constante de movimiento<sup>3</sup> implica que el sistema dinámico es, por lo general, no integrable y que la partícula  $m_3$  presenta comportamiento caótico, excepto en casos excepcionales. Para  $C = 4.5$  hay cuatro puntos fijos elípticos que corresponden a órbitas periódicas alrededor de  $m_1$  y  $m_2$

<sup>2</sup> Unidad de longitud, la distancia entre las dos partículas  $m_1$  y  $m_2$ ; unidad de masa ( $m_1 + m_2$ ); el parámetro  $\mu$  se elige como  $\mu = m_2 / (m_1 + m_2)$ ; en el sistema rotante,  $m_1$  y  $m_2$  tienen coordenadas  $(-\mu, 0)$  y  $(1-\mu, 0)$ , respectivamente. Por ejemplo (Vela-Arevalo & Marsden, 2004), en el sistema Sol-Júpiter-cometa (Oterma),  $m_1$  es la masa del Sol,  $m_2$  la de Júpiter,  $m_3$  la masa del cometa,  $\mu = 0.0009537$ .

<sup>3</sup> Como el sistema tiene dos grados de libertad y es hamiltoniano, para que fuese integrable (comportamiento regular, no caótico) se necesitaría que existieran dos constantes de movimiento.

en una u otra dirección; para  $C = 4$  la trayectoria es caótica (www.scienceworld.wolfram.com).

El sistema restringido de tres cuerpos da lugar así a una variedad de comportamientos, regulares y caóticos. Es decir, él ilustra los resultados que obtuvo Henri Poincaré (1854-1912) cuando participó en la convocatoria internacional del rey Óscar II de Suecia y Noruega, en los años 1885-1886, que tenía como propósito determinar si el sistema solar era estable o inestable.

Los resultados fundamentales se pueden resumir así:

Figura 3. Las gráficas de la parte superior muestran la energía potencial  $V(x, y)$ , con sus dos pozos de potencial, y las correspondientes curvas de nivel. Las gráficas de la parte inferior son trayectorias que se distinguen entre sí por el valor de la energía; es decir, por la condición inicial, posición y momento de la partícula  $m\vec{v}$

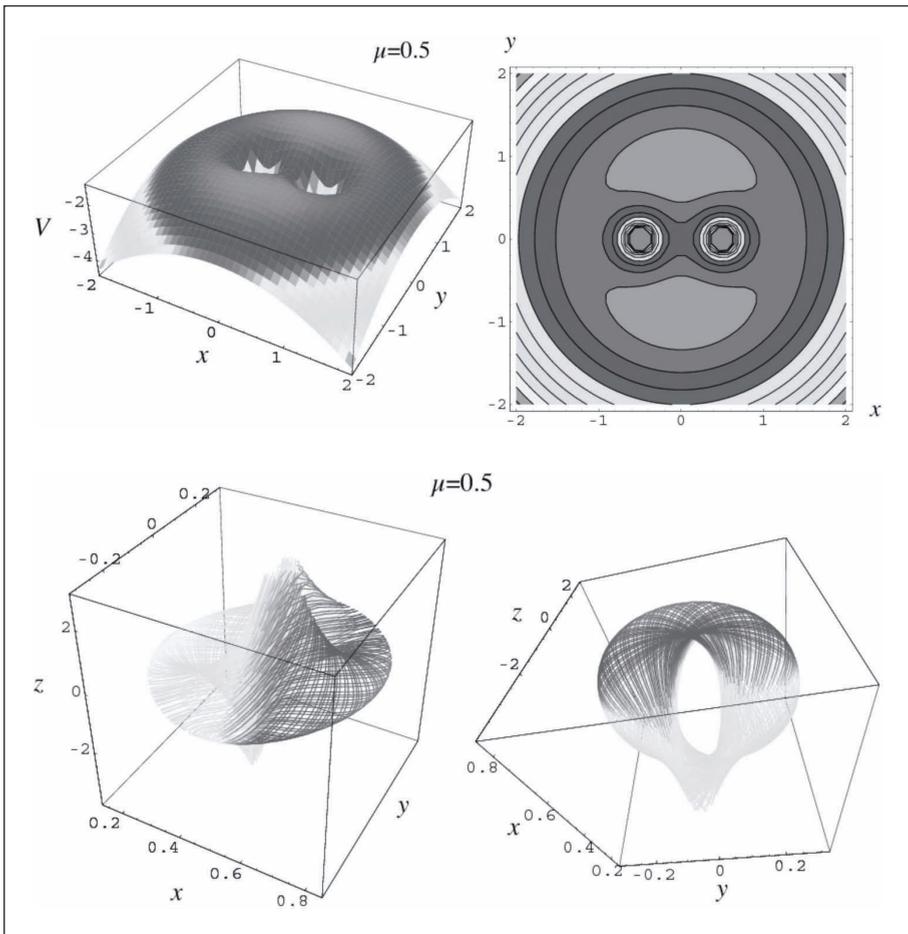
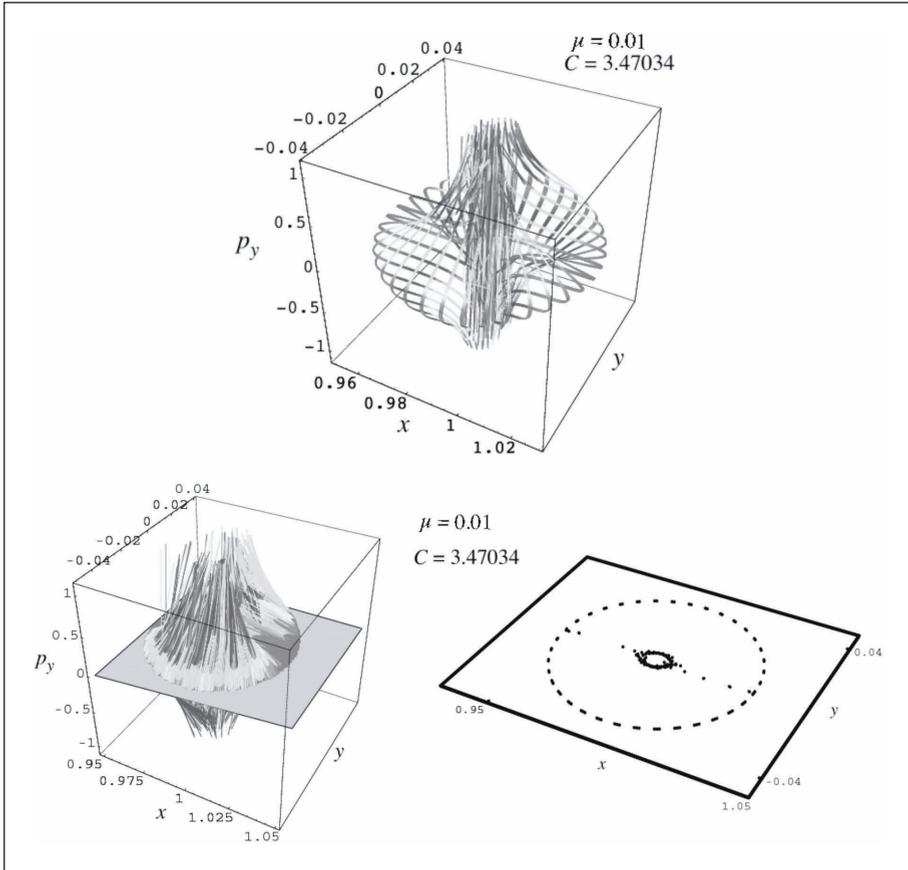


Figura 4. Las gráficas superior e inferior izquierda corresponden a una trayectoria de la partícula  $m_3$  en el espacio de fase. La superficie de Poincaré se construye colocando un plano transversal al flujo y pintando un punto por cada vez que la trayectoria atraviesa ese plano en una dirección predefinida. La figura inferior derecha es la sección de Poincaré que da información sobre el tipo de comportamiento del sistema, regular o caótico



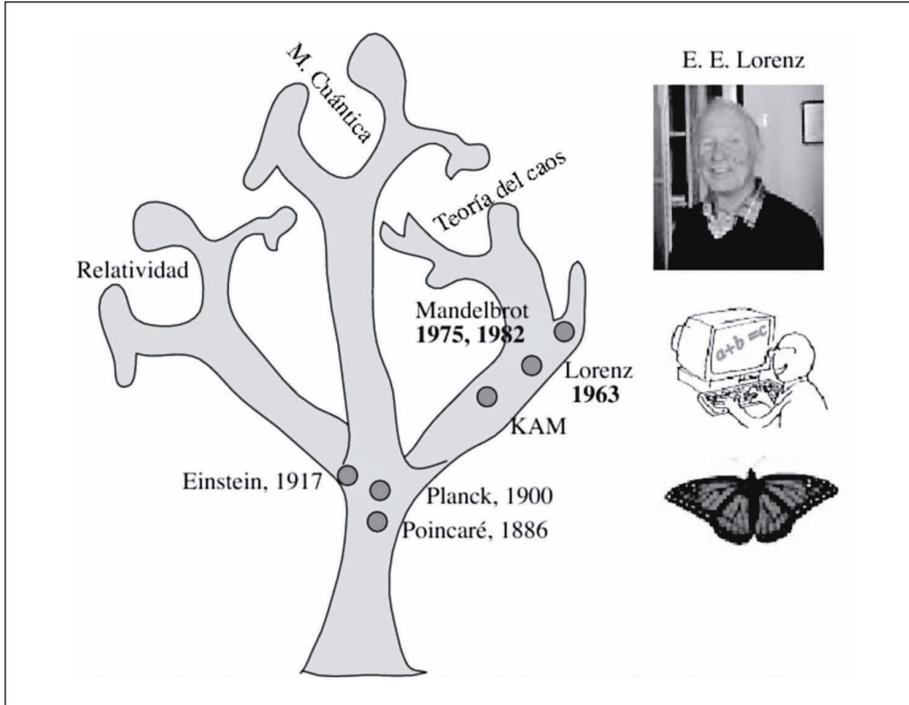
1. En el sistema objeto de estudio no existe un número suficiente de constantes de movimiento que permitan reducir el problema a uno soluble de menor dimensión. Este resultado contradice la filosofía predominante en esa época, según la cual los sistemas mecánicos tenían, en principio, un número suficiente de constantes globales de movimiento para permitir la solución de las ecuaciones de movimiento por cuadratura.

2. Poincaré usa con gran eficacia una aproximación geométrica en el espacio de fase: por ejemplo, en lugar de examinar completamente la órbita de un planeta (una partícula), mira las veces que el planeta pasa a través de una superficie perpendicular a la órbita, e introduce así lo que se conoce hoy en día como sección de Poincaré (un ejemplo en la figura 4).

Bajo ciertas condiciones el sistema presenta un fenómeno conocido con el nombre de resonancia, el cual da origen a un movimiento inesperado, altamente irregular (caótico, en lenguaje moderno), que se caracteriza por una fuerte *sensibilidad a cambios de las condiciones iniciales*. A este fenómeno Poincaré se refiere en 1908, en su trabajo de *Ciencia y método*, así: “Una causa muy pequeña, que se nos escapa, determina un efecto considerable que no podemos prever, y entonces decimos que dicho efecto se debe al azar”.

A modo de conclusión, la ciencia moderna se basa en la idea de modelar el sistema de interés como un sistema dinámico, con la creencia de que es posible entonces hacer predicciones sobre el comportamiento futuro del sistema. En general, esta creencia no es válida y no es posible predecir el futuro distante, debido a las contribuciones no lineales que aparecen en un sistema dinámico con tres o más variables de estado (en el caso de sistemas de tiempo continuo). La capacidad de la física newtoniana para describir el comportamiento de dos cuerpos sujetos a la interacción gravitacional no se puede extender a tres o más cuerpos, debido a la aparición de fenómenos de resonancia. La complicación no se debe a que las ecuaciones de Newton dejen de ser válidas, sino a que conllevan efectos no lineales, que hacen que pequeñas diferencias en el estado inicial se amplifiquen significativamente a medida que transcurre el tiempo.

Figura 5. La tercera revolución de las ciencias físicas es una unión de tres en una: relatividad especial, mecánica cuántica y teoría del caos. El teorema KAM, la invención del computador y el concepto de los fractales por Mandelbrot son ingredientes esenciales para el desarrollo de la teoría del caos



#### 4. La tercera revolución de la ciencia

Los resultados de Poincaré quedaron en el olvido durante más de setenta años, hasta que surgieron las contribuciones de Andrey Kolmogorov (1954), Vladimir Arnold (1963) y Jürgen Moser (1962) que dieron lugar al denominado teorema KAM. En ese lapso se completó la tercera revolución de las ciencias físicas, que puede considerarse como tres en una: relatividad especial, mecánica cuántica y teoría del caos (figura 5).

Los trabajos de Poincaré y el teorema KAM dejan en plena vigencia la mecánica newtoniana, pero cambian de manera radical sus implicaciones conceptuales. Estas implicaciones se extienden además a todas las ciencias que hacen uso de modelamientos dinámicos de carácter no lineal. En efecto, las consecuencias sobre la ingeniería y sobre las ciencias naturales, entre otras, se pueden resumir así:

- Estas ciencias hacen uso de la medición de cantidades observables y, en general, no existen instrumentos de medida que hagan mediciones con precisión infinita.
- Entonces, como pequeños errores de medición generan grandes cambios en el futuro distante, en sistemas no lineales no se puede garantizar la reproducibilidad de muchos fenómenos ni la predictibilidad del futuro distante.
- Por lo anterior, el *caos* interviene en todas estas ciencias por derecho propio. En el contexto de los sistemas dinámicos este término indica que los patrones nunca se repiten, pues bajo un régimen caótico no existen puntos de equilibrio o ciclos estables.

## 5. Hacia una cuarta revolución de la ciencia

Los sistemas se clasifican en simples, complicados y complejos (Campos, 2006). El sistema de tres cuerpos que se presentó en una sección anterior es un ejemplo de un sistema simple, no obstante que su dinámica puede dar origen a comportamiento regular y a comportamiento caótico. El Boeing 747-400, con sus  $3 \times 10^{16}$  partes, es un sistema complicado, pues ha sido diseñado para que todas las partes trabajen al unísono en cumplimiento de una función.

Por definición, un *sistema complejo* es un sistema abierto, formado por un gran número de elementos que interactúan de manera no lineal, que no se puede reducir a dos o más subsistemas distintos, y que presenta propiedades emergentes (Ahmed & Hashish, 2006; Campos, 2006; Richardson, 2005). Estas propiedades son una consecuencia de la desaparición del concepto de constituyentes elementales (Grigolini, Allegrini & West, 2007).

En adición al comportamiento caótico que surge por la naturaleza no lineal del sistema dinámico, en los sistemas complejos existe un comportamiento aleatorio de una naturaleza distinta. Como los sistemas complejos son sistemas abiertos están en permanente interacción con su medio ambiente, y este presenta fluctuaciones incontrolables que se denominan *ruido*. La presencia de ruido incide en las propiedades del sistema complejo objeto de estudio, en virtud de la interacción entre este y su medio ambiente.

En sistemas complejos, abiertos y lejos del equilibrio, se puede presentar la propiedad de *auto-organización*; es decir, la emergencia espontánea de nuevas estructuras y nuevas formas de comportamiento, caracterizadas por procesos

de retroalimentación. El origen de la auto-organización está en la interacción de los agentes entre sí y entre ellos y el medio ambiente del sistema.

La ciencia de la complejidad, que carece aún de una definición simple y universal, se puede definir como la ciencia dedicada al estudio de los sistemas complejos. Sin embargo, en sentido estricto, no se trata de una ciencia sino de un conjunto de ciencias que enfrentan el problema de estudiar sistemas complejos y problemas específicos por diferentes métodos. La ciencia de la complejidad, que está aún en su infancia, ha experimentado avances progresivos a partir de la segunda mitad del siglo XX y, como lo comenta Mainzer, “[e]l punto esencial de la aproximación de sistemas complejos es que desde un punto de vista macroscópico, el desarrollo de orden político, social o cultural no es sólo la suma de las simples intenciones sino el resultado colectivo de interacciones no lineales”.

Entender las leyes que subyacen en el estudio de sistemas complejos, si es que esas leyes existen, y entender la emergencia de propiedades colectivas son retos que, de ser superados, pueden conducir a una cuarta revolución de las ciencias. La tarea no es fácil, pues en el estudio de los sistemas complejos juegan papel importante, entre otros aspectos: (a) las interacciones entre los elementos y su número, (b) el carácter no lineal de esas interacciones, (c) los procesos de retroalimentación (*feedback*), (d) propiedades emergentes y de auto-organización, (e) la existencia de estados críticos y transiciones de fase, (f) leyes de potencia inversas, (g) la percolación, que en sistemas ecológicos incluye procesos epidémicos como fuego, enfermedades, parásitos.

Más allá de las leyes de Newton en la física o de las leyes de Kirchoff en teoría de circuitos, no se conocen leyes universales subyacentes a sistemas con dinámica no lineal compleja, como aquellos que intervienen en la ecología, en la biología, en la economía, entre otras áreas de la ciencia. Una manera de avanzar hacia el estudio de sistemas complejos de esa naturaleza requiere desarrollar técnicas para inferir el sistema dinámico, por ejemplo de la forma, que describe “razonablemente” las propiedades observadas en un sistema dado, bajo diferentes condiciones de los parámetros y de las condiciones iniciales. Un método para avanzar en esta dirección, que fue propuesto recientemente, constituye una invitación al lector para explorar ejemplos específicos de sistemas dinámicos con comportamiento complejo.

## Bibliografía

- Ahmed, E. & Hashish, A.H. (2006). On Modelling the Immune System as a Complex System. *Theory in Biosciences*, 124, 413.
- Bernal, J.D. (1985). *Science in History*. 4 vols. Boston: MIT Press.
- Campos, D. & Isaza, J.F. (2002). *Prolegómenos a los sistemas dinámicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Campos, D. (2005). Caos y complejidad: historia y aplicaciones. *Innovación y Ciencia*, XXII, 82.
- Campos, D. (2006, noviembre). *Modelos en la ciencia: sistemas simples, complicados y complejos*. Trabajo presentado en el Día de la Complejidad, organizado por el Grupo Complexus. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Grigolini, P., Allegrini, P. & West, B.J. (2007). In Search of a Theory of Complexity: An Overview on the Denton Workshop. *Chaos, Solitons and Fractals*, 34, 3.
- Jackson, E.A. (1992). *A First Look at the Second Metamorphosis of Science*. Santa Fe Institute. En [www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/95-01-001.pdf](http://www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/95-01-001.pdf).
- Richardson, K. (2005). The Hegemony of the Physical Sciences: An Exploration in Complexity Thinking. *Futures*, 37, 615.
- The Internet Encyclopedia of Philosophy*. [www.iep.utm.edu/research/iep/d/descarte.htm](http://www.iep.utm.edu/research/iep/d/descarte.htm)
- Vela-Arevalo, L.V. & Marsden, J.E. (2004). Time - Frequency Analysis of the Restricted Three - Body Problem: Transport and Resonance Transitions. *Classical and Quantum Gravity*, 21 S351.
- [www.scienceworld.wolfram.com](http://www.scienceworld.wolfram.com)

Este libro es el resultado de una red de trabajo sobre complejidad que viene trabajando hace ya varios años. Se trata de profesores de diversas universidades que han visto canalizados en varios otros libros su trabajo en el país, en un área novedosa que no cuenta con mucha bibliografía en Colombia.

El libro avanza en la exploración de dos temas principales: cómo y por qué las ciencias de la complejidad son una revolución científica y el trabajo en torno al problema de una teoría de la complejidad. Sin embargo, a la luz de estos dos ejes fundamentales, el libro contiene textos de muy alta calidad sobre aplicaciones y derivaciones, en el campo de la ingeniería en general.

