



Antecedentes, iniciadores y fundamentos de los estudios de la complejidad

*Fidel Martínez, Eloy Ortiz, Ania González y Humberto Brito**

Resumen

En este trabajo introductorio se caracterizan didácticamente varias figuras e ideas de los Estudios de la Complejidad, que han pautado los cambios radicales que tienen lugar hoy en la ciencia. Se exponen algunos argumentos históricos y epistemológicos que revelan el papel desempeñado por las ideas de Charles Darwin, Ludwig Boltzmann y Henri Poincaré, quienes desde diferentes disciplinas y contextos históricos sembraron la semilla para la confirmación científica de la revolucionaria concepción no-lineal de la realidad. Se utilizan estos antecedentes para revelar la necesidad del surgimiento en la década del 60 de la Teoría del Caos de Edward Lorenz, así como sus nexos con otras conquistas científicas, tales como la Teoría General de Sistemas de Ludwig Von Bertalanffy, los estudios de Ilyá Prigogine sobre las estructuras disipativas, la Topología de Stephen Smale, la Teoría de las Catástrofes de René Thom y la Geometría Fractal de Benoit Mandelbrot. A su vez, se muestra el valor de algunas ideas y conceptos fundamentales del Enfoque de la Complejidad para la comprensión y solución de los más disímiles problemas en varias esferas de la actividad humana.

Palabras clave: Complejidad, caos, topología, fractales.

Recibido: 05/07/08 • Aceptado: 15/11/08

* Profesores-Investigadores del Centro de Medicina y Complejidad de la Universidad Médica "Carlos J. Finlay" de Camagüey, Cuba. Correo electrónico: fidelmtnez@infomed.sld.cu, eoh@infomed.sld.cu, gmania@infomed.sld.cu, hbrito@infomed.sld.cu

Antecedents, Initiators and Foundations for Studies of Complexity

Abstract

This introductory work didactically characterizes several ideas and persons related to studies of complexity that have proposed the radical changes taking place today in science. Some historical and epistemological arguments are expressed that reveal the role played by the ideas of Charles Darwin, Ludwig Boltzmann and Henri Poincaré, who from different disciplines and historical contexts, planted the seeds for scientific confirmation of the revolutionary, non-linear concept of reality. These antecedents are used to reveal the need for the emergence of Edward Lorenz's chaos theory in the 1960s, as well as its relationship with other scientific conquests such as: the general systems theory by Ludwig Von Bertalanffy, the studies of dissipative structures by Ilyá Prigogine, the topology of Stephen Smale, the catastrophe theory by René Thom and fractal geometry by Benoit Mandelbrot. The paper also shows the value of some fundamental ideas and concepts of the complexity focus for understanding and solving the most dissimilar problems in various spheres of human activity.

Key words: Complexity, chaos, topology, fractals.

1. Introducción

Si se quiere tener hoy un elevado nivel de actualización científica, acorde con los avances más recientes y como premisa para realizar una mejor educación en el contexto de nuestras culturas, se debe reconocer ante todo que estamos inmersos en un verdadero torbellino intelectual, identificado ya en el mundo académico como una nueva *Revolución del Saber*, caracterizada por una radical modificación de nuestros patrones culturales y mentales, respecto al conocimiento en general y la ciencia en particular.

La mayoría de los científicos y humanistas reconocen hoy que "... cuando un paradigma científico va agotando su capacidad de explicar la realidad, su poder de generar conocimientos útiles en el área para la cual se creó, lo más sabio y lógico es pensar en concebir otro, cambiar el "modo de pensar" a partir de nuevos conceptos básicos, de nuevos axiomas, de nuevos presupuestos" (Martínez, 1996: 34).

El reconocimiento de la necesidad de un cambio revolucionario en la comprensión del conocimiento científico se viene consolidando gracias a la obra de decenas de científicos, filósofos y humanistas, quienes enfatizan la urgencia de potenciar el proceso de integración teórica y práctica de los saberes, como vía efectiva para dar solución a los complejos problemas que enfrenta hoy el hombre.

De hecho, “*un nuevo saber [...] está en construcción desde por lo menos el último tercio del recién finalizado siglo. Un saber holístico, no lineal y transdisciplinar de nuevo tipo*” (Sotolongo, 2007: 1).

El impacto que ya está ejerciendo los *Estudios de la Complejidad* ha obligado al *replanteo de la relación Filosofía - Ciencia*, pues el análisis de los fenómenos no lineales y caóticos primero y la aparición luego de sus correspondientes enfoques y teorías, generan reales anomalías en las concepciones filosóficas modernas. Se está produciendo un proceso de transgresiones disciplinares crecientes que ocasionan colisiones, conflictos, reacomodos y hasta abandonos epistemológicos, reflejo de las “*crisis paradigmáticas*” que hoy tienen lugar en todos los saberes y formas de la cultura.

“Las ideas de la complejidad son el resultado de elaboraciones científicas en diversos campos de la investigación -biología, física, geometría, lógica, matemáticas, meteorología, neurociencias, química, sociología, etc. Como productos científicos genuinos, las nuevas teorías científicas no han de rendir cuentas filosóficas a nadie. Por el contrario,... esas ideas representan elaboraciones científicas específicas que tienen además una pretensión transdisciplinar y generalizadora -que nadie pone en duda-” (Delgado, 2002: 3).

Para la comprensión de la esencia de los Estudios de la Complejidad se exige tener en cuenta varias temáticas:

- Su impacto como multidimensional proceso de integración de las ciencias naturales y sociales.
- El estudio de sus antecedentes, iniciadores, teorías y enfoques con su gran diversidad de visiones y propuestas epistemológicas y metodológicas de diferentes matices ideológicos y referentes culturales.

- La relación entre las ideas de la complejidad y la dialéctica materialista.
- La exigencia de un creativo proceso de asimilación endógena de estos estudios en el contexto de países en vías de desarrollo.
- El enorme *reto educativo en la divulgación* de las ideas y el lenguaje de la complejidad a los medios de difusión masiva, que eviten el reduccionismo y las simplificaciones que menoscaben su riqueza y efectividad.
- *La demanda de la necesaria sistematización didáctica de sus fundamentos epistemológicos* en permanente construcción, que permitan desarrollar con éxitos la enseñanza tanto de pre como postgrado.
- La necesidad de demostrar el valor práctico de los *Estudios de la Complejidad* en todas las esferas de la vida, pero en especial para el sector de la salud.

No obstante a la diversidad de temáticas relacionadas con el objetivo planteado, aquí solo se hará referencia directa a algunas de ellas, por lo que *se caracterizan algunos de los antecedentes, iniciadores y fundamentos de los Estudios de la Complejidad.*

2. Antecedentes de las concepciones científicas no-lineales

Ante todo se precisa identificar un interesante y paradójico fenómeno histórico. En paralelo con el neopositivismo imperante durante el final del siglo XIX y toda la primera mitad del siglo XX, así como casi en la clandestinidad científica, se fueron creando las bases teóricas de la actual emergente *Epistemología de los Estudios de la Complejidad*. De manera que los antecedentes más representativos se pueden encontrar en la obra innovadora de integración de saberes realizada por toda una pléyade de científicos de las ciencias naturales y las matemáticas.

Precisamente, no obstante a que los científicos llevaban ya varios siglos tratando de comprender las leyes naturales, el mundo académico todavía padecía de “... *una ignorancia especial en lo que concierne a los desórdenes de la atmósfera y del mar alborotado; a las fluctuaciones de las poblaciones silvestres de animales y vegetales; y, para abreviar, a las*

oscilaciones del corazón y del cerebro. La porción irregular de la naturaleza, su parte discontinua y variable, ha sido un rompecabezas a ojos de la ciencia o, peor aún, una monstruosidad” (Gleick, 1988: 11).

Sin embargo, la explicación científica a todos estos fenómenos complejos se fue creando poco a poco, gracias ante todo, a la creciente integración de las disciplinas. Por tanto, para lograr una consecuente sistematización de *los fundamentos históricos y epistemológicos de los Estudios de la Complejidad*¹ se precisa revelar las ideas seminales contenidas en la obra de muchos científicos y pensadores desde la antigüedad, sin embargo, a los autores aquí sólo les interesa la modesta tarea de revelar al menos el papel desempeñado por las ideas de *Charles Darwin, Ludwig Boltzmann y Henri Poincaré*, quienes desde diferentes disciplinas y contextos históricos, criticaron y enriquecieron las ideas más avanzadas de su tiempo.

Desde el inicio del siglo XIX, una de las grandes conquistas de la Física fue la creación de la *Teoría de la termodinámica clásica*. Es conocido que uno de sus precursores fue el físico francés Nicolás L. Sadi Carnot (1796-1832), quien aportó los primeros argumentos teóricos. Luego en 1850, otro físico -el alemán *Rudolf Clausius* (1822-1888)- formuló sus principios y leyes fundamentales. Si se toma como punto de partida la concepción establecida por la Termodinámica clásica en la naturaleza “... *hay una tendencia en los fenómenos físicos desde el orden hacia el desorden*” (Capra, 1996: 38).

A su vez, a lo largo del mismo siglo XIX, también se realizaron extraordinarios descubrimientos en otras ciencias. En especial, se ha reconocido por muchos autores que la biología moderna, afortunadamente, no tuvo un precursor formado en el paradigma disciplinar propio de las universidades, sino por el contrario *Charles Darwin* (1809-1882) fue un autodidacta de formación de perfil amplio, de manera que gracias a la in-

1 Estudios históricos sobre los fundamentos de la Complejidad están hoy proliferando tanto en la literatura dedica a las generalizaciones científicas como filosóficas. En nuestra área geográfica ya están apareciendo trabajos en esa dirección: Martínez Miguélez, Miguel, 1996, 1997, 1998b, 2002; Maldonado, Carlos Eduardo, 1999; Najmánovich, Denise, 2001; 2005; Delgado Díaz, Carlos, 2002, 2004, 2006; González Casanova, Pablo, 2004; Sotolongo Codina, Pedro Luis, 2000, 2003, 2004, 2006, 2007b y 2007d; Martínez Álvarez, Fidel, 2007a).

tegración de sus conocimientos y la consecuente constatación y verificación práctica en su viaje alrededor del mundo, lo llevaron a la creación de la *Teoría de la Evolución de las Especies* (1859), obra *interdisciplinaria* por antonomasia y una de las más exitosas como precursora de *las formas prácticas de integración del saber en la historia*.

Entre los valores revolucionarios de la obra de Darwin figura el hecho de haber confirmado, en una ciencia en particular, *la dialéctica (filosófica) tesis hegeliana de la mediación*, a través de los conceptos concomitantes a ella tales como *medio, entorno y adaptación*. Este hecho tuvo una importancia trascendental para el ulterior desarrollo del conocimiento científico, pues abrió una brecha en la visión positivista que se fortalecía a finales del siglo XIX.

En la monumental obra de Darwin estuvieron subyacentes también *otras ideas más avanzadas* que hoy son reconocidas como esenciales dentro de los *Estudios de la Complejidad*.

De hecho, la concepción de Darwin “... *combina dos elementos...: la idea de fluctuaciones y azar, de procesos estocásticos y la idea de evolución, de irreversibilidad. Pongamos de relieve que, a nivel biológico, de esa asociación resulta una evolución que corresponde a una complejidad creciente y a la autoorganización*” (Prigogine, 1983: 19).

Si se relee con detenimiento estos dos últimos párrafos se revela una peculiar contradicción *entre la comprensión por los físicos de las leyes de la termodinámica y las concepciones de los evolucionistas sobre las propiedades del comportamiento biológico*. Esta fue una de las causas (identificada varias décadas después) de la crisis paradigmática que caracterizó el cambio de siglo del XIX al XX.

Esta contradicción entre el paradigma físico y el biológico radica en que, según la *Segunda Ley de la Termodinámica* (según el fenómeno de la *entropía*)² como *índice de evolución o transformación del sistema*, que expresa la degradación irreversible de la aptitud del calor para trans-

2 La segunda Ley o Principio de la Termodinámica expresa que “... la energía calorífica no puede reconvertirse enteramente y pierde una parte de su aptitud para efectuar trabajo, en verdad, introduce la idea, no de disminución (la cual contradiría el primer principio), sino de degradación” (Valle, 2004).

formarse y efectuar trabajo, introducido por *Clausius*, en todo sistema físico aislado se revela una inevitable tendencia del comportamiento del sistema del orden al desorden. Mientras que, por otro lado, en un sistema vivo (abierto) el proceso es inverso, pues el comportamiento de los organismos vivos es crecientemente complejo y constantemente alejado del equilibrio, pero a la vez, tiende a un orden dinámico de autoorganización permanente, es decir, del desorden al orden.

Esta contradicción y otros fenómenos asociados a ella constituyeron la antesala del nacimiento de los *estudios de los sistemas dinámicos no-lineales* y dentro de los primeros antecedentes está el estudio de la turbulencia en tubos, iniciado desde 1883 por el ingeniero británico *Osborne Reynolds*.

“El famoso número de Reynolds servirá para distinguir entre flujo laminar y turbulento. El flujo es laminar por ejemplo al abrir una canilla moderadamente, se transformará en borbotones desordenados al abrirla al máximo (turbulencia). También podemos observar la diferencia entre flujo laminar y turbulento en el humo que sale de un cigarrillo depositado en el cenicero. Primero asciende laminar y ordenado hasta una altura de unos 15 cm. para luego mostrarse desordenado y turbulento” (Casabon, 2001: 9-10).

El fenómeno de la *turbulencia* es un ejemplo del fenómeno de la *criticalidad*. *Reynolds* trabajaba experimentalmente con fluidos que se tornaban turbulentos o regresaban al régimen laminar y sin conocimientos teóricos que le permitieran entender cómo era que esto sucedía, a pesar de todo encontró un valor numérico que permitió predecir la ocurrencia del cambio. Estaba descubriendo el parámetro físico que representa el valor crítico o umbral para que ocurra el tránsito del orden al caos en fluidos. El *número de Reynolds* tiene la fórmula matemática $N_R = \frac{\rho v D}{\eta}$,

donde ρ representa la densidad del fluido, η es el coeficiente de viscosidad, v la velocidad media del fluido por el tubo y D el diámetro.

La turbulencia es un estado que no puede obtenerse si se trabaja con el modelo de líquido sin viscosidad. Habitualmente se lee en los libros que el *número de Reynolds* fue resultado sólo de la práctica experimental y que no se sustenta en teoría alguna. Sin embargo, hoy sabemos que la

turbulencia es uno de los fenómenos típicos sistematizados en la *Teoría del Caos*.

Otro crucial antecedente se encuentra en los trabajos del físico austriaco, padre de la mecánica estadística, *Ludwig Boltzmann* (1844-1906) especialmente, su interpretación microscópica del aumento de entropía en los sistemas dinámicos gaseosos. Además, una de las más significativas contribuciones de *Boltzmann* fue fundamentar el vínculo de la probabilidad con la entropía, mediante su conocida fórmula³ así como mostrar el papel de los procesos irreversibles en los sistemas dinámicos no-lineales (Navarro, 2002: 19-25).

Con las ideas de *Boltzmann* y *Darwin* se produce un fenómeno paradójico que su solución fue la clave para revelar las similitudes y las especificidades de los sistemas dinámicos no-lineales en los fenómenos físicos y en la vida, respectivamente. En cuanto a las similitudes se destaca que para ambos científicos *evolución*, *probabilidad* y *azar* están íntimamente interrelacionados. Sin embargo, en cuanto a las especificidades de los sistemas físicos y biológicos, sus ideas son diametralmente contrapuestas, pues para *Boltzmann* en el sistema físico: "... la aproximación al equilibrio corresponde a la destrucción de las condiciones iniciales prevalentes, al olvido de las estructuras primitivas; contrariamente al enfoque de Darwin, para quien evolución significa creación de nuevas estructuras" (Prigogine, 1983: 21).

La comprensión de esta controvertida relación entre las visiones de *Boltzmann* y *Darwin* es de extraordinaria importancia para encontrar una solución a las interminables disputas que todavía hoy se suscitan sobre la universalidad y especificidad de las leyes del comportamiento de los fenómenos físicos, químicos y biológicos, así como de las regularidades de los fenómenos sociales. "El propio concepto de ley que surge en la época de Descartes, Newton, época de monarquías absolutistas debe ser revisado" (Prigogine, 1983: 24).

El ideal clásico de la ciencia fundado en el determinismo, la predicción y la causalidad lineales no dejaba ver las dimensiones probabilística

3 La fórmula es $S = k \ln P$, donde k es la *constante de Boltzmann*, en ella se muestra que la *Entropía* (S) está estrechamente vinculada con la Probabilidad.

e irreversible de los fenómenos, de manera que no había lugar para el azar y la no-linealidad. En paralelo con el predominio hegemónico de ese paradigma moderno de racionalidad, las ideas de *Darwin* primero y *Boltzmann* después, en contextos muy diferentes, sembraron una semilla revolucionaria en la historia del pensamiento científico.

Precisamente lo novedoso de la idea de *la paradoja del tiempo*, revelada en las contrapuestas y a la vez complementarias visiones contra el determinismo, desarrolladas por *Darwin* y *Boltzmann* en épocas y ciencias diferentes, radica en el hecho de que los procesos de los fenómenos no lineales son *irreversibles*. Este carácter es inevitable porque estos fenómenos reflejan las complejidades de las formas particulares de movimientos y las escalas en las que se producen (Prigogine, 1997: 7-10).

En este mismo espíritu, como contracorriente también al ideal clásico de la ciencia, el científico francés *Henri Poincaré* (1854-1912) realizó importantes y originales aportes al estudio de varios fenómenos asociados a la no linealidad, que fueron marcando nuevas pautas para el posterior desarrollo de las matemáticas, especialmente en áreas tales como las *ecuaciones diferenciales*, la *probabilidad*, la *teoría de las funciones*, la *topología*, entre otras.

En el estudio de la topología el genio francés se destacó por su conjetura sobre espacios de cinco o más dimensiones. Para Poincaré, la topología y los sistemas dinámicos no eran más que dos caras de una misma moneda. De hecho, puede afirmarse que "... fue el último gran matemático que aportó imaginación geométrica para tratar de las leyes del movimiento del mundo físico. Fue el primero en darse cuenta de la posibilidad del caos, sus escritos insinuaron una especie de impredecibilidad" (Gleick, 1988: 54).

Concretamente, *Poincaré* desarrolló por primera vez en el campo teórico, *la idea del carácter impredecible de la dinámica de algunos sistemas mecánicos*, refiriéndose a la solución matemática del *problema de los Tres Cuerpos Celestes* que interaccionan gravitacionalmente. En esencia, se puede resumir así este genial aporte de Poincaré:

"En cualquier sistema idealizado de dos cuerpos las órbitas son iguales. Pero la ecuación para tres cuerpos no tiene solución exacta, ya que el efecto adicional del tercer cuerpo se debe sumar a la solución del sistema de dos cuerpos, en una

serie de aproximaciones sucesivas, donde cada aproximación es menor que la anterior... Poincaré reveló que el caos, o la potencialidad para el caos, es la esencia misma de un sistema no lineal y la retroalimentación puede magnificar los efectos más pequeños. Así un sistema simple puede estallar en una perturbadora complejidad” (Valle, 2004).

Hoy se reconoce que Poincaré fue un precursor de la Teoría del Caos:

“... Pues a él le debemos, el tratamiento “geométrico” de las ecuaciones diferenciales, el uso del espacio de las fases y los famosos mapas de Poincaré. Podemos preguntarnos por qué hubo que esperar más de medio siglo para que el caos aparezca. Esto se debe a dos razones. Por un lado a la falta de computadoras y por otro lado al hecho de que haya prevalecido el “programa” de Hamilton y de Hilbert en la física clásica y cuántica, en vez del programa de Poincaré (Casaubon, 2001: 9-10).

Poincaré destacó también por su desarrollo de las llamadas funciones *fuchsianas*, y por sus contribuciones a la mecánica analítica. Sus estudios engloban investigaciones sobre la teoría electromagnética de la luz y sobre la electricidad, mecánica de fluidos, transferencia de calor y termodinámica.

Fueron muy valiosas las contribuciones de *Poincaré*, como las del físico holandés *Hendrik Antoon Lorentz* (1853-1928), para el surgimiento de Teoría de la Relatividad de Albert Einstein. Dos indudables antecedentes en las matemáticas que *Poincaré* conoció fue la obra de su compatriota *Joseph Fourier* (1768-1830) sobre la distribución del calor, así como de los trabajos del genio alemán *George Cantor* (1845-1918), quien desarrolló las series de Fourier hasta la teoría de los números irracionales. *Cantor* también formuló la *Teoría de conjuntos*, sobre la que se basa la matemática moderna, pues introdujo los números infinitos (Ribnikov, K., 1991; Bataud Martínez, Lorgio; Estrada Hernández, Yanelis, 2006).

Evidentemente que estos no son los únicos argumentos para demostrar que, no obstante, a la *Revolución científica* del cambio de siglo XIX al XX, continuó predominando, en esencia, una visión todavía determinista, lineal y fragmentada de la realidad. Este ideal positivista del conocimiento, fundado en la visión optimista de la racionalidad moderna, aunque recibió un fuerte impacto se modificó, logró sobrevivir e, in-

cluso pudo perpetuarse por muchas décadas más, gracias a los aires liberadores del *neo-positivismo* en la primera mitad del siglo XX.

En las primeras décadas del siglo XX aparecen otras ideas seminales sobre la concepción dinámica no-lineal de la realidad (anexo 3), pero sólo se pudieron difundir luego de que se librara una dura lucha contra la hegemonía del reduccionista *ideal de la racionalidad moderna*, consolidado primero por el positivismo y perpetuado luego por el neopositivismo. Este ideal se basaba en el determinismo, la causalidad lineal y el desmedido optimismo en el supuesto control y dominio de la naturaleza por el hombre. Precisamente, Poincaré fue uno de los más persistentes luchadores contra tal concepción del mundo. Pero, evidentemente, no se le prestó la debida atención. Se puede afirmar que "... el único matemático que atendió con seriedad a Poincaré en las décadas de 1920 y 1930 fue George D. Birkhoff, quien por curiosa casualidad enseñó durante breve tiempo en el MIT al estudiante Edward Lorenz" (Gleick, 1988: 323).

3. La Teoría del Caos

A pesar de las valiosas contribuciones desde finales del siglo XIX y durante toda la primera mitad del siglo XX, de las cuales surgieron varios enfoques y teorías, no fue hasta inicios de la década del 60 que se reconoce el nacimiento de una nueva ciencia: la Teoría del Caos⁴. Precisamente, el protagonista de este acontecimiento fue el matemático y meteorólogo estadounidense *Edward Lorenz* (1917-2008), quien mientras trabajaba en el pronóstico del estado del tiempo, mediante un modelo matemático con tres ecuaciones no lineales en una computadora, observó que la evolución del sistema, para dos condiciones iniciales muy cercanas, llegaba a estados completamente diferentes en un tiempo posterior, es decir, la evolución del sistema tenía alta sensibilidad a las condiciones iniciales.

4 En las publicaciones populares difundidas en *Internet* todavía no se tiene una comprensión clara de la *Teoría del Caos* y sus desarrollos posteriores. De aquí la urgencia de estudios de sistematización de esta naturaleza. Por ejemplo, en la mundialmente famosa *Enciclopedia Encarta* no aparece ni siquiera el reconocimiento a *Edward Lorenz* como su creador.

Antes y durante toda esa década, varios científicos hicieron descubrimientos muy similares a los de *Lorenz*. Muchos comenzaron a revelar o reinterpretar un conjunto creciente de propiedades complejas comunes en los más disímiles fenómenos de la realidad. Sin embargo, el verdadero iniciador fue *Lorenz*, porque sus ideas, demostradas con un experimento bien convincente, fueron las que marcaron el comienzo del viraje contra el paradigma científico determinista.

En esencia, el cambio de paradigma se inicia cuando *las nuevas concepciones* enfatizan la idea de que “la ciencia clásica privilegia el orden y la estabilidad, mientras que en todos los niveles de observación hoy reconocemos el papel primordial de las fluctuaciones y la inestabilidad” (Prigogine, 1997: 10).

Desde un nuevo enfoque, *Lorenz* considera el *caos* como “...aquel comportamiento dinámico aperiódico (es decir, oscilaciones irregulares, que no se repiten nunca, de período infinito) que aparece bajo condiciones totalmente deterministas y que presenta gran sensibilidad a las condiciones iniciales” (Salazar, 1997: 33).

Este fenómeno se ha conocido metafóricamente como ‘*Efecto mariposa*’, pues enfatiza la idea de la concatenación universal, es decir, el vínculo o conectividad directa o indirecta que establecen todos los fenómenos de la realidad. Por primera vez, *Lorenz* mostró sus resultados en 1963 en el artículo titulado: *Flujo determinista no periódico*, publicado en la revista sobre meteorología *Journal of Atmospheric Science* no muy popular en esa época. Este hecho provocó que el artículo estuviera prácticamente invisible para los científicos durante toda aquella década.

Afortunadamente, en 1972, *James A. Yorke* recibió de un amigo el trabajo de *Lorenz* y, luego de discutirlo varias veces con *Robert May* y otros colegas, lo reinterpretó y divulgó en su artículo *Period three Implies Chaos*, publicado en 1975. Todo el esfuerzo de difusión de las ideas de *Lorenz*, realizadas por *Yorke* y sus colegas, permitió demostrar, mediante otros ejemplos en la naturaleza, *algunas características* que diferenciaban al *sistema caótico* estudiado por *Lorenz* del resto de los sistemas que habitualmente se conocían:

1. La relación causa-efecto es *no-lineal*, pues los efectos generan lazos de retroalimentación que afectan también a sus premisas causales.

2. La alta tasa de no linealidad conduce a la *inestabilidad y dinámica caótica*.
3. Este tipo de sistema posee alta sensibilidad a las condiciones iniciales, por lo que sistema tiene un comportamiento impredecible a largo plazo.
4. Sin embargo, el caos es determinista, pues se parte de un conjunto finito y reducido de variables.
5. El Caos es una mezcla sutil de orden y desorden, pero se revela la *invarianza escalar* que presenta el atractor extraño en el espacio de fases. Por lo que se evidencian *patrones de ordenamiento*. De manera que el sistema *es* predecible a corto y mediano plazo (con determinado grado de certeza).

Por tanto, el mérito de *Lorenz* y sus continuadores radica en que con el descubrimiento de estas propiedades, se modifica radicalmente la concepción tradicional que se tenía del *Caos*.⁵

Además, estos estudiosos del caos comenzaron a revelar que ya desde hacía casi un siglo se venía identificando la no linealidad en fenómenos físicos y químicos ordinarios. De hecho, se había demostrado con ejemplos prácticos el carácter no-lineal del comportamiento de algunos sistemas, especialmente en la dinámica de los fluidos. Un caso muy ilustrativo es la famosa *Ecuación de Navier-Stokes*, la cual alude a la "... velocidad, presión, densidad y viscosidad, pero es no-lineal. Por ello, resulta a menudo imposible precisar la índole de esas relaciones... es como recorrer un laberinto cuyas paredes cambien de posición a medida que se avanza" (Gleick, 1988: 32).

En las décadas del 70-80, *Lorenz* y sus seguidores desarrollaron estudios en diferentes procesos físicos y químicos para confirmar los fundamentos de la *Teoría del Caos*, lo cual se demostró en experimentos sobre la convección térmica en fluidos. Otro irrefutable descubrimiento de

5 El concepto de *Caos*, desde el pensamiento griego antiguo, se ha contrapuesto directamente al concepto de *Cosmos* (Orden o Armonía), es decir, se ha asumido como *Desorden*, sin embargo, hoy las definiciones científica de *Caos* subrayan también otras propiedades que deben poseer los fenómenos para que se les pueda calificar de *caóticos*.

no linealidad fue revelado con la rueda de agua o *Noria de Lorenz*, conocido sistema que revela un sorprendente comportamiento complejo en tan sencillo y antiquísimo artefacto mecánico (Ídem, 1988: 35).

En los sistemas dinámicos abiertos que son predominantes en la realidad se manifiestan *comportamientos oscilatorios, caóticos, inestables, no-lineales, retroactivos, etc.*, pues en su dinámica interior se producen *fluctuaciones*, mientras que en sus relaciones con el entorno reciben *perturbaciones* e interactúan de las más variadas formas e intensidades con otros sistemas dinámicos. Sin embargo, el estudio de estas prolíferas formas de comportamiento parte de *un principio central*, caracterizado por *Lorenz*, el cual postula que “*en el caos existen patrones de orden*”, de manera que para comprenderlo, ante todo, se debe revelar las interioridades de la dinámica compleja en su comportamiento.

En verdad, la Teoría del Caos constituye el fundamento, pero hoy es sólo un punto de partida dentro de las decenas de teorías y enfoques que conforman hoy los Estudios de la Complejidad. Por tanto, para ilustrar la evolución de esta concepción no-lineal de la realidad se caracterizarán las ideas de otros investigadores que identificaron nuevas propiedades del comportamiento complejo en disímiles fenómenos de la realidad. Esta pesquisa histórica constituye hoy una premisa esencial para la sistematización de los fundamentos epistemológicos de los Estudios de la Complejidad.

De hecho, se pudiera comenzar por cualquiera de los otros fundadores, sin embargo sería más sensato, dadas las exigencias de la necesaria síntesis en este trabajo, caracterizar las ideas de los investigadores de aquellas *propiedades más generales del comportamiento complejo* (anexo 4), que fueron reveladas antes, en paralelo y después del descubrimiento de Lorenz.

Se reconoce que existen muchísimas *teorías, enfoques e ideas* que tributan directa o indirectamente al torrente de la *Complejidad* pero por su riqueza y profusión no se pueden tratar ni resumidamente todas aquí. Lo cierto es que muchas están asociadas de una forma u otra a los nombres de varios iniciadores y continuadores tales como *Kolmogorov, Satin, John Von Neumann, Oskar Morgenstern, Norbert Wiener, Ross Ashby, Claude Shannon, Warren Weaver, Warren McCulloch*, los miembros del Grupo de Santa Cruz (*Robert Shaw, Norman Packard, Doyne Farmer y James Crutchfield*); además, *Walter Pitts, David Ruelle y Floris Takens, Heinz Von Foerster y Ernst von Glaserfeld, Murray Gell-Mann, George Zweig, Joshua Epstein,*

*Stuart Kauffman, John Holland, Philip W. Anderson, Anatol Rapoport, W. Boguslaw, W. Churchman, Erwin Laszlo, Niklas Luhmann, Edgar Morin, Fritjof Capra, Humberto Maturana, Francisco Varela, Norman Packard, Lofti Zadeh, entre otros*⁶.

Desde la década del 70 del pasado siglo, un especial continuador de la nueva ciencia fue el investigador estadounidense *Mitchell Jay Feigenbaum* (1944-), quien previó ideas fundacionales para la *Teoría del Caos*, pues reveló determinados *esquemas recurrentes de comportamiento en sistemas que tienden hacia el caos*.

Estos peculiares esquemas en el comportamiento de este tipo de fenómenos implican *constantes* que se han conocido como los *números de Feigenbaum*⁷. Precisamente, este consejero de científicos se planteó que:

“... para entender cómo la mente humana entresaca algo del caos de la percepción, había que entender de qué manera el desorden produce universalidad” (Ej.: vistos de muy lejos, los movimientos de una familia en un picnic parecen caóticos). Al comparar la evolución de diferentes funciones matemáticas que producen bifurcaciones llegó finalmente (1976) a una teoría y un procedimiento matemático aplicable en forma universal. Este trabajo llevó a realizar el 1º Congreso sobre “Ciencia del Caos” en Como, Italia (1977) y las pruebas matemáticas definitivas las produjo Oscar Lanford III en 1979” (Lewin, 1995: 56-60).

- 6 Estos y otros investigadores no mencionados aquí han estado agrupados por todo el mundo en instituciones científicas interdisciplinarias tales como: el Institute of Nonlinear Science de la Universidad de California en Santa Cruz, el Center for Nonlinear Dynamics de la Universidad de Texas en Austin, el Institute of Nonlinear Science de la Universidad de California en San Diego, el Nonlinear Physics Group del Institut für Angewandte Physics en Alemania, el Control of Complex Systems Lab. de la Russian Academy of Sciences, el Grupo de Sistemas Complejos de la Universidad Politécnica de Cataluña, etc.
- 7 En 1975 *Feigenbaum*, utilizando los pequeños ordenadores HP-65, descubrió que en los sucesivos periodos de bifurcación se tiende a producirse *una constante*. Demostró que el mismo comportamiento, con la misma constante matemática, se produciría dentro de una amplia clase de funciones matemáticas, antes del inicio del caos. En esencia, *Feigenbaum* mostró que existen regularidades en la transición hacia el régimen caótico: las λ_n convergen a λ_∞ en forma de serie geométrica con un coeficiente $\delta \cong 4.6692$, por lo que existe universalidad métrica.

Así pues, la posición de las diferentes *bifurcaciones* en los *sistemas complejos* que van camino al *Caos* están regidas por *la ley de universalidad de Feigenbaum* (la universalidad es más bien un principio que una ley), ideas avanzadas esclarecidas muy bien varias décadas después (Strogatz, 1994).

El aporte fundamental de Feigenbaum a la Teoría del Caos consiste en la caracterización científica del principio de la universalidad del comportamiento caótico de los sistemas, el cual "... se manifiesta en la existencia del *orden dentro del caos*, es decir, la aparición del comportamiento caótico responde a unas *pautas universales* y perfectamente determinadas. Este orden se manifiesta incluso en el mismo surgimiento del caos a través de la ruta de desdoblamiento de períodos de *Feigenbaum*. En un sistema que oscila con un período determinado en un tiempo determinado, al variar las condiciones de control, pueden ocurrir sucesivos desdoblamientos de período de la oscilación, dando lugar en el límite una oscilación de período infinito (caos). La universalidad del caos es también cuantitativa ya que la razón de convergencia de las sucesivas etapas de desdoblamiento de período (d) es una constante universal conocida como constante de Feigenbaum, la cual garantiza la aparición de caos para un valor finito del parámetro de bifurcación" (Salazar, 1997: 35).

Sin embargo, para la mejor comprensión de *la dinámica de los sistemas complejos*, se precisa revelar el proceso histórico de identificación de otros precursores y continuadores de la Teoría del Caos, o de pensadores que han contribuido a ella revelando otras propiedades y conceptos esenciales relacionados con el estudio de los sistemas complejos.

4. Las Teorías de Sistemas

Hoy algunos autores en la cultura occidental reconocen al científico ruso Alexander Bogdanov (1873-1928) como un indiscutible precursor de la Teoría de Sistemas, varios años antes que el biólogo austriaco Ludwig Von Bertalanffy (1901-1972).

"Normalmente se adjudica a Ludwig von Bertalanffy la primera formulación de un marco teórico comprensible para describir los principios de organización de los sistemas. Sin embargo, veinte o treinta años antes,.. Alexander Bogdanov,... desarrolló una teoría de sistemas de igual sofisticación

ción y alcance... Anticipó varias ideas importantes en distinto lenguaje, como principios claves de la cibernética (retroalimentación) de Norbert Wiener y Ross Ashby... Adelantándose al trabajo de Ilya Prigogine, Bogdanov demuestra cómo la crisis organizadora se manifiesta como un colapso del equilibrio sistémico existente,.. Al definir las categorías de crisis, Bogdanov llega incluso a anticipar el concepto de catástrofe desarrollado por el matemático francés René Thom” (Capra, 1996: 25; Gorelik, 1975).

Es muy extraño que *Bertalanffy* no hubiera conocido las ideas de *Bogdanov*, quien por ese tiempo era muy conocido en los círculos académicos de Austria y Alemania, al menos no lo menciona en sus textos. No obstante, el mérito de *Bertalanffy* no languidece, pues hizo aportes muy significativos que no estaban recogidos en la obra del genio ruso.

La *Teoría General de Sistemas de Bertalanffy*, aunque la comienza a elaborar desde los años 30, en verdad no logra el merecido reconocimiento en la academia científica hasta tres décadas después. Para el desarrollo de sus ideas, conserva y enriquece la *noción de sistema* heredada de los pensadores griegos, en especial de *Aristóteles*⁸ quien enfatizaba que *sistema* significa cosas *reunidas e interrelacionadas en un determinado contexto*.

La visión holística de *Aristóteles* le permitió comprender la realidad a través de un concepto clave, enfatizado muchos siglos después por *Hegel*, es decir la *mediación*: ese “tercero” u “otro”, entendido como el conjunto infinito de nexos que establecen los fenómenos en su entorno. Precisamente, el hecho de percatarse de la importancia capital del entorno o contexto, donde se enriquecen de manera infinita las cosas, fue lo que condujo a *Aristóteles* a formular la famosa *idea simiente del actual enfoque sistémico*: *el todo es más que la suma de sus partes*.

Esta idea fue aprovechada muy bien por *Bertalanffy* para demostrar que en la realidad priman los *sistemas abiertos*. Por tanto, todo organismo vivo constituye un *sistema inmerso en el entorno*, de manera que

8 De hecho, “... la ciencia occidental no tuvo en cuenta ni - menos aún - desarrolló el contenido profundo que esta frase encierra; así, los problemas que ella contiene, en lugar de ser resueltos, se negaron o se soslayaron” (Martínez, 1996: 24).

intercambia sustancia y energía con el medio circundante, que se expresa como importación y exportación, así como constitución y degradación de sus componentes.

Esta visión llevó a *Bertalanffy* a considerar que a diferencia de los sistemas cerrados, los cuales se sostienen en un equilibrio muy rígido, “... los sistemas abiertos se mantienen lejos del equilibrio en este estado «estable» caracterizado por un continuo flujo y cambio. *Bertalanffy* acuñó el término alemán *fliessgleichgewicht* («equilibrio fluyente») para describir este estado de equilibrio dinámico” (Capra, 1996: 39).

Además, según él, se deben estudiar:

“... Las relaciones internas entre las partes del sistema (tamaño relativo, orden, jerarquía, centralización, etc.) como las relaciones intersistemáticas (lo que privilegia la idea de «sistema abierto») con el medio ambiente y los sistemas externos homólogos, isomorfos o heteromorfos que le rodean” (Hidalgo, 1998: 2-3).

De hecho, para este genio, *en los sistemas abiertos la entropía puede decrecer* y la *Segunda ley de la Termodinámica* puede no funcionar. Por ello, consideraba que la ciencia clásica debería ser complementada por alguna nueva termodinámica de sistemas abiertos, pero para esa época (los años cuarenta) “... las técnicas matemáticas necesarias para semejante expansión de la termodinámica no estaban a disposición de *Bertalanffy*..., sin embargo, identificó correctamente las características del estado estable con las del proceso del metabolismo, lo que le llevó a postular la autorregulación como otra propiedad clave de los sistemas abiertos” (Capra, 1996: 39).

En verdad esa idea fue una genialidad, pues se necesitó esperar varias décadas por los avances de la ciencia en el área de la Termodinámica para que se pudiera complementar esta revolucionaria idea de *Bertalanffy*.

Al revelarse la naturaleza compleja de los sistemas, su jerarquización con arreglo a sus partes constitutivas y su multifuncionalidad, todo lo cual conduce a la comprensión de la necesidad de abordar el estudio de los sistemas desde diferentes disciplinas científicas, se ha ido conformando un enfoque o pensamiento sistémico, del cual ya se tiene cierta sistematización, algo que permite comprender su valor metodológico para el desarrollo de las investigaciones interdisciplinarias.

De hecho los seguidores de Bertalanffy han demostrado la importancia de la TGS para el desarrollo de los estudios de los sistemas dinámicos complejos, dentro de los cuales los estudios de las organizaciones sociales han tenido en las últimas décadas un impulso tremendo (Navarro, 2001: 45).

La influencia creciente de la obra *Bertalanffy* alcanza a casi todas las culturas y sus ideas y lenguaje ha estado subyacente *en todos los nuevos híbridos interdisciplinares*.⁹ De hecho, antes del año 1968 ya dos discípulos suyos, Mesarovic y Schwarz, cuando todavía la obra *Teoría general de los sistemas* no estaba terminada para publicar, realizaron una intensa labor de divulgación de sus ideas.

Otros seguidores de la TGS han sido *Anatol Rapoport*, que la aplica a estudios sociológicos *W. Boguslaw (Los nuevos utopistas, 1965)* y *W. Churchman (Filosofía y ciencia de los sistemas, 1968)*. Así también un especial enriquecedor de la obra de *Bertalanffy* ha sido *Erwin Laszlo* que ha tratado de aplicar la TGS a varias investigaciones interdisciplinarias, e incluso, relacionarlas con algunos estudios de la complejidad.

Un contemporáneo y gran continuador de la obra de Bertalanffy fue *Kenneth Ewart Boulding*, quien venía de la economía y se dedicaba al desarrollo de las ciencias de la administración y de las organizaciones sociales. En su artículo publicado en 1956, titulado *La Teoría General del Sistema: Un esqueleto de la ciencia*, *Boulding* destaca que los sistemas sociales como las organizaciones laborales y los gremios gerenciales, desarrollan sus actividades bajo condiciones de alta incertidumbre,

9 Los *continuadores* de la obra de *Bertalanffy* enfatizan el carácter integrador del enfoque sistémico, lo cual lo ha calificado para contribuir de manera decisiva en el desarrollo de un nuevo lenguaje interdisciplinario que se ha ido difundiendo a todas las áreas del saber. De hecho, los éxitos alcanzados por las nuevas hibridaciones interdisciplinarias así lo atestiguan. Por ejemplo, "... *la Cibernética, la Teoría de la Información, que introdujo el concepto de información como magnitud medible y desarrolla los principios de su transmisión, la Teoría de los Juegos, la Teoría de la Decisión, que analiza decisiones racionales dentro de organizaciones, las matemáticas relacionales, el análisis factorial*" (García Cuadrado, 1995: 7), entre otras, utilizan de una u otra forma conceptos propios del enfoque sistémico, pues toda la realidad, de la que se ocupan estos saberes, está anidada o embebida en sistemas.

por lo que la toma de decisiones por los directivos están condicionadas por una infinidad de factores.

“Estos sistemas combinan la información con el conocimiento de sentidos globales, estratégicos, tácticos y prácticos”, lo que los hacen altamente complejos, de manera que demandan esfuerzos especiales de integración interdisciplinaria y cooperación entre todos los actores sociales involucrados, pues la dinámica de los procesos empresariales de hoy son altamente competitivos y cambiantes (González, 2004: 53).

En su artículo, *Boulding* realiza una útil clasificación de los sistemas de los más simples a los más complejos y los ordena en 9 niveles, la cual ha tenido alguna difusión solo entre los investigadores de estos temas. El valor metodológico de este esfuerzo de sistematización realizado por *Boulding* no ha sido justipreciado siquiera entre los estudiosos de las teorías de sistemas y de las demás áreas híbridas afines. Por tanto, para la mayor parte del público el trabajo de este investigador es prácticamente desconocido. Algo similar ha sucedido con los trabajos de otros continuadores de las teorías de sistemas.

Paradójicamente, el impacto de la obra de *Bertalanffy* no ha sido solo sobre sus seguidores, sino también ha ejercido influencia hasta en sus más fervientes críticos. Por ejemplo, el filósofo español *Gustavo Bueno*, con su *enfoque holístico-gnoseológico*, desarrollado en la obra “*Teoría del Cierre categorial*”, donde realiza un balance de varias interpretaciones sobre el Holismo y los enfoques sistémicos en la historia de las ciencias y la filosofía, declara su reconocimiento a la obra de *Bertalanffy*, no obstante al despliegue de toda una refriega a algunas de sus ideas fundamentales (Bueno, 1993: 126-185).

Los estudios interdisciplinarios que utilizan como base metodológica la TGS se están difundiendo por el mundo con gran celeridad y entre los más renombrados en nuestra área geográfica está el *Proyecto de Investigación de Integración de las Ciencias* de la UNAM, en México, liderado por el ex-Rector de dicho centro *Pablo González Casanova*¹⁰.

10 Los esfuerzos de integración del saber que realiza este proyecto se pueden constatar en su Revista *Metapolítica*, así como en uno de sus últimos libros: González Casanova, Pablo (2004) *Las nuevas ciencias y las humanidades. De la academia a la Política*. Anthropos Editorial, Barcelona, 241 p.

Precisamente, bajo la influencia de *Bertalanffy* y otros investigadores, a finales de los años 60, fue que aparecieron los aportes del Premio Nóbel de Química *Ilya Prigogine* (1917-2003) ruso nacionalizado belga, quien genialmente desarrolló los fundamentos teóricos y la confirmación práctica del comportamiento de las *estructuras dinámicas disipativas*. Sus trabajos permitieron explicar los mecanismos más íntimos del proceso de *advenimiento del orden a partir del caos* y de la *ruptura de simetría* en la dinámica de los sistemas complejos.

Prigogine enfatizó con sus estudios *otras propiedades del comportamiento complejo* de los fenómenos, entre ellos *el carácter irreversible del tiempo*¹¹ en contra de lo establecido en la mecánica clásica.

Pero su aporte más significativo, que está en la misma línea de *Bertalanffy*, se resume en los estudios sobre *los sistemas y estructuras disipativas* cuando, definiendo los *sistemas abiertos*, los clasifica en *tres regímenes*: en *equilibrio*, *cercano al equilibrio* y *lejos del equilibrio* termodinámico. Este último estado es predominante en la realidad, por lo que sugiere su caracterización detallada.

Cuando *el sistema está alejado del equilibrio*, este recibe aportes de energía y sustancia que lo mantiene en condiciones lejanas al equilibrio termodinámico. Aparecen espontáneamente nuevas estructuras y tipos de organización que se denominan '*estructuras disipativas*', porque se establece un nuevo orden molecular que corresponde a una fluctuación gigante, estabilizada por intercambios de energía con el mundo externo.

De hecho, las estructuras disipativas pueden tener un comportamiento coherente que implique la cooperación de un gran número de unidades dentro del sistema y permite con ello su reorganización.

Precisamente esta formulación de *una nueva termodinámica de sistemas abiertos* "... fue el gran logro de *Ilya Prigogine* quien usó unas nuevas matemáticas para reevaluar la segunda ley, repensando radical-

11 *Ilya Prigogine* e *Isabelle Stengers*, partiendo de la concepción del carácter irreversible del tiempo, proponen un acercamiento fructífero entre las ciencias naturales y las humanidades, concretamente en sus obras tituladas: *La nueva alianza* y *Entre el tiempo y la eternidad*. Luego, amplían esta reflexión en: *El fin de las certidumbres*.

mente los conceptos científicos tradicionales de orden y desorden, lo que permitió resolver sin ambigüedades la contradicción entre dos visiones de la evolución del siglo XIX” (Capra, 1996: 39).

Estas ideas epistemológicas, contenidas en los descubrimientos realizados por Prigogine en el estudio de los procesos químicos complejos, tienen un valor extraordinario para el estudio de la dinámica compleja de los fenómenos biológicos y sociales (Navarro, 2002: 19-25; Diegoli, 2003: 13-19).

“La traslación metafórica de los conceptos de Prigogine y sus colaboradores a otros ámbitos de la reflexión y, en particular al ámbito social, no son extraños a sus mismas postulaciones. En *La nueva alianza* vemos una y otra vez un desplazamiento de la reflexión de Prigogine y Stengers de un ámbito de reflexión meramente científico a otras formas de reflexión filosóficas, sociales y políticas” (Mier, 1998: 63-78).

Por ello, sin sobreestimar el alcance de su obra:

“... las investigaciones de Ilya Prigogine dieron la pauta de leyes generales que se verifican en estos procesos organizativos. La personalidad, el sistema inmunológico, una empresa, un partido revolucionario, la sociedad, son sistemas de este tipo. La evolución de las tendencias revolucionarias en el siglo XX puede ser investigada desde esta perspectiva” (Guilli, 2001: 1).

La confirmación empírica del comportamiento complejo de los fenómenos y una rica caracterización de sus conceptos fundamentales se puede revelar con claridad en la interpretación física del Experimento de H. Bénard: en este experimento se revelan conceptos como comportamiento simple y *comportamiento complejo*, *perturbación*, *ruptura de simetría*, *orden y coherencia del sistema*, gracias a la *emergencia* de propiedades de correlaciones globales entre partes distantes en el sistema (las celdas y sus movimientos de rotación) o de una *estructura disipativa*.

Se descubre también un *doble fenómeno del comportamiento complejo*, por un lado se puede *predecir* (determinismo causal) *el devenir de la estructura disipativa* (celda), pero, por el otro, *el tipo de giro* o rotación de ellas (a la izquierda o la derecha) es *impredicible* (no-determinista, azar). De manera que la perturbación inicial es la que define el tipo de sentido en la rotación. En consecuencia, la relación entre *el determinismo* (orden) y *el azar* (desorden) en estos fenómenos físico-químicos re-

vela un peculiar símil con los fenómenos biológicos expresados en *la relación mutación-selección natural* desde Charles Darwin.

Otros conceptos importantes en este experimento son sistema alejado del equilibrio, turbulencia, comportamiento caótico, reestructuración, todo lo cual genera variedad de posibilidades de selección y a la vez permite la emergencia de nuevas propiedades y correlaciones a nivel macroscópico (referencia al escalado), es decir, el devenir de nuevas estructuras y dinámicas disipativas a escala macro constituyen patrones de ordenamiento dentro del caos, por lo que se puede lograr un nivel de predicción mayor y se confirma con ello, en el plano experimental, la tesis de Aristóteles de que “*el todo es más que la simple suma de las partes*”.

Para comprender mejor el alcance gnoseológico del *experimento de las celdas de Bénard* se puede tomar como guía las reflexiones de Prigogine y Nicolis sobre un símil (o adecuación) realizado en el campo de las reacciones químicas. Los autores realizan una descripción detallada del *comportamiento complejo de las reacciones catalíticas de Belousov-Zhabotinski*. Para ello, utilizan varios conceptos claves tales como autocatálisis, autoreproducción, irreversibilidad, reproducibilidad, impredecibilidad, biestabilidad, histéresis, enfatizando que “... la autorreproducción que es una de las propiedades características de la vida, es esencialmente el resultado de un ciclo de autocatálisis” (Prigogine, 1994: 16).

Se puede extraer de estos experimentos una *conclusión epistemológica* muy valiosa: “Es sorprendente ver cómo los conceptos más profundos aparecen de forma completamente natural en la dinámica interna de un sistema físico-químico modesto y con un aspecto corriente” (Prigogine, 1994: 21).

En esencia, estos autores muestran como se combinan en estas reacciones orden y desorden, expresados en el fenómeno de reloj químico. Como en el experimento de Bénard las reacciones de tipo *Belousov-Zhabotinski*, en condiciones alejadas del equilibrio, producen *rupturas de simetrías*, establecen *correlaciones de gran alcance* y generan nuevas *propiedades emergentes*. Precisamente, la *emergencia* de nuevas propiedades, tanto de la estructura como de la dinámica del propio sistema, son las que lo *autoorganizan*, de manera que las nuevas *estructuras disipativas* a nivel global (patrones como *celdas, estructuras de diana, frentes espirales, formación de dentritas*), son la garantía para que el sistema lo-

gre la autoorganización y eleve su robustez adaptativa en el entorno y que, incluso, pueda modificarlo simultáneamente.

Las nociones aportadas por el *experimento* de *H. Bénard* y las reacciones catalíticas de *Belousov-Zhabotinski* permitieron enriquecer el enfoque sistémico de *Bertalanffy*, pues, como enfatizan *Prigogine* y *Nicolis*, en la dinámica de los sistemas complejos se produce, a nivel global, *el advenimiento de propiedades cualitativamente nuevas (emergentes)*, que son frutos no solo de las relaciones entre sus propias partes, sino también de las interrelaciones que establece el sistema con el entorno. De manera que las mediaciones tanto internas como externas, son las responsables de que *el todo sea mucho más que la simple suma de sus partes*.

Este aporte al enfoque sistémico, explicado con mucha nitidez por *Prigogine* y sus colegas, tiene un valor gnoseológico muy importante, pues ratifica en el plano científico concreto *el enfoque dialéctico* intrínseco, tanto en la tríada hegeliana de *cantidad, medida y calidad*, como de lo universal, lo particular y lo individual.

En consecuencia, se constata la *universalidad* tanto de las regularidades de los fenómenos complejos, expresadas en los conceptos que se utilizan en el experimento, como de la tesis central de los *Estudios de la Complejidad* que demuestra *la existencia de cierto orden en el comportamiento caótico de los sistemas complejos*.

A su vez, también confirma la *singularidad o carácter irrepetible* de cada sistema complejo. Estos dos principios básicos tienen significados gnoseológico y metodológico extraordinarios especialmente en el ámbito de la *auto-organización*, propiedad inherente a los seres vivos y a las sociedades humanas (Prigogine, 1994: 6-15; Casaubon, 2001: 9-10).

Las ideas de la auto-organización en los sistemas vivos se fueron vislumbrando desde el siglo XIX, pero no fue hasta la década del 60, que se establece el enfoque sistémico (iniciado por *Alexander Bogdanov*, *Ludwig Von Bertalanffy* e *Ilya Prigogine*), así como *la cibernética y las aplicaciones matemáticas en el estudio de las poblaciones*, que se pudo profundizar en las propiedades del comportamiento complejo en los sistemas vivos.

Desde esa prodigiosa década muchos han sido los precursores interdisciplinarios (desde la física, la química y las matemáticas se produce una integración directa e indirecta con las diferentes ramas de la biolo-

gía), que ha tenido el estudio de la complejidad de la vida y de los autómatas artificiales *Robert May, John Tyler Bonner; Frank Hoppensteadt, C.H. Waddington, Norbert Wiener, Ross Ashby, John von Neumann, Claude Shannon y Warren McCulloch*, entre otros.

5. De la nueva Topología a la Teoría de las Catástrofes

La presencia de comportamiento complejo en la naturaleza tiene expresiones de todo tipo (además son mucho más frecuentes y extendidas que lo que habitualmente se cree), entre ellas se destacan las relacionadas con los fenómenos físico-químicos de la *resistencia de materiales y su tensión superficial* (fenómenos topológicos), los cuales son de vital importancia para el desarrollo de las nuevas tecnologías en todos los ámbitos.

El estudio de las dinámicas y estructuras no-lineales de los fenómenos multidimensionales, así como las deformaciones topológicas de los más variados objetos y sus superficies, es de vital importancia para el desarrollo en farmacología, industria alimentaria, extracción del petróleo, diagnóstico y tratamiento de enfermedades, crisis psicológicas y hasta disturbios sociales (Prigogine, 1994: 26).

También en paralelo con *Lorenz*, en la década de los años 60, el matemático estadounidense *Stephen Smale*, desarrolló una nueva *Topología*, que revelaba propiedades caóticas, irregulares y no-lineales de los sistemas y estructuras dinámicas.

Los estudios topológicos se inician mucho antes que apareciera el término apropiado para designar los fenómenos que se relacionan con esa área de las matemáticas. La palabra *topología* fue usada por primera vez en 1930 por el matemático estadounidense de origen ruso Salomon Lefschetz (1884-1972). También son hacedores de la topología: Leonard Euler, Johann Benedict Listing, Henri Poincaré, Stephen Smale, René Thom, Hassler Whitney, Kenneth Appel y Wolfgang Haken, entre otros.

La topología es un área especial de la geometría dedicada a las superficies, también tiene relación con materiales maleables, con estiramientos, deformaciones estructurales de la sustancia. Se le llama también geometría de la de la goma o del espacio elástico, pues estudia aquellas propiedades de las figuras geométricas del espacio que mantienen

cierta estabilidad estructural, cuando se doblan, dan la vuelta, estiran o deforman (Batard; Estrada, 2006: 166).

Desde mediados del siglo pasado, otros científicos han enfatizado el valor práctico de las aplicaciones matemáticas en general y de la Topología y la Geometría en particular, se destacan entre ellos Christopher Longuet-Higgins, Robert May, John Tyler Bonner, Christopher Zeeman, Benoit Mandelbrot, entre otros.

Aunque en las humanidades las matemáticas (con enfoque y metodologías de la complejidad) todavía están en pañales, ya se tienen resultados prometedores en el área de la economía, la dirección organizacional, la administración, el análisis histórico-social, entre otras (Luhmann, Niklas, 1991; Ibáñez, J., 1994; Navarro, Pablo, 1991, 1994, 1996, 2002).

Precisamente el primer gran aporte de *Smale* fue haber resuelto uno de los problemas más complejos de la topología, la famosa *conjetura de Poincaré* sobre espacios de cinco o más dimensiones.

A su vez, un impacto muy especial fue ejercido por la famosa *Herradura de Smale*, con ello este genio logró devolver un área de las matemáticas al mundo real, pues esta comienza a ocuparse de los procesos dinámicos de transformación estructural, que aparecen por doquier en la realidad, desde una grieta en la pared, el rebote de una pelota en la misma pared, el humo del cigarrillo, hasta la espuma de la cerveza en una jarra, etc. (Gleick, 1988: 52-60; Woodcock, y Davis, 1994: 21-23).

De hecho, con sus trabajos *Smale* se convirtió en un precursor de la *Teoría de las Catástrofes*, la cual tuvo otros *antecedentes* en la obra de pensadores de la talla de *Carl Friedrich Gauss* (1777-1855), *Nicolái Ivanovich Lobachevski* (1793-1856), *János Bolyai* (1801-1860), *Bernhard Riemann* (1826-1866) *Henri Poincaré* (1852-1912), *Salomon Lefschetz* (1884-1972), *Gastón Darboux*, *Marston Morse*, así como los rusos *Andronov* y *Pontryagin* entre otros.

Sin embargo, el legítimo fundador de la *Teoría de las Catástrofes* es el matemático francés *René Thom* (1923-) quien también en la prodigiosa década del 60, hizo excepcionales aportes al estudio de los procesos *morfo-genéticos*, para lo cual elaboró *un método topológico cualitativo* de interpretación de su comportamiento no-lineal.

Al establecer los nexos entre los conceptos de *forma, estructura y sentido*, Thom elabora un modelo dirigido a la reconstrucción matemática de la realidad física y la constitución de una ontología regional de los fenómenos estructurales y morfológicos: la denominada *nueva topología de la estabilidad estructural*.

Según René Thom, "... nuestra captación de la forma y del orden geométrico es más profunda que nuestra captación cuantitativa del número y la magnitud" (Woodcock y Davis, 1994: 17). Este revolucionario topólogo sigue la tradición pitagórica *que asume* el valor esencial del reconocimiento de patrones cualitativos en el comportamiento irregular, abrupto, discontinuo o de cambios bruscos y radicales en la realidad, como premisa indispensable para su comprensión científica. Las *catástrofes tienen un orden y estabilidad dinámicos*, que pueden ser representados cualitativamente por la topología y sus herramientas metodológicas nuevas.

Desde esta perspectiva topológica *el reconocimiento de patrones* en los fenómenos cotidianos como la caída de una hoja, el humo del cigarrillo, la estructura y dinámica de las nubes, la transmisión genética, etc., es la clave para comprender las propiedades esenciales del comportamiento complejo de los fenómenos (recuérdese que ya se ha descrito esta tradición dialéctica en la interpretación de este concepto) Captar con "*el ojo de la mente*", como enseña Thom, el *patrón cualitativo* que revela la *estabilidad estructural* (como lo global emergente) de un fenómeno multidimensional y caótico, es cardinal para el estudio profundo de la realidad. En consecuencia, "*... la discontinuidad es tanto la norma como la excepción*" (Woodcock y Davis, 1994: 19).

La visión topológica de Thom es interdisciplinaria por antonomasia, pues vincula las matemáticas, la física, la química y la biología, entre otros saberes. Además, incorpora y retoma conceptos como patrón cualitativo, transversalidad, estabilidad estructural, similaridad, impredecibilidad, propiedades emergentes y recurrentes, metamorfosis, morfogénesis, homeostasis, homeorhesis, autoreproducción, auto-organización.

La importancia de la *Teoría de las Catástrofes* para la solución de problemas prácticos fue cuestionada en las décadas de los 80 y los 90, debido fundamentalmente al descrédito que alcanzó a manos de varios vulgarizadores, a lo cual contribuyó significativamente la entusiasta pero

apresurada labor de aplicaciones de un ferviente divulgador de la teoría de *Thom*, su amigo el matemático inglés *Christopher Zeeman*. Una de sus más sugestivas y polémicas ideas fue la referida a la posibilidad de que la nueva topología de la *Teoría de las Catástrofes* podía tender un efectivo puente "... sobre el abismo entre los hallazgos cuantitativos de la neurofisiología y las descripciones cualitativas de la psicología" (Woodcock y Davis, 1994: 34).

Sin embargo, aunque ésta y otras ideas de *Zeeman* eran demasiado aventuradas para su tiempo, no eran del todo descabelladas, pues luego *Thom* y sus continuadores pudieron desarrollar estudios en la biología que confirmaban, en principio, las previsiones de *Zeeman*. Por ejemplo: "*Mientras Waddington había visualizado un cambio cualitativo –la diferenciación inicial de un brazo o una pierna o la aparición de un nuevo rasgo heredado– como un arroyo que fluyera hacia un nuevo canal, Thom lo veía como la emergencia de una nueva singularidad que configuraba el curso posterior del proceso*" (Woodcock y Davis, 1994: 39).

En los sistemas biológicos existen *dos estados de estabilidad dinámica* en el funcionamiento de las células, los órganos y sus subsistemas, los cuales se denominan: *homeostasis* (el mismo estado dinámico) y *homeorhesis* (el mismo camino o torrente de cambios), los cuales son esenciales para la *morfogénesis* en los procesos de configuración de la *dota-ción genética* de los individuos y las especies. Uno de los pioneros en la aplicación exitosa de la *Teoría de las Catástrofes* a los fenómenos biológicos fue *C.H. Waddington*, quien acuñó el término *homeorhesis* para explicar el peculiar modo en que se manifiesta *el principio de la estabilidad estructural* (Woodcock y Davis, 1994: 25-26).

En esencia, las ideas rectoras, principios y conceptos básicos del comportamiento complejo de los fenómenos biológicos, caracterizados por *la nueva topología de la estabilidad estructural*, se fueron revelando poco a poco en los más diversos procesos de la vida.

Otros fundadores y continuadores se pueden constatar en la vasta literatura sobre estos temas. Por ejemplo en la Biología de los años 50 se reconoce a *Paul Weiss* como *un precursor de los estudios de la complejidad de los seres vivos*, pues realizando un estudio de las estructuras y funciones de las *mitocondrias* pudo constatar *la emergencia de singularidades propias de un sistema dinámico complejo*.

Incluso mucho antes, ya en 1917, *D'Arcy Thompson* había demostrado que la forma o el esqueleto de un pez en una cuadrícula podía ser transformada hasta convertirla en la forma o esqueleto de un predecesor en la evolución, de manera que la transformación de tales imágenes visuales anticipaban la aparición de una nueva topología cualitativa.

Otro precursor de la teoría topológica cualitativa de la estabilidad estructural fue el físico alemán Bernhard Bavink, quien en 1941 sugirió a los biólogos priorizar el estudio cualitativo de los patrones y formas en los sistemas vivos, pues recomendaba aplicar una nueva matemáticas que combina el cálculo de variaciones con la teoría de grupos (Woodcock y Davis, 1994: 34).

En resumen, la *topología cualitativa* de nuevo tipo, iniciada por *Smale*, fue enriquecida sustancialmente por la *Teoría de las Catástrofes* de *Thom*.

Ellas han aportado nuevas ideas, métodos y técnicas de investigación a la emergente *Epistemología transdisciplinaria de la Complejidad* en permanente construcción, no solo porque está íntimamente ligada a los fundamentos de la *Teoría del Caos* de *Lorenz*, sino porque también se articula y complementa con las contribuciones de las otras nuevas teorías científicas de la segunda mitad del siglo XX tales como: la *Teoría General de Sistemas* de *Bertalanffy*, los estudios de *Prigogine* sobre las *estructuras dinámicas disipativas* y, muy especialmente La Geometría fractal de *Benoit Mandelbrot*.

6. La Geometría fractal de Benoit Mandelbrot

Desde la década prodigiosa de los años 60 también “Mandelbrot empezó investigando fenómenos no explicados del mundo natural, como las ráfagas aparentemente casuales de interferencias en las emisiones de radio, las crecidas del Nilo, y las crisis de la Bolsa de valores. Se dio cuenta de que las matemáticas tradicionales eran incapaces de expresar adecuadamente este tipo de fenómenos” (Woods y Grant, 2005: 18).

En la segunda mitad del siglo XX, la *Geometría fractal* se convirtió en una nueva rama de las matemáticas, pues comenzó a considerar la *simetría* de los fenómenos desde una nueva perspectiva, es decir, la *simetría de invarianza de escala*. Esta explica la razón de que algunos objetos

se parezcan a sí mismos independientemente de la variación de la escala de observación. Por ejemplo, una ramita pequeña arrancada de un brócoli, seguirá siendo como un pequeño brócoli; una rama de pino de navidad, se verá como si fuera un pequeño pino recién crecido; la imagen de un arroyuelo y sus bifurcaciones, será una copia fiel de una foto de un río caudaloso con sus afluentes, etc.

Esta nueva *Geometría* tiene como emblema el famoso *Conjunto de Mandelbrot*: extraordinaria estructura generada a partir de una iteración simple de números complejos que impactó y maravilló al mundo de las artes plásticas. Fue precisamente en la plástica donde mayor aceptación tuvo la geometría fractal en sus inicios, debido a la belleza de las creaciones que salían de la naciente tecnología de las computadoras personales en la década del 80 del siglo pasado. En EU y Europa se llegaron a exponer en galerías de arte, obras obtenidas por computadoras, salidas de simples algoritmos de iteración.

La *Geometría Fractal* contiene a la de Euclides como caso particular. Las líneas rectas, lo regular, las figuras geométricas que tradicionalmente son enseñadas en la primaria, no son más que modelos de una realidad mucho más rica y diversa: la realidad de las formas irregulares, de los objetos naturales, de las estructuras vivientes en general. La nueva geometría permitió revelar las propiedades más íntimas de la naturaleza, subrayando la necesidad de representar a los fenómenos tales como ellos son, en toda su riqueza como elementos multiformes, fraccionados y difusos (Mandelbrot; Benoit, 1997). Por estas razones es que se dice que la Geometría Fractal es la geometría de la naturaleza.

Bajo el imperio de las costumbres y las tradiciones, especialmente las científicas, casi siempre "... nos hemos limitado mentalmente a considerar situaciones que son realmente ideales, como las figuras geométricas. En la naturaleza estas figuras son la excepción, mientras que la mayoría de las figuras que hay a nuestro alrededor son fractales. Aunque parezca increíble, ¡este hecho tan contundente no había sido considerado en serio durante muchos siglos por la humanidad!" (Alonso; De la Fuente, 1996: 1).

En varios contextos *Mandelbrot* encontró *patrones*. Por ejemplo dentro de casos particulares de la economía identificó tal propiedad en el problema de las rentas a diferentes escalas y del precio del algodón en el mercado. Mientras que en la fisiología denotó las ramificaciones de estructuras internas del cuerpo humano y los procesos que allí se realizan.

Así también en la transmisión de datos por cables metálicos determinó la existencia de errores de transmisión aparentemente aleatorios. A su vez, en las estructuras naturales también detectó patrones, por ejemplo en las nubes, las montañas, los ríos, etc.

A la Geometría fractal se le reconoce, según se dijo, como la Geometría de la naturaleza y, en especial, tiene un papel fundamental para la comprensión geométrica del caos determinista, algo que le ha dado el crédito de ser la primera disciplina de las matemáticas que posee una definición de dimensión con significado físico. Anteriormente las definiciones matemáticas de dimensión eran funcionales solo para sí, sin embargo, la dimensión fractal es un número, por lo general fraccionario, que ayuda a la cuantificación espacial, la cual expresa cuánto se llena el espacio que se ocupa.

De la Geometría fractal han salido conceptos muy importantes que han sido transferidos a otras ramas del saber, algunas tan distantes como las ciencias sociales. Algunos de estos *conceptos* son: *autosimilitud*, *autoafinidad*, *fractalidad*, *dimensión fractal*, *lagunaridad* además de haber propiciado la introducción del *escalado*, como un proceso clave en la investigación, directamente derivado como consecuencia de la aplicación de la *simetría de invarianza de escala* al proceso consciente de observación de los sistemas complejos.

La geometría fractal tiene un especial significado para la comprensión holística de la realidad, pues permite revelar la naturaleza compleja de la relación dialéctica entre el todo y las partes, a través de la identificación de las diferencias entre los diferentes *tipos de totalidades* las cuales han sido clasificadas con gran rigor y demostradas en los diferentes ámbitos científicos.

La *Teoría de los Fractales* ha sido mejorada por varios continuadores, especialmente, en el año 1987 por el matemático inglés *Michael F. Barnsley*, quien descubrió la *transformación fractal*, capaz de detectar fractales en fotografías digitalizadas. Este descubrimiento permitió luego las aplicaciones fractales de imágenes, utilizada en multimedia por computadoras.

Hoy una de las “*nuevas creaciones*”, por cierto muy polémica pero interesante, que se fundamenta en las ideas y conceptos sobre el caos, las catástrofes, los fractales, etc., es la holística *Teoría de la Ubicuidad* de

Marc Buchanan, quien considera que *las aplicaciones prácticas* de las nuevas ideas y enfoques, permiten revelar propiedades comunes en “... *fenómenos tan dispares como ataques al corazón, incendios forestales, explosiones volcánicas, avalanchas, terremotos, crisis bursátiles, el ascenso y colapso de poblaciones animales, guerras, revoluciones y hasta la aparición de nuevas escuelas de arte, y cambios de moda – todos están regidos por las mismas leyes (“power law” – ley de potencia) y que esto se puede expresar matemáticamente*” (Woods y Grant, 2005: 18).

Precisamente, todas estas teorías y otras aquí no descritas, tienen un valor *epistemológico extraordinario para el estudio de los más disímiles fenómenos complejos de la realidad*. Solo desde un emergente enfoque que enfatice la necesidad de tolerar, asimilar y comprender el caos, *revelando el orden en el desorden*, en lo irregular, en lo *no lineal*, en el *azar*, etc., es que se puede conocer y resolver problemas tan complejos como las *oscilaciones*, la *turbulencia*, la formación de *estructuras complejas* en todos los niveles del universo, el origen de la vida, sus *procesos auto-sostenidos* y de *auto-reproducción*, el funcionamiento del cerebro y de los demás órganos y subsistemas de todos los seres vivos, la evolución de las enfermedades y las epidemias, el *equilibrio dinámico* del eco-sistema terrestre, así como los sistemas sociales y sus complejos procesos organizativos y de *autoorganización*, entre otros.

Sin embargo, se precisa realizar una oportuna salvedad. No obstante a que ya se reconoce que la *Teoría del Caos*, conjuntamente con la *Teoría General de Sistemas*, la *Topología*, la *Teoría de las Catástrofes* y la *Geometría fractal* y otros *estudios interdisciplinarios*, constituyen las fuentes epistemológicas fundamentales sobre la Complejidad, esto no significa que ya se haya elaborado una Teoría o un Enfoque epistemológicamente maduro, íntegro y coherente.

Precisamente todavía hoy, como resultado de la gran profusión de teorías y enfoques que se integran para gestar una nueva *Epistemología (emergente, en formación)*, se produce un peculiar y controvertido fenómeno, pues todavía la comunidad de *complexólogos* no se ha puesto de acuerdo con la propia *denominación de este amplio campo de integración del saber*.

Por ello, sus iniciadores son “... precursores de un pensamiento que, todavía hoy, cercanos a la expresión “casi un siglo después”, no termina de

construirse, empeñado quizás en una deconstrucción permanente para ser coherente con sus principios fundamentales” (Andrade, 2002: 2).

Aquí se precisa una necesaria salvedad. Es muy importante que no caer en las falacias propias del paradigma positivista todavía imperante. “*El tránsito hacia un pensamiento complejo no implica meramente un cambio de paradigmas, sino que se trata de una transformación global de nuestra forma de experimentar el mundo, de co-construirlo en las interacciones, de producir y validar el conocimiento. La pretensión de “enchalecar” la complejidad en un paradigma o de pretender que se trata meramente de una nueva metodología, constituye un enfoque no sólo simplista sino peligroso de la complejidad*” (Najmánovich, 2001: 1).

De hecho, son muy cuestionables aun las propias denominaciones de este movimiento científico e intelectual, de manera que existen en la literatura una gran cantidad de propuestas de todo tipo:

Denominaciones en los estudios sobre la Complejidad.

- *Teoría del Caos* (Lorenz, 1963)
- *Filosofía de la inestabilidad* (Prigogine, 1977)
- *Ciencia no lineal* (Varios autores occidentales desde la década del 40)
- *Sistemas Complejos o Complejidad* (Gell-Mann, 1998)
- *Pensamiento complejo* (Morín, 1994)
- *Constructivismo radical* (Foerster, 1998)
- *Ciencias de la complejidad* (Maldonado, 1999)

Aquí los autores de este trabajo proponen llamarle *Estudios de la Complejidad*. Para ello se toman en consideración varios argumentos:

1. Los *Estudios de la Complejidad* constituyen un colosal movimiento científico de *integración del saber*, iniciados con la *Teoría del Caos* y enriquecidos con otras teorías y creaciones intelectuales, desarrollados desde la *década del sesenta* gracias, primero, al vínculo creciente entre física, química, biología y matemáticas, *así como a la posterior incorporación de otros estudios inter y transdisciplinarios desde saberes sociales y humanísticos*. Son, además, *efectivos logros teóricos y prácticos, productos de la creación de nuevos métodos y tecnologías de punta que permiten dar solución a problemas concretos* en diversas esfe-

ras de la actividad humana. Estos estudios alcanzan hoy un mayor reconocimiento social y creciente institucionalización.

2. Este movimiento no es y ni siquiera aspira a ser una *Teoría de teorías* o una *Ciencia unificada* sino ha sido desde sus inicios un espacio de trabajo cooperativo en equipo, que promueve la integración de saberes, a la vez que potencia las propias disciplinas.

3. Es decir, constituye más bien *un sistema de enfoques de naturaleza holística*, que recién comienza con la creación de una nueva comunidad lingüística y la consiguiente reconstrucción e hibridación epistemológica y metodológica que debe evolucionar de la *multi a la inter y de esta a la transdisciplina*.

4. La gran diversidad de ideas, teorías y enfoques dificulta con creces el *consenso terminológico y semántico necesario*. De manera que en esta etapa tan incipiente de su desarrollo se produce un rechazo abierto, por parte de la comunidad científica, al manejo de términos tan definitivos para englobarlos como *teoría o ciencia* y mucho menos en singular.

5. Para intentar un cierto acercamiento a ese *consenso necesario* se propone aquí un término tan genérico y flexible como *Estudios*, pues se parte de la idea de que todavía no se ha logrado la madurez epistemológica que exige la coherencia de una *ciencia normal* (usando el lenguaje de *Thomas Kuhn*).

6. También se tiene en cuenta experiencias exitosas en el uso de este término en otras áreas tan amplias de integración del saber, término este que ha facilitado el consenso, gracias a su rápida aceptación y legitimación sociales. Por ejemplo, los *Estudios de Ciencia, Tecnología y Sociedad* (CTS).

7. No obstante, a que *la Epistemología y las Metodologías de los Estudios de la Complejidad está todavía en construcción*, ya se tiene la suficiente masa crítica para iniciar la sistematización de algunos de sus presupuestos teóricos fundamentales, es decir, las *ideas, principios, conceptos y propiedades de los sistemas complejos*, así como de muchos de los nuevos métodos y herramientas que ya se aplican de manera efectiva en las más disímiles áreas de la actividad social.

8. Este *nuevo lenguaje de comunicación* entre disciplinas debe enriquecerse con la migración, reformulación, fusión e *hibridación de nue-*

vos conceptos, métodos, técnicas y procedimientos, pues todavía tiene una alta sobredosis de términos predominantemente físicos, biológicos y matemáticos, así como herramientas metodológicas mayormente insipientes.

9. Es un movimiento científico de integración de sólida inspiración dialéctica que ya logra legitimarse e institucionalizarse, gracias, entre otras razones, a la creciente aplicación de sus conquistas teóricas en la solución de los problemas complejos en diversas esferas de la actividad humana.

10. Considerando su dimensión cosmovisiva se acepta con frecuencia en la comunidad académica el uso de términos más humildes como *Enfoque, Pensamiento, Ideas* o *Nociones* de la Complejidad, los cuales ya tienen amplia aceptación, especialmente en nuestro contexto latinoamericano. “*De un modo u otro, quienes empleamos estos términos para referirnos a la complejidad pensamos en la dimensión filosóficocognoscitiva y transdisciplinar de las ideas que se formulan*” (Delgado, 2002: 24; Maldonado, 1999).

11. En la literatura sobre el tema ya existe una suficiente masa crítica de textos generales que intentan resumir e integrar la mayoría de las teorías y enfoques sobre la Complejidad, lo cual permite realizar un esfuerzo de sistematización como el propuesto en este trabajo. Por ejemplo en esta dirección ya existen trabajos muy representativos de autores como: Gleick, James, 1988; Prigogine, Ilya.; Nicolis, G, 1994; Capra, F., 1996; Alonso, Antonio, De la Fuente, Juan Ramón, et. al., 1996; Martínez Miguélez, Miguel, 1996, 1997, 1998b, 2002; Morín, Edgar, 1995, 1996, 1997, 2004; Maldonado, Carlos Eduardo, 1999; Navarro, Pablo, 2002; Delgado Díaz, Carlos, 2002, 2004, 2006; Espina Prieto, Mayra, 2003, 2007; González Casanova, Pablo, 2004; Woods, Alan y Grant, Ted, 2005; Sotolongo Codina, Pedro Luís, 2003, 2004, 2007b y 2007d; Martínez Álvarez, Fidel; et al., 2007a.

12. Entre las fuentes referidas destacan los autores de nuestra región, quienes enfatizamos más la necesidad de hacer una reinterpretación endógena del profuso movimiento que se ocupa de la Complejidad, el cual está todavía atestado de *prejuicios occidental-centrista*, que subestiman con frecuencia las tradiciones ex-socialistas, asiática y latinoamericana en estos estudios. De manera que los *Estudios de la Compleji-*

dad deben tener su sello distintivo según el contexto histórico cultural propio de nuestros países de la denominada periferia.

7. Conclusiones

En este trabajo se logra cierta sistematización de *algunos antecedentes y fundamentos históricos y epistemológicos* de los *Estudios de la Complejidad*. Para ello, se partió de las ideas seminales contenidas en la obra de *Charles Darwin, Ludwig Boltzmann y Henri Poincaré*, quienes desde diferentes disciplinas y contextos históricos, sentaron las bases teóricas para luego se comprendiera mejor la esencia del comportamiento no lineal y caótico de muchos fenómenos de la realidad. Precisamente, en esa época de cambio revolucionario en la ciencia que fue el paso del siglo XIX al XX, estos genios en oposición al positivismo imperante sembraron la semilla para la confirmación científica de la necesaria *concepción dialéctica de las complejidades de la realidad*.

Además, en este trabajo se utilizaron esos antecedentes para revelar cómo se produjo el advenimiento en la década del 60 de la *Teoría del Caos de Edward Lorenz*, en la cual se concretaron las ideas seminales de sus predecesores, conformando un sistema teórico fundamentado en varios principios y conceptos que vinieron a confirmar el comportamiento no-lineal de los fenómenos complejos.

La revolucionaria y fundacional teoría de Lorenz allanó el camino para un conjunto de teorías y enfoques que fueron enriqueciendo la visión del hombre sobre la naturaleza no-lineal y compleja de la realidad, desmitificando así el ideal de la racionalidad científica clásica que impedía ver un gran número de propiedades de los sistemas complejos, las cuales ya también venían o serían reveladas en otras conquistas científicas, tales como: la Teoría General de Sistemas de Ludwig *Von Bertalanffy*, los estudios de *Ilyá Prigogine* sobre *las estructuras disipativas*, la *Topología de Stephen Smale*, la *Teoría de las Catástrofes de René Thom* y la *Geometría Fractal de Benoit Mandelbrot*, entre otros.

A su vez, *se muestra el vínculo entre estas nuevas creaciones, así como el valor de algunas de sus ideas y conceptos fundamentales* para la comprensión y solución de los más disímiles problemas en las diferentes esferas de la actividad humana. Así pues, se enfatizó cómo los *Estudios de la Complejidad* permiten penetrar mejor en la esencia de todos esos fenó-

menos tan ordinarios pero incomprendidos históricamente. Se sabe que hasta hace poco tiempo no existían herramientas cognitivas para comprender fenómenos tan cotidianos como *la espuma en una jarra de cerveza, la caída de una hoja de un árbol, una columna de humo, las grietas en una pared, el advenimiento de un infarto, el surgimiento de las malformaciones congénitas*, entre otros muchos fenómenos no lineales y caóticos de la realidad, que predominan como sistemas alejados del equilibrio.

De hecho hoy, gracias a la cooperación que promueve el trabajo transdisciplinario inspirado en el *Enfoque de la Complejidad*, se están creando las herramientas cualitativas para comprender estos fenómenos e, incluso, ya hace algún tiempo se están diseñando autómatas de todo tipo que funcionan bajo los principios e ideas de la complejidad. Solo basta mirar a nuestro alrededor repleto de equipos informáticos, domésticos y médicos de tecnología de punta, que tienen incorporado programas de planificación, ejecución y control, basados en este emergente enfoque.

En el trabajo se logra relacionar una gran cantidad de conceptos aportados por los pensadores que fueron caracterizados. Sistematización esta que constituye una modesta contribución de los autores a la *Epistemología de la Complejidad* en incipiente construcción. Para su organización didáctica, avalada por algo más de un lustro de experiencia docente de post y pregrado, se habilitaron anexos que enriquecen el estudio de sus contenidos.

Un especial significado tienen al final del texto los argumentos expuestos, desde nuestra perspectiva periférica, de las posibles denominaciones de este amplio y transdisciplinario campo de trabajo científico que preferimos nombrar *Estudios de la Complejidad*.

En resumen, con este trabajo solo se trata de iniciar el azaroso pero fecundo camino de la sistematización histórica de los antecedentes, iniciadores y fundamentos teóricos de la emergente *Epistemología de la Complejidad*, que, aunque todavía está en incipiente construcción, exige de trabajos en esta dirección. Precisamente continuar con esta insoslayable tarea es la urgente demanda que nos impone la difícil tarea de enseñar y divulgar estos avanzados y útiles *Estudios de la Complejidad*.

Referencias

- Andrade, Raiza; et al. (2002). El paradigma complejo: un cadáver exquisito. Cinta de Moebio. No. 14, Universidad de Chile. En <http://www.moebio.uchile.cl/14/frames07.htm>, 60 p.
- Alonso, Antonio; De la Fuente, Juan Ramón; et al. (1996). **Caos y Fractales**. Fondo de Cultura Económica, México. 69 p.
- Batard Martínez, Lorgio; Estrada Hernández, Yanelis (2006). **Historia de las Matemáticas**. Universidad "Martha Abreu" de las Villas, 246 p.
- Bertalanffy, L.V. (1976). Teoría General de Sistemas. Fondo de Cultura Económica: México, 306 p.
- _____ (1987). Historia y situación de la Teoría General de los Sistemas. En: *Tendencias en la Teoría General de los Sistemas*. Selección y Prólogo de George J. Klir. Madrid. Alianza Universidad. 1987, p. 29.
- Binmore, Ken (1994). **Teoría de Juegos**. McGraw Hill/Interamericana de España, Madrid, 623 p.
- Capra, Fritjof (1985). **El punto crucial**. Editorial Integral, Barcelona.
- _____ (1996). **La trama de la Vida**. Editorial Anagrama, S.A. Barcelona.
- Casaubon, José Ignacio (2001). **Caos**. Editorial E-Books, Buenos Aires. Copyright <http://www.copyright.limited.to/>
- Delgado Díaz, Carlos (2002). **La filosofía del marxismo ante la revolución del saber contemporáneo**. Ponencia presentada en la Cátedra de Complejidad del Instituto de Filosofía de Cuba, La Habana, 30 p.
- _____ (2004). **La importancia política de las cosas pequeñas**. Ponencia presentada en el Panel de Clausura de Complejidad 2004. Palacio de las Convenciones de la Habana, 17 p.
- _____ (2004). **Hacia un nuevo Saber. La Bioética en la revolución contemporánea del Saber**. Centro Nacional de Investigaciones científicas. Universidad de la Habana, 236 p.
- _____ Sotolongo Codina, Pedro Luis (2006). La Revolución contemporánea del Saber y la Complejidad social. Hacia unas Ciencias Sociales de nuevo tipo. CLACSO Libros, Buenos Aires.
- Diegoli, Samantha (2003). **El comportamiento de los grupos pequeños de trabajo bajo la perspectiva de la complejidad: Modelos descriptivos y estudio de casos**. Universidad de Barcelona. Tesis de Doctorado.
- Esnal, Marcos (1998). Edgar Morín: acerca de un nuevo paradigma. **Diosa Episteme** (Rosario) Año VI, No. 5, p. 116-117.
- Espina Prieto, Mayra (2003). Complejidad y pensamiento social. *Complexus*. Revista de Complejidad, Ciencia y Estética. 38 p.

- _____ (2007). Complejidad, transdisciplina y metodología de la investigación social. *Revista Utopía y Praxis Latinoamericana*. Universidad del Zulia (Maracaibo) Año 12, No. 38, p. 29-44.
- García Cuadrado, Amparo (1995). **Notas sobre la Teoría General de Sistemas**. *Revista General de Información y Documentación*, Vol. 5. No. 1 Servicios de Publicaciones UCM, Madrid.
- Gleick, James (1988). **Caos: la creación de una nueva ciencia**. Editorial Seix Barral, Barcelona, 358 p.
- González Casanova, Pablo (2004). **Las nuevas ciencias y las humanidades. De la academia a la Política**. Anthropos Editorial, Barcelona, 241 p.
- Goodwin, Brian (1998). **Las manchas del leopardo. La evolución de la complejidad**. Tusquets Editores, Barcelona.
- Gorelik, George (1975). "Principal Ideas of Bogdanov's "Tektology": The Universal Science of Organization, *General Systems*, vol. XX, 1975, 3-13.
- Hall, Nina (1994). **Exploring Chaos. A Guide to the New Science of Disorder**, p. 122-135.
- Heims, Steve J. (1980). John Von Neumann and Norbert Wiener, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Hidalgo Tuñón, Alberto et al. (1998). **Ciencia, Tecnología y Sociedad**. Proyecto Symploké, Oviedo.
- Ibáñez, J. (1994). **El regreso del sujeto. La investigación social de segundo orden**, Madrid, Siglo XXI.
- León Del Río, Yohanka (2007). El ejercicio de la duda de una provocación de la propuesta teórica de Niklas Luhmann. *Revista Utopía y Praxis Latinoamericana*. Universidad del Zulia (Maracaibo) Año 12, No. 38, p. 59-70.
- Lewin, R. (1995). **Complejidad**. Colección Metatemas No. 41, Tusquets Editores, Barcelona.
- Li, Tien-Yien; Yorke, J.M. (1975). Period three implies chaos. *Am Math Monthly*, 82: 9, p. 85-92.
- Lorenz, Edward (1963). Deterministic nonperiodic Flow. **Journal of Atmospheric Science**. Vol. 20, p. 130.
- Luhmann, Niklas (1991). **Sistemas Sociales. Lineamientos para una Teoría General**, México, Alianza Editorial.
- Maldonado, Carlos, Eduardo (1999). **Visiones sobre la complejidad**. Editorial El Bosque, Santafé de Bogotá, 128 p.
- Mandelbrot, Benoit (1992). **Fractals A Geometry of Nature**. En Hall, Nina (ed.) *Exploring Chaos. A Guide to the New Science of Disorder*, p. 122-135.
- _____ (1993). **Los objetos fractales**, Tusquets Editores, Barcelona.

- _____ (1997). **La geometría fractal de la naturaleza**, Tusquets Editores, Barcelona.
- Martínez Álvarez, Fidel (2000). **La visión social de la Tecnociencia en Cuba**. Tesis de Maestría. Universidad de la Habana, 95 p.
- _____ (2002). La Concepción Heredada de la Ciencia y la Tecnología. Página Web de la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura: <http://www.campus-oei.org/salacsi/fmartinez.htm>, 2002, 8 p.
- _____ (2004). El Movimiento CTS: sus orígenes y tradiciones fundamentales, Revista **Humanidades Médicas** (Camagüey) Vol. 4, No. 10, ISCM "Carlos J. Finlay", soporte electrónico, 18 p.
- _____ (2007a). Fundamentos histórico-filosóficos de la complejidad en la Antigüedad. Revista **Humanidades Médicas** (Camagüey) Vol. 7, No. 20, ISCM "Carlos J. Finlay", 17 p.
- _____ Ortiz Hernández, Eloy; González Mora, Ania (2007b). Hacia una epistemología de la Transdisciplinariedad. Revista **Humanidades Médicas** (Camagüey) Vol. 7, No. 20, ISCM "Carlos J. Finlay", 21 p.
- Martínez Miguélez, M. (1996). *Comportamiento Humano: Nuevos métodos de investigación*. 3ra. Edición. México, Trillas.
- _____ (2002). **Un nuevo enfoque paradigmático de la Medicina**. Universidad Simón Bolívar, Caracas. En soporte electrónico.
- Mier, Raimundo (1998). Ilya Prigogine y las fronteras de la certidumbre. **Revista Metapolítica**. Vol. 2, No. 8, octubre-diciembre, p. 63-78.
- Morín, Edgar (1984). *Ciencia con Conciencia*. Anthropos, Barcelona, 369 p.
- _____ (1995). **Mis demonios (Autobiografía)**. Editorial Kairós, Barcelona, 294 p.
- _____ (2004). Epistemología de la complejidad. **Gazeta de Antropología** (París) No. 20, p. 1-21.
- Najmánovich, Denise (2001). *La complejidad: De los paradigmas a las figuras del pensar*. Ponencia presentada en el Primer Seminario Bienal de Implicaciones Filosóficas de las Ciencias de la Complejidad. La Habana, Enero 2001. Publicado en la Revista Emergence (en prensa).
- _____ (2005). **Estética de lo complejo**. Universidad CAECE, Buenos Aires. En soporte digital, 21 p.
- _____ (2007). El desafío de la Complejidad: redes, cartografías dinámicas y mundos implicados. Revista **Utopía y Praxis Latinoamericana**. Universidad del Zulia (Maracaibo) Año 12, No. 38, p. 71-82.

- Navarro, Pablo (1997). El fenómeno de la complejidad social humana. Curso de Doctorado interdisciplinar en Sistemas Complejos. Facultad de Informática de la UPV, San Sebastián, Área de Sociología Universidad de Oviedo, 27 p.
- _____ (2002). Las Organizaciones como Sistemas abiertos alejados del equilibrio. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, soporte digital.
- Ortiz, Eloy (2005). Complejidad, nuevo paradigma en salud. *Revista Colombiana de Innovación y Ciencia* (Santa Fe de Bogotá) Vol. 12 Números 1 y 2 (marzo-abril).
- Prigogine, Ilya (1983). ¿Tan solo una ilusión? Una exploración del caos al orden. Tusquets Editores, Barcelona.
- _____ ; Stengers, Isabelle (1983). La nueva alianza, Alianza, Madrid.
- _____ ; Nicolis, Grégoire (1994). La estructura de lo complejo, Editorial Alianza Universidad. 390 p.
- _____ (1997). El fin de las certidumbres. Editorial Tauros, Madrid, 230 p.
- _____ (1999). Filosofía de la inestabilidad. Entrevista en: **Revista Voproxy Filosofii**, No. 6, p. 46-52.
- Saunders, P.T. (1995). An Introduction to catastrophe theory. Cambridge University Press, New York, 144 p.
- Sotolongo Codina, Pedro Luís (1998). Matematización, hermenéutica y posmodernismo. En: Modernidad y Posmodernidad. Serie Pensar en Cuba, Editorial Ciencias Sociales, La Habana.
- _____ (2000). Pos-Modernismo y contemporaneidad. *Revista Isla*. Universidad "Martha Abreu" de Las Villas, Santa Clara.
- _____ (2000). La Ciencia y la Vida Cotidiana: ¿Un matrimonio mal llevado? Ponencia presentada en el Evento de la Sociedad Cubana de Historia de la Ciencia y de la Tecnología. Capitolio. La Habana, febrero.
- _____ (2000). La incidencia en el saber social de una Epistemología "de la Complejidad" contextualizada. La Habana, febrero. En soporte digital, 11 p.
- _____ (2003). Los retos de los cambios cualitativos en el saber contemporáneo y el pensamiento social crítico. (El Modelo Cultural en construcción por la Bioética Global, el Enfoque "de la Complejidad", el Holismo ambientalista y la Epistemología hermenéutica. *Complexus*. Revista de Complejidad, Ciencia y Estética, 19 p.
- _____ (2004). Algunas cuestiones a tener en cuenta por la Historia y la Filosofía de la Ciencia en el contexto de la Revolución en el Saber contemporáneo. *Complexus*. Revista de Complejidad, Ciencia y Estética, 8 p.

- _____ ; Delgado Díaz, Carlos (2006). *La Revolución contemporánea del Saber y la Complejidad social. Hacia unas Ciencias Sociales de nuevo tipo*. CLACSO Libros, Buenos Aires.
- _____ (2007a). *Teoría Social y Vida Cotidiana. La Sociedad como sistema dinámico complejo*. Editorial Acuario. La Habana.
- _____ (2007b). Presentación. **Revista Utopía y Praxis Latinoamericana**. Universidad del Zulia (Maracaibo) Año 12, No. 38, p. 7-10.
- _____ (2007c). La articulación del pensamiento social contemporáneo con las Ciencias de la Complejidad y las nuevas Tecno-Ciencias: Entre Scila y Caribdis. **Revista Utopía y Praxis Latinoamericana**. Universidad del Zulia (Maracaibo) Año 12, No. 38, p. 11-28.
- _____ (2007d). Tres tratamientos de la figura epistemológica clásica de la relación sujeto-objeto. Inédito en soporte digital, 19 p.
- Thom, René (1972). *Stabilité Structurale et morphogénèse*. Paris, Ediscience.
- _____ (1997). *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de los modelos*. Editorial Gedisa, Barcelona.
- _____ (2000). *Parábolas y Catástrofes. Entrevista sobre Matemática, Ciencia y Filosofía*. Colección Metatemáticas No. 11, Tusquets Editores, Barcelona.
- Vallejo Gómez, Nelson (1996). El pensamiento complejo contra el pensamiento único: entrevista con Edgar Morín. **Sociología y Política** (México) No. 8, Nueva Época, p.71-89.
- Von Foerster, Heinz (1998). **Por una nueva epistemología, Metapolítica**, Vol. 2, no. 8, México.
- Von Wright, Georg Henrik (1994). Dos tradiciones. En: Issa, Jorge (comp.); et al. *Aproximación a la metodología de las ciencias sociales*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, p. 305-342.
- Woodcock, Alexander y Davis, Monte (1994). **Teoría de las Catástrofes**. Ediciones Cátedra, Madrid, 183 p.
- Woods, Alan y Grant, Ted (2005). **Razón y Revolución**. Editorial de Ciencias Sociales, Ciudad de la Habana, 473 p.