

# CAOS: UNA BREVE REVISIÓN CONCEPTUAL

*Fernando Fariñas Balseiro*

*Hospital Nuestra Señora del Prado. Talavera de la Reina (Toledo)*

## RESUMEN

*La Teoría del Caos (TC) y la Geometría Fractal (GF) revolucionaron el pensamiento científico en la segunda mitad del pasado siglo XX. Y aún continúan haciéndolo, como indica la incesante repercusión mediática que mantienen. En cuanto que su aplicación, además de universal (desde la Física a la Ingeniería, Medicina, Economía, o el Arte), aporta novedosas perspectivas a problemas tan diversos como el origen de la vida o la evolución de la bolsa. En el presente artículo revisaremos algunas cuestiones conceptuales que nacen de la propia naturaleza interdisciplinar de las mismas.*

## 1. INTERDISCIPLINARIEDAD

El conocimiento humano, expresado en términos de información, ha seguido durante siglos un continuo y no-lineal crecimiento. De tal manera (y centrándonos en Europa y en la cultura occidental), ya en el Renacimiento el saber enciclopédico claudica ante la ingente cantidad de datos acumulados por la civilización. Si en momentos anteriores de la historia existieron hombres que poseían un profundo conocimiento de la totalidad de la ciencia y del arte de su época, el progreso incesante obliga a una especialización del trabajo intelectual que a finales del siglo XIX culmina con la aparición de nuevos y activos investigadores, pero que lo son sólo en la restringida área del saber que cultivan.

La Ciencia, símbolo de nuestra civilización, progresa desde entonces mediante una obligada contribución parcelada que a priori parece ofrecer un rendimiento notablemente superior. No obstante, esta forma de desarrollo también presenta inconvenientes. El especialista es hijo de su marco cognitivo, y aquellos objetos susceptibles de ser estudiados por diversas disciplinas con frecuencia son percibidos e interpretados de diferentes formas por distintos especialistas. La interdisciplinariedad de algunos objetos de estudio provoca con frecuencia un fenómeno de confusión conceptual debido a esta razón primordial, que se traduce en un uso muchas veces aproximado pero no idéntico, incluso antagónico, de los mismos términos en distintos ámbitos científicos.

Las denominadas Ciencias de la Complejidad (Tabla 1) se establecen a partir de mediados del siglo XX como disciplinas basadas en grandes principios aplicables a un amplio rango de fenómenos (físicos, químicos, biológicos, sociales...) considerados hasta entonces de naturaleza dispar y estudiados por sus correspondientes ciencias particulares en casi total exclusividad. En este ensayo abordaremos algunas cuestiones referentes a las definiciones sometidas a continua revisión por esta causa, intentando un enfoque eminentemente práctico, que evite ahondar en disquisiciones de naturaleza epistemológica.

Tabla 1. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

- TERMODINÁMICA DE LOS PROCESOS IRREVERSIBLES
- TEORÍA DEL CAOS
- GEOMETRÍA FRACTAL
- TEORÍA DE LAS CATÁSTROFES
- LÓGICAS “NO-CLÁSICAS”:
  - Lógica(s) Paraconsistente(s)
  - Lógica de la Relevancia
  - Lógica Modal
  - Lógicas Polivalentes: Lógica Difusa (Borrosa)
  - Lógica Temporal
  - Lógica Cuántica

## 2. COMPLEJIDAD Y CAOS

La palabra *Caos* en el ámbito científico conceptualiza fenómenos diferentes a los que estamos acostumbrados a relacionar con ella en la vida cotidiana. La acepción popular es un sinónimo de confusión y desorden, aludiendo en esencia a un estado desorganizado o amorfo cuya principal característica es ser siempre no fructífero. Desde principios de los años 60 del pasado siglo (1,3) la comunidad científica dispone de una nueva teoría (para algunos tan sólo un campo abierto de investigación): la *Teoría del Caos* (TC), que intenta acercar nuestro conocimiento a un conjunto de fenómenos esencialmente distintos a los nombrados. Su objeto de estudio según la inmensa mayoría de autores (y como veremos, cuestionable) lo constituyen los *Sistemas Complejos* (SC), cuya característica más reseñable es lo que llamamos *emergencia* (Figura 1). Entendemos ésta como la capacidad de algunos sistemas de mostrar propiedades o procesos no reducibles a las propiedades o procesos de sus partes constituyentes.

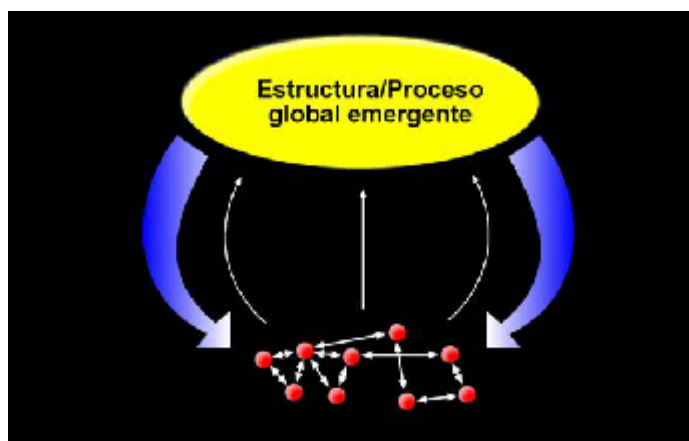


Figura 1. La emergencia es una propiedad de los Sistemas Complejos resultante de la interacción entre los distintos elementos que lo componen. El proceso o estructura emergente interactúa con los propios elementos de los que surge

Básicamente, emergencia significa novedad, creatividad, fuente de nuevas propiedades y estructuras a partir de sus elementos constituyentes, que no se explican por las propiedades individuales de estos sino que emanan de su interacción. Un estado fructífero por tanto, en oposición a la acepción vulgar de Caos. Un ejemplo clásico: las propiedades del agua no se explican a partir de las del hidrógeno y oxígeno (Figura 2). Nos encontramos frente a una de las características cardinales de la complejidad: el todo es más que la suma de las partes. Y esto invalida al método analítico mecanicista, al reduccionismo que impregna el pensamiento científico como aproximación a su entendimiento. De hecho, desde este punto de vista, adentrarse en el estudio de los SC supone un

cambio de paradigma metodológico, en el que también tienen validez descripción y conocimiento holístico frente a análisis.



*Figura 2. Las propiedades del agua no se explican a través de las propiedades del Hidrogeno y el Oxigeno*

En una definición muy aceptada, Boccaro (4) nos dice que son complejos aquellos sistemas que comparten las siguientes propiedades:

- a) poseen un número elevado de agentes interactuantes
- b) exhiben emergencia (o comportamiento colectivo, auto-organizado, no predecible a partir del conocimiento del comportamiento de cada agente)
- c) y esta emergencia no resulta de la existencia de un “controlador central”.

Y aquí comienza la divergencia de opiniones. En palabras de Ilya Prigogine (Figura 3) (5), Premio Nobel de Química 1977 por su contribución a la Termodinámica de los Procesos Irreversibles, una de las disciplinas de la Complejidad: “...es más realista, por lo menos no tan impreciso, hablar de comportamiento complejo en lugar de referirnos a sistemas complejos. El estudio de este tipo de comportamiento esperamos que nos permita descubrir algunas características de distintas clases de sistemas y nos conducirá a una comprensión adecuada de lo complejo”.

Prigogine, conocedor de que muchos sistemas de naturaleza química exhiben un comportamiento muy simple en determinadas condiciones, pero pueden ser llevados a situaciones (él las describió como alejadas del equilibrio termodinámico) en que su comportamiento es diametralmente opuesto: “La materia cerca del equilibrio se comporta de una forma repetitiva; por otro lado, alejada del equilibrio comienzan a aparecer una variedad de mecanismos correspondientes a la posibilidad de ocurrencia de varios tipos de estructuras disipativas. Por ejemplo, lejos del equilibrio presenciaremos la aparición de relojes químicos, reacciones químicas que se comportan en una coherente y rítmica forma. Pero también tal vez tengamos procesos de auto-organización dirigiendo estructuras no homogéneas a la formación de cristales fuera del equilibrio”.



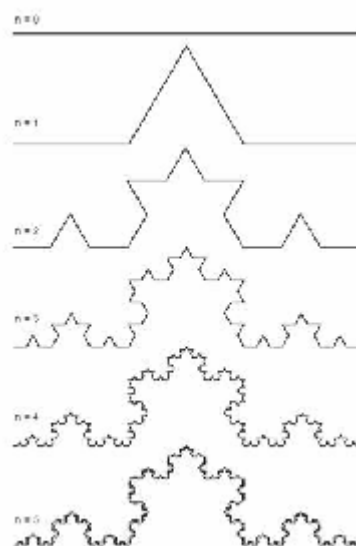
*Figura 3. Ilya Prigogine, premio Nobel 1977, “padre” de la Termodinámica de los Procesos Irreversibles*

Formalmente, y desde una óptica física, *la TC estudia cualitativamente el comportamiento dinámico aperiódico mostrado por sistemas deterministas no lineales* (1,2). Esto es: estudia sistemas que presentan variaciones en el tiempo (dinámicos), en los que ninguna de las variables que describen los cambios observados experimenta repeticiones regulares de sus valores (aperiódicos), cuya evolución futura es consecuencia de las condiciones en las que se encuentran en un instante inmediatamente anterior (deterministas), y en los que los efectos no son proporcionales a las causas (no lineales). Esta última característica es conocida como “*sensibilidad a las condiciones iniciales*” y “*efecto mariposa*” (Figura 4) (6). Un sistema no lineal que muestra una dinámica aperiódica es, en esencia, no predecible (por lo menos a largo plazo).



*Figura 4. El efecto mariposa ilustra metafóricamente la extrema sensibilidad de los sistemas caóticos a las condiciones iniciales, tal como lo utilizó Lorenz en su publicación de 1979<sup>[6]</sup>: “El aleteo de una mariposa en Brasil puede provocar un tornado en Texas”*

Ahora bien, y como hemos visto en la Tabla 1, las Ciencias de la Complejidad engloban actualmente varias disciplinas además de la TC. Quizás la más conocida por su difusión mediática sea la Geometría Fractal (GF). La GF se ha tildado de “geometría de la naturaleza” ya que muchas estructuras que encontramos en la naturaleza se ajustan a diseños que sin duda son fractales. De hecho, muchas han podido ser recreadas informáticamente a partir de las sencillas premisas que definen un objeto de este tipo. Básicamente, un fractal es un objeto geométrico compuesto, en el que reconocemos las siguientes propiedades: 1) Autosemejanza a cualquier escala, 2) Dimensión fractal, y 3) Formación por iteración (Figura 5) (7-9).

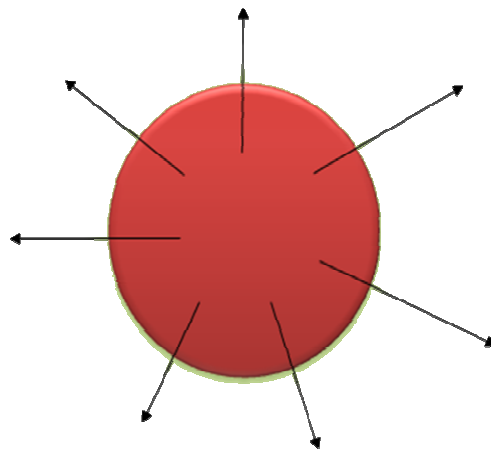


*Figura 5. Un ejemplo de construcción Fractal: Curva o copo de nieve de Von Koch, definida por este en 1915. Se observa la iteración en su formación, y la autosemejanza a distintos niveles*

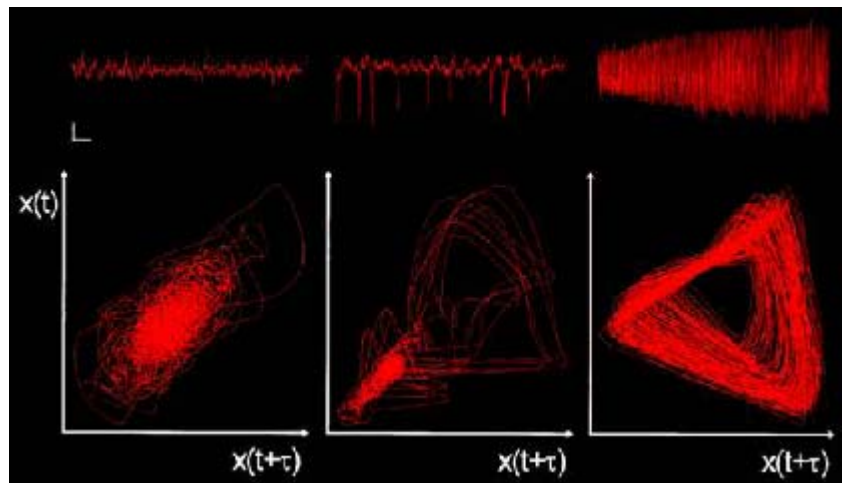
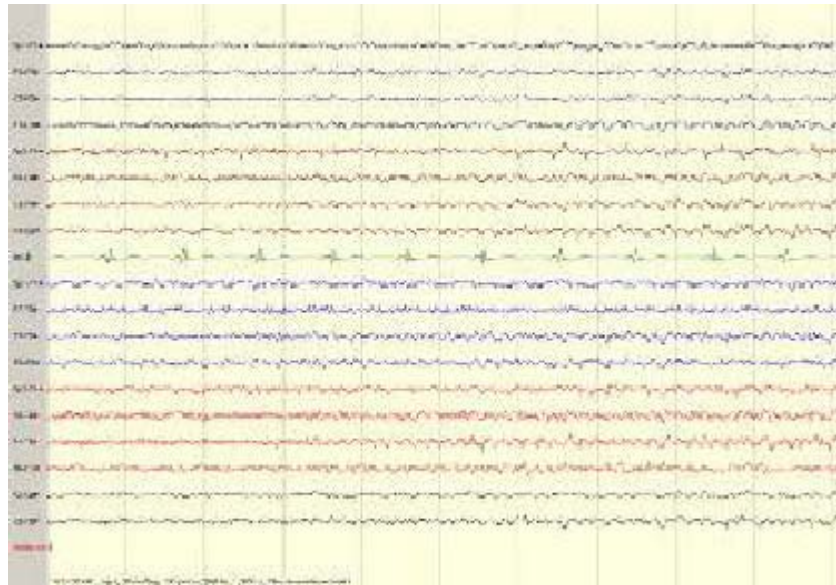
Este hecho nos da una pista más que nos permitirá acotar los dominios de la Complejidad y el Caos. Hasta ahora parece claro que Caos es una dinámica, que la Complejidad aún siendo asimilada por muchos como un sinónimo de Caos, es estudiada por disciplinas básicamente distintas a la TC. En base a la Tabla 1, y quizás de una forma excesivamente académica, diremos que estas Ciencias de la Complejidad estudian tres tipos diferentes de fenómenos desde ópticas apropiadas, y que podríamos denominar:

- Complejidad dinámica
- Complejidad estructural
- Complejidad algorítmica

En definitiva, debemos rechazar la asimilación Caos-Complejidad. Lo que en Ciencia denominamos Complejidad es una metáfora de nuestra realidad, con descriptores temporales, geométricos y procesales no simples. La TC estudia dinámicas impredecibles a largo plazo, que se traducen para el Físico en series temporales de datos. Y éstas, aún mostrando comportamientos ciertamente no desordenados, no exhiben una emergencia “fuerte”. La emergencia es una propiedad de la Complejidad, no de las dinámicas caóticas en particular que obtenemos cuando medimos alguna de las propiedades intrínsecas de los sistemas que muestran comportamiento complejo. Dicho de otra forma: un sistema complejo manifiesta en sus variables medibles un comportamiento dinámico caótico (Figura 6). Ejemplos: El cerebro (sistema complejo) muestra una actividad eléctrica que se registra en cuero cabelludo como Electroencefalograma (con dinámica ciertamente caótica) (Figura 7). Un ser humano (sistema complejo) ofrece un perfil de constantes vitales (presiones arteriales, temperaturas... seriadas en el tiempo) caótico.



*Figura 6. Medida sobre una propiedad de un Sistema Complejo.  
Generalmente tiene comportamiento caótico*



*Figura 7. El electroencefalograma (EEG) exhibe una dinámica caótica que puede revelarse en un espacio de fases mediante su AE, de baja dimensión en episodios de sincronización patológica (crisis epiléptica)*

### 3. CAOS Y ORDEN

Además, estos términos deben diferenciarse radicalmente de otro sutilmente relacionado: el *Orden*. Básicamente podemos decir que Complejidad es otra “escala”. Orden absoluto y completo desorden son simples desde esta nueva aproximación. La Complejidad surge a medio camino entre el orden y el desorden: en los sistemas medianamente ordenados sin reglas estrictas, pero tampoco en los que rige el azar. Surge entre el gas y el cristal, que poseen leyes demasiado probabilísticas o deterministas para ser capaces de presentar fenómenos emergentes. En la Figura 8 podemos observar una representación heurística de esta cuestión.

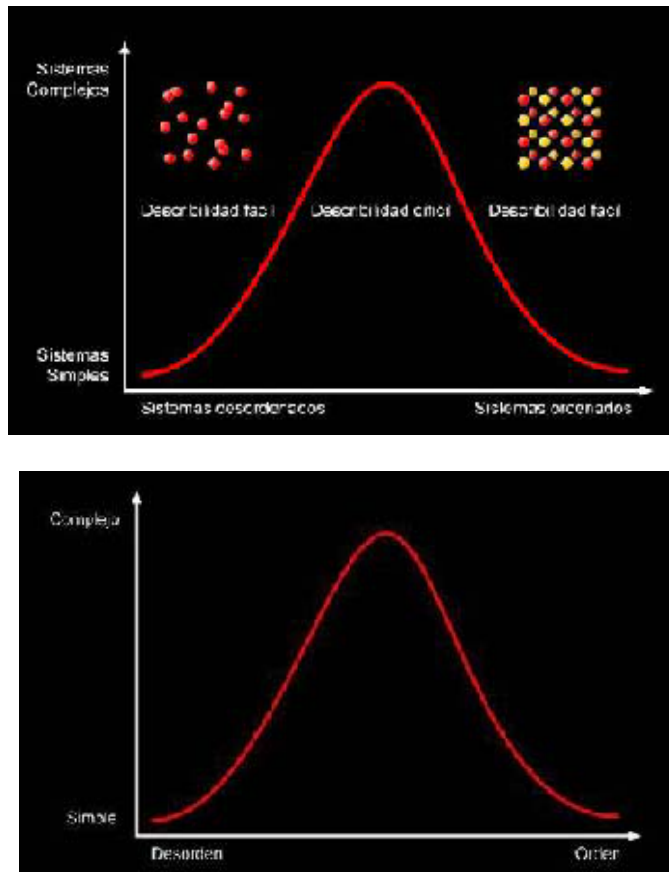


Figura 8. La Complejidad se origina en sistemas alejados tanto del orden como del desorden. Orden y desorden son simples, desde esta perspectiva. El orden obedece a leyes rígidas, y el desorden puede describirse probabilísticamente. La figura superior ilustra estos conceptos en función de la información necesaria para describir el sistema

Los SC aunque presenten una aparente desorganización ocultan un orden subyacente y una ruta común hacia el caos, como puso de manifiesto Mitchell Feigenbaum en 1978 (10). Este orden oculto se puede revelar mediante la representación de los estados del mismo en un espacio de Hilbert o *espacio de fases*. En él la dinámica caótica del sistema adopta una morfología genéricamente denominada *Atractor Extraño* (AE, representación de la evolución del sistema). El *Atractor de Lorenz* es una figura geométrica con morfología que recuerda curiosamente a una mariposa (Figura 9), y que para ser contenida necesita más de dos dimensiones y menos de tres (2.06). Por lo tanto es un fractal.

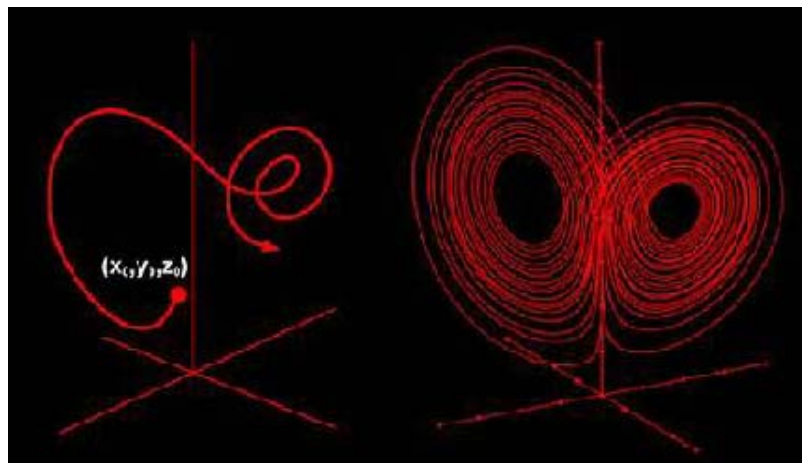
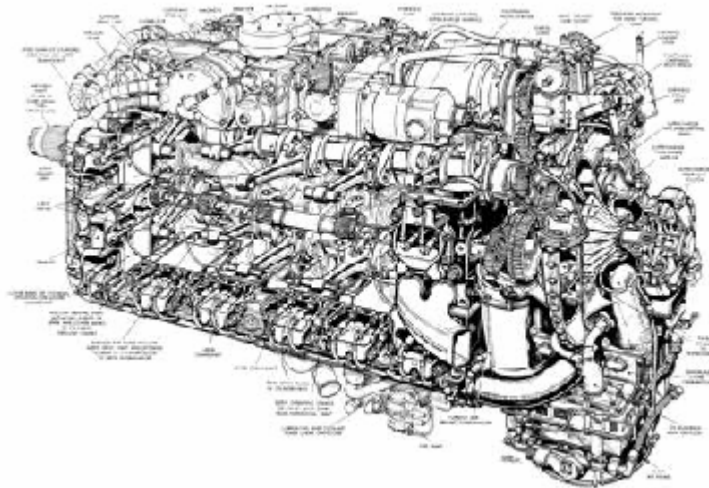


Figura 9. A partir de una condición inicial  $(x_0, y_0, z_0)$  el sistema de ecuaciones diferenciales integrado mediante computación informatizada, nos permite dibujar la trayectoria correspondiente en el espacio de fase 3D, obteniendo la figura conocida como *Atractor de Lorenz*

El término AE fue propuesto por David Ruelle y Floris Takens (11), que anticiparon su existencia. Lo intuyeron como una zona bien delimitada del espacio de fases donde las trayectorias del sistema nunca se cortan. Líneas de longitud infinita confinadas en un espacio finito, describiendo órbitas aperiódicas, con características fractales.

#### 4. COMPLEJO Y COMPLICADO

Por último, diferenciamos conceptualmente Complejo de Complicado (Figura 10). Un sistema complicado posee una describibilidad simple. Puede ser analizado, en el sentido mecanicista kantiano: descompuesto en sus partes constituyentes, por muchas que sean, y estudiadas éstas, es posible comprender la totalidad. Un ejemplo: Un motor de combustión interna moderno posee miles de piezas. El estudio de la función de cada una de ellas, aunque engorroso, nos permite entender el comportamiento del mismo. Y así se hace en las escuelas de mecánica, donde los alumnos estudian el motor pieza a pieza hasta que comprenden cómo funciona. Además un motor presenta un comportamiento lineal, cíclico (periódico) y previsible. No exhibe por tanto comportamiento complejo alguno.



*Figura 10. Lo complicado debe diferenciarse de lo complejo: Es susceptible de análisis.*

#### CONCLUSIÓN

La Física Teórica del siglo XXI se aproxima a la realidad, a campos donde hasta hace poco no había nada más que descripción, transgrediendo barreras “anatómicas” académicas. Las herramientas para el estudio de la complejidad son escasas, adaptadas a un reducido número de sistemas susceptibles de estudio. Y, sin lugar a dudas, contaminadas por el otro eje en relación: el que mide orden y desorden. No disponemos de las matemáticas ni de las magnitudes que describan exhaustivamente los fenómenos que estudiamos. Y puede ocurrir que ni siquiera las encontremos ya que, en general, dos SC no son comparables y por lo tanto no es posible “a priori” medir la complejidad del estado de un sistema. La Física del siglo XX nos acercó al tejido del Universo, al espacio-tiempo de la relatividad y al microcosmos de la mecánica cuántica (el tablero de juego), y es deseable que la actual nos lleve a comprender mejor cómo se organiza nuestra propia realidad compleja (las fichas). Uno de los primeros obstáculos que debemos evitar, siendo el campo de estudio básicamente interdisciplinar, es arrastrar ideas y conceptos propios de la Física, e imponerlas en áreas del conocimiento susceptibles de otras aproximaciones. Una dinámica es una dinámica, y como tal es una visión muy parcial del problema que nos incumbe. No obstante, la aportación de la Física al desarrollo de este grupo de áreas del saber es crucial, como demuestra el gran número de publicaciones



generadas en los últimos años. Es y debe ser el motor conceptual de muchas otras disciplinas que se acercan a esta nueva frontera de la Ciencia.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Lorenz, E.N.: Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences* 1963; 20: 130-41.
2. Lorenz, E.N.: *The Essence of Chaos*. University of Washington Press 1996.
3. Gleik, J.: *Chaos: Making a New Science*. Viking Penguin, New York 1987, p. 64.
4. Boccaro, N.: *Modelling Complex Systems*. Springer-Verlag 2004.
5. Prigogine, I.; Stegers, I.: *Order Out of Chaos; Man's New Dialogue with Nature*. Bantam Book, USA 1984, p. 12.
6. Lorenz, E.N.: Predictability: does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? Artículo presentado en la Reunión Anual de la *American Association for the Advancement of Science*. Washington 1979, 29 de Diciembre.
7. Mandelbrot, B.: *Los objetos fractales*. Tusquets editores, Barcelona 2006 (6ª ed.).
8. Mandelbrot, B.: How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science* 1967; 156(3775): 636-8.
9. Mandelbrot, B.: *The Fractal Geometry of Nature*. WH Freeman & Co, New York 1982.
10. Feigenbaum, M.J.: Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *J. Stat. Phy.* 1978; 19(1): 25-52.
11. Ruelle, D.; Takens, F.: On the nature of turbulence. *Communications of Mathematical Physics* 1971; 20: 167-192.