

## LAS TEORÍAS DEL CAOS Y LOS SISTEMAS COMPLEJOS: Proyecciones físicas, biológicas, sociales y económicas

*En las páginas siguientes se recoge el contenido de las intervenciones de los ponentes del Seminario-Debate multidisciplinar, organizado por esta revista, sobre **Las Teorías del caos y los sistemas complejos: Proyecciones físicas, biológicas, sociales y económicas**, celebrado el pasado 14 de Diciembre en la Universidad Autónoma de Madrid. Los textos que se recogen a continuación cuentan con una redacción formal ad hoc para la revista, de cara a hacerlos más asequibles al lector, ya que en algunos casos poseen esquemas y formalizaciones matemáticas, habiéndose incorporado, además, ciertas referencias bibliográficas, las cuales pueden resultar de utilidad para el lector.*

*Los citados ponentes fueron (por orden de intervención): **Florentino Borondo Rodríguez** (Catedrático de Química Física), **Miguel Ángel Ramos Ruiz** (Profesor Titular de Física de la Materia Condensada), **Roberto Marco Cuellar** (Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular), **Francisco José Vázquez Hernández** (Profesor Titular de Fundamentos del Análisis Económico), **Manuela Romano Mozo** (Profesora Titular de Filología Inglesa), **Manuela Romo Santos** (Profesora Titular de Psicología Básica), y **Agustín de la Herrán Gascón** (Profesor de Didáctica y Teoría de la Educación).*

### **Jesús Lizcano** (Moderador del Seminario):

Si les parece bien a todos, vamos a dar comienzo a este Seminario-debate multidisciplinar sobre *Las Teorías del Caos y los Sistemas Complejos: Proyecciones físicas, biológicas, sociales y económicas*. Como el título del Seminario indica, se van a tratar de abordar desde muy diversas perspectivas y disciplinas los aspectos relativos al Caos y a los Sistemas complejos, que integran unos de los aspectos, realidades o filosofías más proclives a ser abordados desde una perspectiva *interdisciplinar*, por una parte, y *multidisciplinar*, por otra; es decir, desde una perspectiva de *convergencia* de ideas, conceptos y métodos que pueden considerarse comunes a varias disciplinas, así como desde una proyección de *confluencia* de visiones o perspectivas en torno a dichas realidades desde diversas disciplinas o campos del conocimiento.

El caos y los sistemas caóticos no implican necesariamente *desorden* en el sentido literal y popular de la palabra; los sistemas no lineales son sistemas irregulares, altamente impredecibles, que se manifiestan en muchos ámbitos de la vida y la naturaleza, pero que no se puede decir que tengan comportamientos *sin ley*, dado que existen *reglas* que determinan su comportamiento, aunque éstas sean difíciles de conocer en muchas ocasiones. Se trata, eso sí, de sistemas muy sensibles a las condiciones iniciales, como ya tendremos ocasión de comentar y debatir a lo largo de este Seminario.

Dado que estos fenómenos y sistemas se pueden dar en muchos ámbitos de la naturaleza y de la sociedad, y por tanto, se pueden contemplar desde muy distintas disciplinas científicas, queda más que justificado que hayamos optado por organizar en torno a los mismos un Seminario-debate multidisciplinar como el que aquí reúne a un buen número de personas, muchas de las cuales han tenido a bien venir desde puntos muy distantes de la geografía española. Agradecemos a todos los asistentes y especialmente a los ponentes, su presencia en este Seminario.

El Seminario va a contar, como ya conocen por el Programa, con siete ponentes, que van a desarrollar sus intervenciones en dos partes o bloques: Una primera parte, relativa a aquellas ponencias procedentes de las *ciencias de la naturaleza* (Química, Física y Biología), y una segunda parte relativa a intervenciones o ponencias propias de las *ciencias sociales* (Economía, Filología, Psicología, y Educación). Todas ellas van a tener como nexo o denominador común su proyección sobre las Teorías del Caos y los Sistemas Complejos. Vamos a comenzar, por tanto este Seminario.



*Los participantes en el Seminario-debate multidisciplinar. De izquierda a derecha: Florentino Borondo, Manuela Romano, Jesús Lizcano, Francisco José Vázquez, Agustín de la Herrán, Manuela Romo, Miguel Ángel Ramos y Roberto Marco.*

El primer ponente que va intervenir en este Seminario es **D. Florentino Borondo Rodríguez**. *Florentino es Catedrático de Química Física en la Universidad Autónoma de Madrid. Cursó la Licenciatura de Ciencias Químicas por la Universidad Complutense, y se doctoró en la especialidad de Química Cuántica por la Universidad Autónoma de Madrid. Ha desarrollado estancias postdoctorales sobre Caos en Vibraciones Moleculares dentro de centros como la universidad norteamericana de Colorado. Sus líneas fundamentales de investigación en la actualidad se relacionan con el Caos en la Mecánica Cuántica. Florentino es, por otra parte, el ponente que ha coordinado desde un punto de vista técnico este Seminario multidisciplinar.*

## **CAOS: UN PARADIGMA MULTIDISCIPLINAR**

### **INTRODUCCIÓN.**

A finales del siglo pasado, Poincaré inició, con sus estudios sobre la estabilidad del sistema solar [1], los trabajos pioneros de lo que en este siglo se ha ido configurando como la teoría del caos.

Fue en la década de los sesenta en la que gracias al desarrollo de los ordenadores de alta velocidad y la aparición de importantes resultados matemáticos (como por ejemplo el teorema de Kolmogorov, Arnold y Moser para sistemas Hamiltonianos [2]) se pudo ahondar en estas ideas revolucionarias.

En las dos últimas décadas el interés por los fenómenos caóticos ha ido en aumento [3], extendiéndose a campos del conocimiento muy dispares y alejados de las matemáticas, erigiéndose en el cuerpo de doctrina que hoy conocemos como Dinámica No Lineal [4].

Una de las características que probablemente más ha contribuido a este desarrollo es el carácter multidisciplinar del caos. Hoy en día existen muchas revistas especializadas (p. ej. Chaos, International Journal of Bifurcation and Chaos, Physical Review E, Physica D) que tratan específicamente esta problemática, y en ellas se describen ejemplos de conducta caótica muy variados, entre los que se encuentran las reacciones químicas, circuitos eléctricos, mecánica celeste, ecología, economía, vibraciones mecánicas, láseres, y un largo etcétera. Por otra parte, los fenómenos caóticos presentan a menudo comportamientos y conductas universales que derivan de la ubicuidad de los términos no lineales [7] que los originan.

Incluso el caos ha empezado a formar parte de nuestra vida cotidiana, existiendo numerosas referencias recientes en el cine [5] y en la literatura [6].

A continuación pasaremos revista de una forma sucinta y sencilla a una serie de propiedades definitorias de lo que se entiende hoy en día por caos.

#### **CAOS DETERMINISTA. SENSIBILIDAD EXTREMA A LAS CONDICIONES INICIALES.**

En primer lugar hay que destacar que, a diferencia de lo que ocurre en el lenguaje coloquial en el que el término caos es sinónimo de desorden o falta de estructura, cuando se habla en ciencia de caos nos referimos a *caos determinista*. Es decir una conducta compleja e impredecible pero que se deriva de ecuaciones o algoritmos bien definidos matemáticamente; que incluso no necesitan ser muy complicados, como veremos más adelante.

Una de las definiciones operacionales quizás más sencilla y fácil de entender de caos es la de *extrema sensibilidad a las condiciones iniciales*. Es decir, existe caos cuando en un sistema dos sucesos que empiezan en condiciones iniciales muy próximas evolucionan de manera diferente de forma, que se separan exponencialmente en el espacio de las fases [8]. Así, se puede decir que se pierde la memoria de las condiciones iniciales de que se partía. Esto tiene una consecuencia muy importante y es que en el régimen caótico es imposible realizar predicciones a largo plazo, ya que nunca se van a poder conocer las condiciones iniciales del sistema con infinita precisión.

Una forma de referirse al fenómeno anterior, que se ha hecho muy popular, es el término *efecto mariposa* [3,5], que proviene del título de la conferencia pronunciada por Edward N. Lorenz en 1972 en la 139ª reunión de la Sociedad Americana para el Avance de la Ciencia: “¿Puede el aleteo de una mariposa en Brasil desencadenar un tornado en Texas?”, en el que se quería enfatizar, con una imagen chocante, la dependencia extrema a las condiciones iniciales [9].

Para entender el origen de esta separación exponencial en el régimen caótico, consideremos dos corchos que se dejan muy juntos en la corriente de un río. Mientras la corriente transcurra de forma suave en régimen laminar no caótico, las trayectorias seguidas por los dos corchos estarán muy próximas y estas a lo sumo se separarán de forma lineal. En cambio en las zonas del río en las que el flujo sea turbulento y las aguas formen remolinos los corchos se separarán rápidamente, con evoluciones totalmente diferentes.

Este argumento puede realizarse de una manera más cuantitativa introduciendo el llamado *coeficiente de Lyapunov*. Consideremos dos trayectorias inicialmente separadas en el espacio de fases una distancia  $d_0$ , al cabo de un tiempo  $t$  la distancia que las separa habrá cambiado y vendrá dada por  $d_t$ , que expresaremos formalmente de la forma:

$$d_t = d_0 e^{\lambda t}$$

donde  $\lambda$  es el llamado coeficiente de Lyapunov. Cuando  $\lambda \leq 0$  se dice que el régimen es regular mientras que cuando  $\lambda > 0$  el comportamiento es caótico.

### **EL CAOS COMO LA TERCERA REVOLUCIÓN DE LA FÍSICA EN EL SIGLO XX.**

Otra de las características distintivas que se le atribuyen al caos es ser la tercera revolución de la Física en el siglo XX, reservando para la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica los primeros lugares.



*D. Florentino Borondo Rodríguez*

Según Kuhn [10] las revoluciones en la ciencia traen consigo un cambio de paradigma, entiendo por tal el conjunto de verdades aceptadas por la comunidad científica. En este sentido, estas revoluciones pueden siempre definirse de una manera negativa enunciando conceptos que destronan. Por ejemplo, la revolución por excelencia que es la debida a Copérnico (entre otros) se conoce como la que acabó con el geocentrismo, de la misma forma que la relativista enterró el espacio y el tiempo absolutos, o la cuántica abolió la posibilidad de medir simultáneamente y con toda precisión variables físicas conjugadas.

En este sentido, los autores que defienden el carácter revolucionario de la teoría del caos se basan, entre otros argumentos, en que el comportamiento caótico lleva aparejada una imposibilidad de realizar cálculos matemáticos infinitamente precisos. Para examinar este argumento con más detalle examinemos un sistema dinámico muy sencillo, el llamado mapa de Bernouilli, que se define mediante la ecuación:

$$x_{n+1} = (2 x_n) \text{ mod } 1$$

que nos da una serie de números, cada uno calculable en función exclusiva del anterior. Supongamos ahora que realizamos el cálculo en un ordenador digital, que como sabemos trabaja internamente en el sistema binario, de ceros y unos, de numeración. Es sencillo darse cuenta de que en este sistema la operación “multiplicar por 2” corresponde simplemente a correr la coma decimal un lugar hacia la derecha, mientras que la “mod 1” elimina la parte entera del número en cuestión. De lo anterior se deduce que, excepto para un conjunto numerable de valores, el resultado de las sucesivas iteraciones del mapa de Bernouilli es eliminar una cifra significativa del valor con que se inicie la secuencia, de forma que como el ordenador opera con una representación finita de cifras el cálculo carecerá de sentido cuando se haya eliminado la última de estas.

En cualquier caso, tanto si se acepta este argumento como suficiente para demostrar el carácter revolucionario de la teoría del caos como si no, lo cierto es que esta ha traído un nuevo lenguaje y una forma común y unificada de racionalizar y entender los procesos dinámicos, que poco a poco va permeando a muchas áreas del saber e incluyéndose en los correspondientes temarios y libros de texto.

### **ATRACTORES EXTRAÑOS.**

El caos no sólo aparece en sistemas discretos como los descritos en el apartado anterior, sino que también es propio de algunos sistemas continuos de (al menos tres) ecuaciones diferenciales. Este es el caso del llamado sistema de Lorenz:

$$\begin{aligned} dX/dt &= 10 (-X+Y) \\ dY/dt &= -XZ + rX - Y \\ dZ/dt &= XY - 8 Z/3 \end{aligned}$$

Lorenz se interesó por este sistema en sus estudios de la convección de Rayleigh-Bénard, que corresponde al movimiento de un fluido situado entre dos placas a distinta temperatura; por ejemplo aire entre dos capas de la atmósfera [11]. Normalmente la inferior tendrá una temperatura mayor, con lo cual calentará el aire que tenderá a subir al hacerse más ligero. En el proceso el aire se volverá a enfriar y por tanto volverá a descender. En este fenómeno cíclico se forman “rollos” de convección, que son aprovechados por las aves planeadoras, como las cigüeñas o los buitres, en sus ascensos. En este sistema,  $X$  representa la amplitud del movimiento convectivo,  $Y$  la diferencia de temperatura entre las corrientes ascendente y descendente, y  $Z$  la desviación de la linealidad del perfil de temperaturas.

Integrando numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas anterior para diferentes valores del parámetro de control,  $r$ , Lorenz encontró distintas conductas en las cuales la solución era siempre “atraída” hacia un valor asintótico fijo. Así, para  $0 < r < 1$  el atractor era el origen, en el cual la convección deja de tener lugar y el calor fluye entre las dos placas por conducción. Para  $1 < r < 24.74$  el origen se vuelve inestable y aparecen dos nuevos puntos atractores

$$C^{\Sigma} = \Sigma ([10 (r-1)]^{1/2}, [10 (r-1)]^{1/2}, r-1)$$

correspondientes a rollos convectivos estables en los que el fluido rota en sentidos opuestos y el calor se transmite por convección. Y finalmente, para  $r > 24.74$  las trayectorias son atraídas hacia una figura con forma de mariposa, conocida hoy en día como atractor de Lorenz, y que a diferencia de los objetos de las geometrías tradicionales tiene una dimensión fraccionaria, cosa que en la época de su descubrimiento resultó totalmente extraña.

## LA GEOMETRÍA FRACTAL DE LA NATURALEZA.

En todos los campos de la ciencia estamos acostumbrados a trabajar con los objetos geométricos de dimensión entera, heredados de la geometría euclidiana. Así, los puntos tienen dimensión 0, las líneas 1, las superficies 2 y los volúmenes 3. Sin embargo, ya en el siglo pasado Cantor había definido objetos geométricos de dimensión fraccionaria. Un ejemplo típico es el llamado conjunto de Cantor o del tercio intermedio, que se construye de forma recursiva eliminando el tercio central de un segmento dado. En el límite de infinitas eliminaciones se obtiene un conjunto que, por construcción, no tiene ni dimensión 0 ni 1, sino intermedia. Igual que hizo Cantor pueden definirse conjuntos fractales de cualquier dimensión.

Además estos conjuntos fractales tienen la propiedad de invariancia de escala, es decir de ser autosemejantes. Así cuando se amplía una parte del mismo tiene la forma del conjunto completo, de la misma manera que cuando se arranca uno de los brotes de una coliflor este es igual que la coliflor entera, sólo que más pequeño.

Otro de los conjuntos fractales más fascinantes y conocidos es el conjunto de Mandelbrot [12], que toma su nombre del matemático que sin duda más ha contribuido al desarrollo y popularización de los fractales. Este conjunto se define a partir del mapa cuadrático:

$$z_{n+1} = z_n^2 + c, \quad \text{donde } z, c \in \mathbb{C} \text{ y } z_0 = 0$$

y está formado por todos los puntos,  $c$ , cuya secuencia no escapa a infinito.

Desde el punto de vista práctico, la compresión de imágenes mediante fractales, para su utilización en comunicaciones, juegos informáticos y generación digital de secuencias de películas, está cobrando una gran importancia. Esta tecnología se basa en los trabajos de Barnsley, quién demostró como pueden comprimirse imágenes mediante la aplicación reiterada de aplicaciones contractivas.

## REFERENCIAS CITADAS

- [1] H. Poincaré (1892): *Les Nouvelles Méthodes de la Mécanique Céleste*. Gauthier-Villards, Paris.
- [2] V.I. Arnold (1978): *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Springer Verlag, New York.
- [3] J. Gleick (1987): *Caos: La Creación de una Nueva Ciencia*. Seix Barral, Barcelona.
- [4] A.J. Lichtenberg y M.A. Lieberman (1981): *Regular and Stochastic Motion*. Springer Verlag, New York.
- [5] *Parque Jurásico* de S. Spielberg. *El Efecto Mariposa* de F. Colomo.
- [6] A. Escotado (1999): *Caos y Orden*. Espasa Calpe, Madrid. J. Briggs y F. David Peat (1999): *Las Siete Leyes del Caos*. Grijalbo, Barcelona.
- [7] Se dice que un fenómeno es lineal cuando si  $f_1$  y  $f_2$  son dos soluciones independientes de las ecuaciones que lo gobiernan  $f_1+f_2$  también lo es.
- [8] Espacio formado por todos los parámetros necesarios para caracterizar el estado del sistema.
- [9] E.N. Lorenz (1994): *La Esencia del Caos*. Debate, Madrid.
- [10] T.S. Kuhn (1975): *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica, México.
- [11] E.N. Lorenz (1963): "Deterministic Non Periodic Flow". *J. Atmos. Sci.* 20, 130.
- [12] B.B. Mandelbrot (1996): *La Geometría Fractal de la Naturaleza*. Tusquets, Barcelona.

Jesús Lizcano: El segundo ponente que va a intervenir en este Seminario es **D. Miguel Ángel Ramos Ruiz**, que procede igualmente del ámbito de las ciencias de la naturaleza, y más concretamente del ámbito de la Física. *Miguel Ángel es Profesor Titular del Departamento de Física de la Materia*

*Condensada de la Universidad Autónoma de Madrid. Se licenció en Ciencias Físicas por esta universidad en julio de 1985 donde realizó su Tesis doctoral sobre “Microscopia y espectroscopia de efecto túnel a bajas temperaturas”. Después de una estancia post-doctoral de un año en el KFA de Jülich (Alemania), regresó a la U.A.M., donde simultanea las actividades docentes con la investigación en las propiedades a bajas temperaturas de vidrios y sólidos desordenados.*

## **LOS SISTEMAS COMPLEJOS EN EL MUNDO DE LA FÍSICA**

La terminología de “sistemas complejos”, empleada en muy diversas áreas del conocimiento, pretende más generalizar un comportamiento rico y complicado de muchos sistemas que proporcionar una definición específica. Obviamente, el concepto de sistema complejo se aplica a objetos muy diferentes –y se aborda de muy diferente manera- según el campo científico de que se trate: Física, Química, Matemáticas, Biología, Ingeniería, Economía, Psicología, Lingüística, etc. No obstante, el estudio de los sistemas complejos en ámbitos tan diferentes comparte un gran número de aspectos comunes que hace de ésta una materia realmente interdisciplinar e interesante, y que debe permitir aprender mucho de los casos estudiados en otras disciplinas.



*D. Miguel Ángel Ramos Ruiz*

Esta contribución quiere introducir brevemente alguno de los casos más importantes y paradigmáticos de sistemas complejos en el mundo de la física -y, también, de la química-: los sólidos amorfos o desordenados, la mayoría de los cuales corresponden a lo que los físicos llaman vidrios o sólidos no cristalinos, y que van mucho más allá del por todos conocido vidrio transparente con el que se fabrican, por ejemplo, las ventanas. Además, intentaremos mostrar la relación y utilidad práctica del estudio del llamado “estado vítreo” en otros campos como la biofísica o la biotecnología.

Como es bien conocido, cuando se enfría un líquido por debajo de su temperatura de fusión, éste puede cristalizar (por ejemplo, el agua líquida se transforma en hielo por debajo de 0° C). Este abrupto cambio de estado se conoce en física como transición de fase de primer orden. Sin embargo, ni mucho menos todos los sólidos que conocemos presentan alguna de las estructuras ordenadas que nos enseña la cristalografía. Con mayor o menor facilidad, todos los líquidos pueden enfriarse por debajo de su temperatura de fusión (o de cristalización, si la miramos en este sentido) manteniendo su estado líquido (*sobrenfriado*) sin darle la oportunidad de cristalizar. En principio, cuanto más rápido enfriemos el líquido más probable será que sobrepasemos la cristalización y consigamos mantener la sustancia en un (metastable) estado líquido, cada vez más viscoso a medida que descendemos su

temperatura, hasta que finalmente el material se solidifica... ¡pero sin cristalizar! Esto es lo que se conoce en física y química como un vidrio: un sólido no cristalino -esto es, desordenado o *amorfo*-.

Aunque la Física del Estado Sólido que se estudia en las licenciaturas universitarias se ha identificado tradicionalmente con la física de los sólidos cristalinos, ya que obviamente son mucho más fáciles de estudiar y se ha avanzado mucho más en su comprensión gracias a su ordenada estructura cristalina, la realidad es que una gran parte de los materiales sólidos que tenemos delante de nosotros en la vida diaria son sólidos no cristalinos: Desde el típico vidrio -en la acepción clásica de la palabra- obtenido por el maestro vidriero enfriando y dando forma al fundido para obtener una copa, una ventana o un simple tubo de pyrex hasta todo tipo de materiales plásticos empleados en nuestra sociedad actual, pasando por múltiples polímeros naturales -¡incluido el inefable jamón serrano!-, las películas de semiconductores amorfos que se emplean en xerografía para que podamos hacer las fotocopias, o cada vez más materiales amorfos, metálicos o semiconductores, que se preparan para su uso en las últimas tecnologías de elementos de microelectrónica y ordenadores, células solares, dispositivos magnéticos, etc., todos ellos constituyen ejemplos claros de la ubicuidad de los sólidos desordenados en el mundo real.

Pero, ¿dónde radica exactamente la *complejidad* de estos sistemas no cristalinos o vítreos, comparados con los sólidos cristalinos? Ciertamente, en ambos casos se trata de un número igualmente enorme de átomos o moléculas que constituyen el sistema en estudio. La diferencia fundamental radica en la brutal simplificación que supone el orden cristalino, que consiste en que una celda unidad elemental de unos pocos átomos se repite sucesivamente hasta el infinito en sus tres dimensiones. Por el contrario, para un sólido amorfo que carece de este ordenamiento cristalino o “de largo alcance”, necesitaríamos localizar uno a uno todos los átomos que lo componen para describir con precisión su estructura, algo que obviamente es del todo imposible. Es más, el desorden y el azar intrínsecos al estado vítreo implica que nunca dos muestras cualquiera de la misma sustancia tendrán la misma estructura (aunque macroscópicamente sean muy similares), al contrario de la estructura bien definida de un sólido cristalino dado. No obstante, se ha demostrado que todos los vidrios comparten universalmente muchas propiedades físicas básicas, independientemente de sus variadísimas composiciones químicas, siendo mucho más parecidos a cualquier otro vidrio que a la misma sustancia en estado cristalino. Entender qué ingrediente fundamental introduce la complejidad del desorden vítreo o no cristalino para producir tan sorprendente efecto sigue siendo un reto para los físicos.

El paso, gradual aunque relativamente rápido, del líquido sobrenfriado al estado vítreo se conoce como “transición vítrea”, cuyo carácter y clasificación como transición de fase es ya desde hace muchas décadas motivo de estudio y controvertido debate: los físicos seguimos sin ponernos de acuerdo y sin entender la verdadera naturaleza de la “transición vítrea”, incluso se discute si es o no una verdadera transición de fase en el sentido termodinámico. Es, sin duda, uno de los grandes retos pendientes de la Física de la Materia Condensada para el siglo XXI.

A diferencia de las transiciones de fase de primer orden, magnitudes físicas como el volumen o la entropía no cambian abruptamente a determinada temperatura, sino que sólo cambia su ritmo de variación, dando lugar a cambios finitos en sus magnitudes derivadas como el coeficiente de dilatación térmica o el calor específico, que es lo que los investigadores miden. Esto se produce en un intervalo de temperatura relativamente estrecho, cuando el fuerte incremento de la viscosidad del líquido al disminuir su temperatura lleva aparejado el cambio desde un sistema *ergódico* (el líquido sobrenfriado, que se encuentra en equilibrio termodinámico) a un sistema *no ergódico* (el vidrio, que pierde la capacidad de muestrear todos los estados posibles para elegir el de menor energía y queda “atrapado” en algún subconjunto de ellos). Esta competencia entre aspectos termodinámicos y meramente cinéticos de la transición vítrea está en el centro de todas las discusiones y controversias sobre este tema.

Otro punto central del debate científico sobre la verdadera naturaleza del estado vítreo y de la transición vítrea lo constituye la llamada *paradoja de Kauzmann*, enunciada hace ya más de 50 años. Casi sobre lo único que hay consenso en este campo es que cualquier teoría definitiva sobre los vidrios deberá dar una explicación clara y satisfactoria de dicha “paradoja”. Lo que hizo notar Kauzmann, tras estudiar las transiciones vítreas mediante la medida de la variación del calor específico con la temperatura para diferentes sustancias, es que la entropía de éstas (indicadora del grado de desorden *configuracional* del sólido o del líquido, fácilmente extraíble de dichas medidas) seguía disminuyendo por debajo de la temperatura de transición vítrea. Extrapolando los datos del líquido cuidadosamente sobrefriado a temperaturas más bajas, la entropía del vidrio llegaría a ser inferior a la del correspondiente estado cristalino perfectamente ordenado (resultado absurdo) y si proseguimos con la extrapolación a más bajas temperaturas, la entropía del vidrio se haría incluso negativa (violación flagrante del tercer principio de la termodinámica). Evidentemente, de una manera u otra, está claro que la solución del problema es que tales extrapolaciones de la entropía a más bajas temperaturas deben ser incorrectas, pero falta explicar por qué el sistema “sabe” que debe desviarse de la curva entrópica del líquido sobrefriado y convertirse en un vidrio para detener la fatal tendencia entrópica que conduciría a vulnerar los principios elementales de la termodinámica.

Parecería que la evidente complejidad inherente al carácter desordenado y aleatorio de todos los sólidos no cristalinos supone un obstáculo insalvable para abordar teóricamente el estudio físico de estos sistemas. Sin embargo, se da una vez más aquí la aparente paradoja de que el desorden y el azar aplicado a un número prácticamente infinito de elementos permite el uso fiable de la estadística, haciendo relativamente fácil lo muy complejo. En particular, se acepta y se utiliza cada vez más el llamado *paradigma del paisaje de energías*. En sistemas sencillos como átomos, moléculas o partículas nucleares, la física nos lleva a la existencia de una serie discreta (cuantizada) de niveles de energía, desde la del estado fundamental del sistema, básicamente no degenerado, a sucesivos niveles de energía superior que corresponden a posibles estados excitados del sistema y que serán ocupados o no en función de la temperatura. En sistemas complejos como los vidrios -¡y no sólo en ellos!- esta descripción ya no es posible. Sin embargo, en su lugar, debido al carácter altamente degenerado de todos los estados posibles del sistema, uno puede imaginarse un “paisaje de energías” consistente en representar esquemáticamente una energía potencial del sistema frente a una hipotética coordenada generalizada (que diese cuenta de la configuración completa del sistema en un determinado estado). La imagen así dibujada sería la de una cadena rugosa y sin fin de valles y montañas (de energía), con sus pasos de montaña y sus cuencas o regiones más separadas unas de otras, que ilustraría vivamente la distribución de estados del sistema complejo y ayuda a comprender intuitivamente el comportamiento de éste según el “nivel de temperatura” en el que nos encontremos.

Lo que es quizás aún más fascinante es que, si un físico o químico familiarizado con estas aproximaciones actuales a la física de los vidrios bucea en revistas de biofísica, o asiste a alguna conferencia sobre ello, se encontrará con que los numerosos científicos dedicados al estudio de procesos biológicos de primera importancia como el plegamiento de proteínas utilizan prácticamente el mismo esquema del paisaje de energías. Las biomoléculas constituyen otro sistema complejo con muchos puntos en común con los vidrios. De hecho, uno pronto encontrará que los biofísicos reconocen haberse inspirado precisamente en los estudios pioneros de sistemas desordenados dentro de la Física de la Materia Condensada. Pero la realidad va más allá de una mera analogía formal. Experimentos de calorimetría muestran que la proteína desnaturalizada presenta una pronunciada transición vítrea, mientras que la proteína plegada apenas muestra ningún cambio a la misma temperatura. Este efecto, además, se amplifica notablemente con el contenido de agua de la proteína. Sin entrar en más detalles, digamos que se han publicado diferentes tipos de experimentos en diversos sistemas de biomoléculas que muestran propiedades físicas muy semejantes, si no iguales, a las que caracterizan y distinguen a los sólidos desordenados de los cristalinos. Después de todo, una proteína no deja de ser un conjunto de macromoléculas, de muchos cientos de átomos cada una y sin orden cristalino interno, lo que puede justificar la comparación.

Otro ejemplo todavía más sorprendente de la interrelación entre la física de los vidrios y la materia viva se ha encontrado, por ejemplo, en algunos insectos que pueblan los desiertos. Estos insectos pueden sobrevivir durante largos períodos de tiempo en duras condiciones de sequía para después revivir completamente mediante el procedimiento de... ¡transformarse en vidrio! En efecto, los biólogos han averiguado que estos insectos se protegen de la sequía rodeándose de una capa envolvente de azúcar que inmoviliza y protege las proteínas del ser vivo. Este mecanismo es efectivo precisamente por encontrarse dicho azúcar en estado vítreo o amorfo, ya que si cristalizase dañaría irreversiblemente dichas proteínas. Podemos comparar este método con la perfecta conservación de insectos y otros pequeños seres vivos de hace millones de años dentro de piezas de ámbar natural, otro sólido amorfo. Estudios más detallados han demostrado que esta deshidratación no destructiva y reversible se debe en concreto a la síntesis celular de un azúcar disacárido, la trehalosa, y comparando este azúcar con otros azúcares similares que podría sintetizar el insecto se observó que la trehalosa era la sustancia que mostraba la temperatura de transición vítrea más alta, aumentando ésta al disminuir la proporción de agua y llegando a valores por encima de la temperatura ambiente para las bajas concentraciones de agua existentes al deshidratarse el insecto. Es decir, al llegar la sequía, la temperatura de transición vítrea de este azúcar va subiendo hasta cruzarse con la temperatura del medio, produciendo que pase del estado fluido al vítreo, quedando así el insecto en un estado de animación suspendida hasta que la llegada liberadora del período de lluvias invierta reversiblemente el proceso. La elección de la trehalosa parece pues un nuevo ejemplo inteligente de selección natural.



*Vista general de la Sala y de los asistentes al Seminario*

Esta maravillosa técnica de supervivencia está siendo tratada de imitar actualmente en Biotecnología para preservar fármacos y material biológico en general. En lugar de técnicas más sofisticadas y costosas, como la congelación en vacío o el secado por spray, para la conservación y transporte de estos delicados productos se están probando cada vez más diversos sistemas de conservación similares al del insecto del desierto, a base de elegir las composiciones adecuadas que permitan pasar el producto al estado vítreo evitando una cristalización irreversiblemente destructiva.

En resumen, la física de los vidrios, o más generalmente de los sólidos desordenados, constituye un caso ejemplar de sistema complejo no sólo muy interesante dentro del campo de la física, sino también como modelo para entender otros sistemas complejos en campos muy diferentes. Es más, el mismo proceso en sí de la transición vítrea es empleado por algunos seres vivos para proteger su vida y ya las empresas farmacéuticas están intentando copiar la idea para conservar el material orgánico, tanto natural como artificial. La conclusión fundamental que debemos extraer de todo esto es que la *complejidad* de muchos sistemas, asociada a su particular distribución de desorden y azar no debe significar necesariamente una dificultad insalvable para su estudio. Antes al contrario, los sistemas complejos comparten una serie de propiedades, principalmente estadísticas, que permiten progresar en su comprensión y en la predicción de sus comportamientos, y que además deberían ser comunes a muy diversos tipos de sistemas complejos en distintas disciplinas científicas.

## **BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA:**

*Glasses & Amorphous Materials: Frontiers in Materials Science*. Science, 31 Marzo 1995.

H. Frauenfelder and P.G. Wolynes (1994): *Biomolecules: Where the physics of complexity and simplicity meet*. Physics Today, Febrero, pp. 58-64.

S.R. Elliott (1990): *Physics of Amorphous Materials*. Longman, New York, 2ª ed.

Jesús Lizcano: A continuación va a intervenir en el Seminario **D. Roberto Marco Cuellar**. *Roberto es Doctor en Medicina y Ciencias. Es profesor del Departamento de Bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Madrid desde 1969, Científico Titular del CSC desde 1970, y desde 1984 es Catedrático de Bioquímica, Biofísica y Biología Molecular en el Instituto de Investigaciones Biomédicas "Alberto Sols" UAM-CSC. Ha realizado estancias múltiples en centros de investigación de Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Holanda y Francia. Dirige un grupo de investigación interesado en mecanismos genéticos y bioquímicos que controlan el desarrollo y envejecimiento en Drosophila y Artemia. En este contexto y a instancias de la Agencia Espacial Europea, ha estado interesado en investigar y aplicar los efectos biológicos de la radiación de microondas.*

## **LOS SISTEMAS EN EL BORDE DEL CAOS: IMPLICACIONES EN BIOLOGÍA CELULAR Y MOLECULAR. IMPLICACIONES EN FISIOPATOLOGÍA**

Mi intervención en este Seminario no es como experto ni siquiera entendido en Sistemas Caóticos y sus aplicaciones en Biología sino como un investigador en Biología del Desarrollo *extrañamente atraído* por las ideas y conceptos que desde hace tiempo se han empezado a proponer en este terreno, al intuir que en ellas puede encontrarse el germen de uno de las metodologías de investigación de vanguardia del siglo que en breve va a empezar.

Sólo pretendo pues plantear algunas cuestiones que me parecen atractivas, cuestiones que quizás inciten a intervenir a otros participantes en el seminario con mucho más cualificación que yo para discutir de este tema.

Me voy a limitar a analizar someramente las características del comportamiento de los sistemas dinámicos no lineales, en la aplicación a la Biología y a la Medicina de los desarrollos recientes en la estructura físico-matemática de las teorías dinámicas no lineales, coloquialmente denominadas teorías del caos o más precisamente, del caos determinista. Parto de la base que el análisis del comportamiento teórico de los sistemas dinámicos no lineales puede aportar conceptos nuevos y más potentes para analizar el comportamiento real de sistemas complejos como los biológicos.

Hemos visto en intervenciones anteriores que incluso en sistemas relativamente simples regidos por expresiones matemáticas no demasiado complicadas pero con características de no linealidad, y dependiendo de los valores que adquieran ciertos parámetros pueden producirse bifurcaciones en sus estados accesibles, apareciendo una multiplicidad creciente de “atractores”, zonas del espacio de fases que puede visitar el sistema, y que una vez penetradas, lo atrapan en ellas. Estos atractores pueden tener distintas características geométricas, ser “puntos”, estados estacionarios estables, “líneas”, ciclos límites responsables de oscilaciones periódicas del sistema en dos dimensiones, “superficies”, en tres o más dimensiones, etc. y eventualmente también los llamados “atractores extraños o estados caóticos”, en los que las orbitas parecen seguir trayectorias aleatorias, caracterizadas por su sensibilidad extrema a los valores iniciales. En todos los casos, sin embargo, el sistema permanece atrapado en el volumen o *cuenca* del “hiper” espacio de fases teóricamente accesible al sistema dominado por uno de dichos atractores, sin poder salir de él a menos que se produzca algún cambio (generalmente externo a las variables del sistema) en los parámetros numéricos que lo conforman de forma determinista o que una fluctuación en una trayectoria muy próxima a la zona límite, separadora entre dos cuencas de atracción, les haga traspasar dicha frontera de separación, alcanzando la cuenca de un atractor diferente, y pasando a ser dominados por él.



*D. Roberto Marco Cuellar*

Aunque menos explorados y caracterizados, la posibilidad de la existencia de múltiples, cuencas de atracción, incluyendo estados caóticos, es inherente a los sistemas complejos regidos por relaciones no lineares muy alejadas del equilibrio. La Biología está llena de sistemas no lineares, muy alejados del equilibrio. De hecho, la Biología es una disciplina caracterizada por la complejidad de los sistemas que la componen. Si los sistemas complejos son pues susceptibles de acceder a regiones o cuencas regidas por atractores caóticos y estos estados están caracterizados por su sensibilidad extrema a las condiciones iniciales, ¿Cómo es posible que los sistemas biológicos sean tan reproducibles? ¿Cómo consiguen evitar entrar en zonas del espacio de fases dominadas por atractores extraños que den lugar a un comportamiento caótico o no es esto así?. Se ha postulado que los seres vivos se caracterizan por encontrarse en las zonas del hiperespacio de fases, precisamente en las proximidades de las zonas dominadas por atractores extraños, y que esta característica es la responsable de la adquisición de niveles crecientes de organización, de la emergencia de propiedades nuevas a lo largo de la Evolución: “*Life at the edge of chaos*” o dicho en otras palabras, “la Vida nace y se organiza precisamente en las cercanías de regiones caóticas, precisamente en zonas donde la transición entre

distintos atractores sea siempre suave y gradual, evitando la posibilidad de transiciones bruscas que puedan desestabilizar o incluso aniquilar al sistema”.

Dejando a un lado problemas más filosóficos, posiblemente irresolubles, el objetivo último del análisis científico no puede ser otro que la predicción del comportamiento futuro de los distintos sistemas accesibles a nuestra investigación. La Biología, precisamente por su complejidad, no ha alcanzado aún esta fase de desarrollo. El paradigma actual de la Investigación en Biología, al menos en las ramas más fundamentales, es todavía meramente identificar los componentes que intervienen en los diferentes procesos celulares y orgánicos, y caracterizar sus interacciones de forma que empecemos comprender su funcionamiento íntimo. Esta comprensión es todavía esencialmente cualitativa y sólo en algunos campos muy concretos se pretende alcanzar un nivel de descripción (y predicción) cuantitativo. De hecho, como un paso en esta dirección desde el punto de vista experimental, se sigue intentando la reconstitución *in vitro* de los distintos subsistemas analizados, o bien, como siempre lo hizo aleatoriamente la Genética clásica, reemplazar *in vivo* alguno de estos componentes para investigar sus efectos en el comportamiento global del sistema.

La escasa repercusión de estos cambios que se observa muy frecuentemente es uno de los hechos que indica las importantes limitaciones de nuestra metodología actual de investigación. Aunque se esté intentando suplir estas limitaciones mediante técnicas de simulación del comportamiento de sistemas más o menos simplificados, por razones diversas (inmadurez de la técnica, complejidad del problema, desencuentro entre los campos teórico y experimental, etc.) esta aproximación todavía no ha producido los resultados esperables, al menos, para un cierto grupo de investigadores que tratan de crear las cabezas de puentes entre el campo teórico y el experimental, que, hoy por hoy, siguen sin interaccionar de forma efectiva.

En definitiva, los proyectos de investigación actuales están avanzando muy deprisa en la caracterización de los componentes de la complejidad biológica, pero el análisis dinámico de su comportamiento no progresa tan deprisa. Un organismo vivo está compuesto de millones de células, relacionadas entre sí, muchas de ellas interconectadas. A su vez, cada una de ellas está compuesta por millones de moléculas de miles de clases diferentes, muchas de ellas dotadas de actividad catalítica. Teniendo en cuenta que la no linealidad es la característica de la mayor parte de los procesos e interacciones que se producen en los sistemas biológicos, ¿cómo es posible que estos sistemas se mantengan con un alto grado de organización sin desmoronarse, sin entrar en crisis?

## **IMPLICACIONES EN BIOLOGÍA CELULAR Y MOLECULAR.**

Actualmente atravesamos un momento irrepetible en el campo de la Biología Molecular. Estamos avanzando a pasos agigantados en completar el inventario de los componentes que forman los organismos vivos y más concretamente en los componentes codificados en el genoma. Este es el propósito del proyecto genoma. Cuando se planteó hace una decena de años, parecía un objetivo imposible, inalcanzable. En estos momentos se han secuenciado completamente el genoma de varias decenas de microorganismos (por ejemplo, la bacteria *Hemophilus influenzae* alberga 1709 genes en su genoma), de un organismo unicelular eucariótico, la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (6241 genes), de dos animales multicelulares, el nematodo *Caenorhabditis elegans* (18424 genes) y la mosca *Drosophila melanogaster* (13691 genes). Está muy avanzada la secuenciación del genoma humano y de varias plantas, especialmente una de ellas, *Arabidopsis thaliana*, elegida a propósito por su genoma relativamente pequeño, cosa hasta cierto punto infrecuente en el reino vegetal.

El número de componentes génicos codificados en el genoma es variable, variabilidad aumentada por la existencia de mecanismos adicionales de producción de multiplicidad, tales como los producidos por la posibilidad de formas múltiples transcripcionales y posttranscripcionales. Los números varían entre el par de miles de genes en los organismos procarióticos hasta las varias decenas de miles de genes en el genoma humano (previsiones revisadas actualmente a la baja desde los cien

mil genes estimados anteriormente). Se piensa que un genoma mínimo puede ser capaz de hacer frente a todas las funciones básicas de una célula procariótica bastarían con unos 400 genes. Si en un organismo multicelular como el humano, existen del orden de un centenar de tipos distintos de células diferenciadas, parecería que el orden de magnitud de la complejidad es enorme. Estos genes codifican por un número variable, pero equivalente de proteínas, productos génicos activos en la célula. Estos productos se encuentran organizados en diversas redes estructuradas, controladas por bucles negativos y positivos, *feedback* y en menor proporción, quizás, *feedforward*. La evolución de las redes génicas, de las redes neuronales y el concepto de la ventaja evolutiva y adaptativa de mantenerse en las cercanías del caos (the edge of chaos).

La cinética enzimática sigue una relación no-lineal, especialmente en el caso de los enzimas regulados, alostéricos. De hecho, ya hace algún tiempo que se demostró que la vía glicolítica tanto en suspensiones de células de levadura, en extractos de levadura, como en extractos musculares es capaz de demostrar oscilaciones sostenidas interpretables como debidas a encontrarse en un ciclo límite. Más aún, extractos de levaduras sometidos a condiciones forzadas de influjo del sustrato externo, la glucosa, muestran comportamientos dinámicos complejos que van desde el entrenamiento pasando por la cuasiperiodicidad y alcanzando finalmente cinéticas caóticas. Evoluciones semejantes se han modelizado con sistemas más simples como por ejemplo sistemas de regulación metabólica formados por dos reacciones consecutivas catalizadas por dos enzimas activados alostéricamente por su propio producto. Este sistema, en el que participan tres componentes, cuya evolución temporal está regida por tres ecuaciones no lineales, permite representar el comportamiento dinámico de los tres componentes en relación a los dos parámetros externos, la entrada de sustrato y la salida del producto final. El análisis de su espacio de fases indica la presencia de varias regiones dominadas por diversos atractores entre ellos alguno caótico.

Análisis con modelos simplificados de redes biológicas complejas como son las redes booleanas, formadas por elementos interconectados que pueden adoptar sólo dos estados, cero y uno, indican que pueden adoptar estados ordenados, estados complejos y estados caóticos. Sin embargo, no se ha identificado todavía que se pueda encontrar un comportamiento caótico en las complejas redes génicas que se están describiendo en la actualidad, o en los complejos sistemas de transducción de señales, cada vez más interconectados. ¿Por qué es esto así?. Aunque no puede descartarse que no se hayan detectado estos comportamientos dinámicos por limitaciones en las técnicas de observación, la respuesta más lógica a esta pregunta es que los sistemas biológicos consiguen evitar penetrar en las zonas del espacio de fases donde domine el comportamiento caótico. Como ya se ha dicho, es posible que la forma de mantener las opciones abiertas de evolución por parte de los seres vivos y al mismo tiempo controlar sus estados fisiológicos sea mantenerse al borde del caos. En esta situación están más abiertas las posibilidades de traspasar los límites de los estados que el sistema ha experimentado y controlado hasta el momento y alcanzar alguno nuevo que le permita adaptarse a las nuevas situaciones que puedan plantearse en el futuro.

## **IMPLICACIONES EN FISIOPATOLOGÍA.**

Existe otra aproximación al problema del análisis del funcionamiento de los sistemas vivos complementaria a la disección e identificación de los componentes de los mismos y al análisis detallado de sus propiedades funcionales. Esta aproximación se basa en el estudio de su comportamiento global fisiológico e incluso patológico tratando de encontrar en él los rasgos más importantes de sus propiedades y tratando de identificar los procesos celulares y moleculares subyacentes que los explican. En otras palabras, puentear desde este otro lado el problema de identificar los procesos más críticos para entender las propiedades de los seres vivos y su capacidad de adaptación en su conjunto.

Desde esta perspectiva, hay que destacar la existencia de numerosos procesos fisiológicos complejos en los que se han detectado variaciones periódicas regulares e irregulares, algunas de los

cuales han sido interpretadas como el reflejo de estados caóticos. Por ejemplo, destacan las variaciones en los niveles sanguíneos de metabolitos, hormonas y factores reguladores, así como los ligados a la actividad eléctrica nerviosa y a la cardíaca cuyos registros complejos han sido utilizados por los clínicos desde que se identificaron, como valiosos elementos para el diagnóstico de síndromes y enfermedades. Una pregunta inmediata es, ¿puede el análisis dinámico de estos registros, sacar conclusiones o incluso predicciones sobre los estados de anormalidad, sobre los estados patológicos?. Frente a la idea más intuitiva de que los estados caóticos podrían ser típicos de los estados patológicos, se ha acumulado una cierta evidencia de que en los seres vivos se puede dar la situación inversa. Por ejemplo, se ha postulado que la actividad eléctrica del sistema nervioso o el ritmo endógeno de la contracción cardíaca presentan en condiciones fisiológicas características caóticas, características que tienden a regularizarse en ciertas condiciones patológicas como por ejemplo, la epilepsia o en el fallo cardíaco o la fibrilación auricular. Esto puede ser otra manifestación de la capacidad de los seres vivos de explotar su capacidad de mantenerse en el borde del caos y de facilitar su adaptación a las fluctuaciones con las que se encuentran en su funcionamiento normal.

Hay que indicar que estas ideas son sólo hipótesis de trabajo y que existen otras interpretaciones. Los registros aparentemente caóticos, resultado de un conjunto complejo de subprocesos subyacentes a los mismos, podrían ser la consecuencia de meras fluctuaciones o ruido en el sistema, o de simples procesos aleatorios, estocásticos que se produjeran en él, antes de indicar la existencia de un fenómeno de caos determinista en los mismos. No parece existir hasta el momento una forma inequívoca de saber si un determinado patrón de respuesta corresponde a uno u otro de estos mecanismos de generación.

En cualquier caso, sea ruido o cambios neutrales, sean procesos estocásticos o fases caóticas de los procesos dinámicos, los sistemas biológicos han sabido sacar partido de ellos, permitiendo reproducir y controlar de forma muy precisa las diferentes soluciones implementadas a lo largo de la Evolución. No sólo ésto, sino dar lugar a nuevas soluciones, a novedades evolutivas, adaptadas a las diferentes situaciones morfológicas y funcionales que han aparecido y puedan aparecer en la Bioesfera. Si aprendiéramos a entender cómo consiguen los sistemas biológicos optimizar estas respuestas, podríamos tal vez incorporar en todo o en parte dichas soluciones a otros terrenos de las actividades humanas, como los abordados por otros participantes en este Seminario. Es esta una posibilidad que me fascina y con la que quiero concluir mi intervención.

Jesús Lizcano: Vamos a comenzar a continuación el segundo bloque de intervenciones del Seminario. Los ponentes que van a intervenir seguidamente pertenecen al ámbito de las Ciencias sociales. En primer lugar, va a desarrollar su presentación **D. Francisco José Vázquez Hernández**. *Francisco José es Doctor en Ciencias Matemáticas por la Universidad Complutense de Madrid. Actualmente es Profesor Titular de Fundamentos del Análisis Económico en esta Facultad de CC. Económicas y Empresariales (U.A.M.) y concretamente en el Departamento de Análisis Económico: Economía Cuantitativa. Sus áreas de investigación se han venido centrando fundamentalmente en temas tan relacionados con este Seminario-debate como son: la Economía Dinámica, la Teoría del Caos y la Teoría Económica del Seguro.*

## **CAOS Y COMPLEJIDAD EN ECONOMÍA**

Las series económicas muestran con frecuencia un tipo de comportamiento caracterizado por la presencia de ciertas regularidades inmersas en una apariencia general bastante irregular. Estas fluctuaciones económicas han sido principalmente explicadas desde dos puntos de vista. El primero de ellos supone que la causa de las fluctuaciones radica en la existencia de shocks exógenos. En ausencia de ellos, los procesos económicos son simples, lineales y estables. La aparición (aleatoria) de shocks exógenos constituye, por tanto, el fundamento esencial de esta explicación: estos tienen como efecto el desviar la evolución de las sendas de equilibrio. De acuerdo con el segundo punto de vista, las

fluctuaciones son causadas por la no-linealidad inherente a los procesos económicos. Es pues una explicación endógena que considera posible la existencia de fluctuaciones incluso en ausencia de shocks externos.



*D. Francisco José Vázquez Hernández*

Aunque las teorías no-lineales han desempeñado un importante papel en el desarrollo de la Economía durante los últimos 50 años, en las dos últimas décadas han experimentado un notable resurgimiento. La principal razón de este renovado interés reside en el descubrimiento de que sistemas (deterministas) no-lineales simples pueden exhibir comportamiento complejo e irregular. Sin entrar en detalles técnicos, los modelos dinámicos no-lineales pueden manifestar una dependencia muy sensible a las condiciones iniciales; así, pequeños errores iniciales se magnifican con el paso del tiempo, lo que, por un lado, limita drásticamente el horizonte predictivo y, por otro, genera una serie temporal de apariencia aleatoria. Además, se ha constatado que estas dinámicas caóticas son más habituales de lo que en principio se pensaba: no forman un oasis (interesante pero improbable) en el universo de la dinámica clásica y regular, más bien todo lo contrario, surgen en una gran variedad de modelos provenientes de muchos campos de la ciencia (desde la Física, la Química y la Biología hasta la Economía, la Sociología y la Lingüística), incluso, aunque pueda parecer sorprendente, en sistemas de muy baja dimensión (de hecho, en sistemas uni-dimensionales).

Desde este punto de vista, se ha producido un replanteamiento de la supuesta aleatoriedad de ciertas series temporales. Dado que los sistemas caóticos son capaces de generar dinámicas altamente irregulares, casi indistinguibles en muchos casos de procesos puramente estocásticos, cabe plantearse si la serie procede de un sistema dinámico determinista caótico. En caso afirmativo, aunque la predicción a largo medio y plazo está condenada al fracaso, sí es posible extraer información útil del sistema; al fin y al cabo, el sistema es determinista, por lo que existe algún tipo de regularidad estadística (orden dentro del caos). Para ilustrar estos comentarios, consideremos la evolución del tiempo atmosférico, típico y manido ejemplo de sistema caótico: si bien una predicción fiable no va más allá de 3 ó 4 días, es posible aventurar con bastante probabilidad de éxito el tiempo que hará en Madrid el día 15 de Agosto del año 2010.

La imposibilidad práctica de la precisión “infinita” en la medición de las condiciones iniciales, en conjunción con la existencia de dinámicas sumamente sensibles a las condiciones de partida, se ha

interpretado epistemológicamente como una especie de liberación respecto del paradigma clásico, bajo el cual todo estaba predeterminado. Muchos sucesos no son tan previsibles como se creía: el azar (entendido como impredecibilidad originada en procesos con leyes deterministas) está presente por doquier, lo que en un contexto social posibilita la entrada del libre albedrío y de la racionalidad acotada.

Naturalmente, la Economía no ha quedado ajena e indiferente al desarrollo de la denominada teoría del caos. Su impacto se ha dejado particularmente notar en áreas como la teoría del crecimiento y la teoría de ciclos y, más recientemente, en los mercados financieros (de capitales y bursátiles). La principal repercusión en el ámbito de la Economía descansa, como se ha comentado con anterioridad, en la posibilidad de explicar endógenamente las fluctuaciones de las variables económicas. Así, las clásicas teorías lineales han evolucionado hacia teorías no lineales, capaces de generar fluctuaciones irregulares con ciertas propiedades de regularidad, características presentes en las series reales observadas. Las nuevas teorías endógenas del crecimiento y del ciclo económico representan esta evolución, desarrolladas por economistas tan conocidos, por citar algunos, como K. J. Arrow, J. Benhabib, M. Boldrin, R. M. Day, R. M. Goodwin, J. M. Grandmont y J. A. Scheinkman.

Por otro lado, esta propuesta emerge, si cabe, con mayor contundencia en el contexto de los mercados financieros. La impredecibilidad de los precios se justificaba en términos de la denominada hipótesis de mercado eficiente. Aunque hay varias versiones de ella, la hipótesis de mercado eficiente sostiene que los precios de las acciones reflejan tanto la información (pública o privada, dependiendo de la versión) sobre aquellos hechos que han ocurrido como sobre aquellos que el mercado espera que ocurran en el futuro. Desde este planteamiento, se consideraba que los precios seguían un camino aleatorio, o más recientemente, una martingala (un proceso cuyas variables son impredecibles a partir de la información conocida). Sin embargo, estudios recientes han detectado ciertas “anomalías” que contradicen la hipótesis de mercado eficiente: entre otras, el efecto tamaño (empresas pequeñas parece que proporcionan rendimientos superiores a las grandes) y el efecto sobrerreacción (reacción excesiva a la nueva información). La teoría del caos abre las puertas a nuevas explicaciones del funcionamiento de los mercados financieros, introduciendo la posibilidad de que estos presenten comportamientos inherentes complejos y que los shocks aleatorios no hagan sino añadir irregularidad exógenamente.

Este nuevo punto de vista nos conduce al tema de la complejidad. En sentido amplio, un sistema se dice que es complejo cuando no puede explicarse de forma satisfactoria a partir de sus componentes individuales, presentando interacciones entre distintos niveles. Estos sistemas complejos tienen a menudo propiedades de autoorganización: de la interacción entre los individuos emerge, de manera no intencionada, una cierta estructura agregada, que suele tener características caóticas. La teoría de la autoorganización (también conocida como teoría de la emergencia) está siendo aplicada a distintas parcelas de la Economía (ciclos económicos, geografía económica, economía espacial, etc.) y, en particular, en los mercados financieros. Un ejemplo ilustrativo se tiene en la distribución de las áreas urbanas: aunque esta distribución depende de la interacción de una enorme cantidad de agentes, es sorprendente que se ajuste con gran precisión a una ley potencial (la ley de Zipf), según la cual el número de ciudades cuya población es superior a una cierta cantidad  $L$  es proporcional a  $1/L$ .

En el contexto de los mercados bursátiles, en los últimos años se están realizando serios intentos de modelización de su posible comportamiento autoorganizado. Para ello, se introducen distintos tipos de agentes, diferenciados por sus conductas de inversión; el caso más simple consiste en distinguir dos tipos de inversores, los fundamentalistas (se fijan en el valor intrínseco del activo, compran si el precio es menor y vende si es mayor) y los chartistas o técnicos (observan la evolución pasada de los precios; en términos sencillos, compran si el precio sube y venden si baja). Ya modelos tan simples como el anterior generan estructuras agregadas (precios de activos) con dinámicas caóticas. La introducción de una mayor diversidad en los tipos de inversores (diferenciando distintas estrategias en la conducta de fundamentalistas y chartistas), junto con la posibilidad de cambio de estrategias, entrada y salida del mercado, así como la consideración del “efecto contagio”, posibilitan

la obtención de series caóticas con comportamiento cualitativo bastante similar al observado en las series reales. Los modelos de Brock-Hommes y de Lux se pueden considerar como precursores en esta línea de trabajo, que aunque está en una fase inicial de desarrollo, permite la explicación del comportamiento de los mercados financieros, incluyendo sus posibles cracks y las denominadas burbujas especulativas, desde un punto de vista no contemplado hasta ahora por la Teoría Económica.

Para concluir, conviene señalar que es difícil todavía medir el impacto real de la teoría del caos en la Economía. Al margen de lo reciente de las aplicaciones en esta área, se manifiesta una cierta reticencia inicial a la utilización de dichas técnicas: el coste marginal podría ser superior al beneficio marginal obtenido por ello. Por ejemplo, es difícil aventurar si esta metodología mejorará en cierta medida la capacidad predictiva de los procesos económicos frente a las tradicionales técnicas econométricas; de hecho, se han llevado a cabo competiciones en este sentido, sin un resultado claro y concluyente. Quizá futuras aproximaciones que conjuguen ambos métodos sean capaces de lograrlo, aunque la principal contribución de la teoría del caos en la Economía posiblemente habrá que buscarla en la parcela teórica. Hemos comentado el replanteamiento que ha producido en temas como la racionalidad de los agentes y la hipótesis de mercado eficiente; el desarrollo futuro determinará el grado de relevancia de estas y nuevas aportaciones en la Teoría Económica.

Jesús Lizcano: Continuando dentro del campo general de las ciencias sociales, y en el contexto concreto de la comunicación o el lenguaje, va a intervenir a continuación **Dña. Manuela Romano Mozo**. *Manuela es Doctora en Filología Inglesa por la Universidad Complutense de Madrid y Profesora Titular en el Departamento de Filología Inglesa de la Universidad Autónoma de Madrid, en el que imparte clases de Lingüística e Histórica Inglesa y Semántica. Su investigación está centrada sobre todo en la aplicación de las Teorías Cognitivas y Morfodinámicas a diversos fenómenos lingüísticos de la historia de la lengua inglesa, así como a sus períodos más antiguos.*

## **LAS TEORÍAS DEL CAOS (TEORÍA DE LAS CATÁSTROFES) Y EL LENGUAJE**

En esta breve introducción a las aplicaciones de las Teorías del Caos al lenguaje me propongo dar una visión general sobre las similitudes que existen entre el comportamiento del lenguaje y el de los llamados sistemas complejos y dinámicos y también mostrar cómo las llamadas Teorías del Caos están ayudando a explicar el funcionamiento del lenguaje a través de sus premisas filosóficas y matemáticas.

Antes de pasar a describir algunas de las características más significativas de los sistemas complejos observables en el lenguaje me gustaría hacer hincapié en que las ideas básicas de las Teorías del Caos (sobre todo de la Teoría de las Catástrofes, modelo que más se ha aplicado en lingüística hasta el momento) sobre el lenguaje coinciden con las premisas de las Teorías Funcionales y Cognitivas frente a los modelos más formales y generativos.

Para comenzar hay que dejar claro que la *Lingüística Catastrofista* no existe como tal, es decir, no existen hasta ahora congresos o revistas especializadas con tal nombre, aunque sí existen numerosos trabajos y diversos grupos de investigación trabajando en el campo, como veremos a continuación. Lo que solemos encontrar hoy en lingüística son trabajos enmarcados dentro de otros modelos, como son las Teorías Funcionales y Cognitivas, que utilizan conceptos básicos de la Teoría de Catástrofes (*comportamiento sinérgico, atractor, arquetipo, catástrofe*, etc.), pero sin hacer referencia directa al modelo de Thom.

A pesar de lo que acabo de explicar, la ‘Lingüística Catastrofista’ tiene una antigüedad aproximada de 30 años, durante los cuales se ha desarrollado en cuatro importantes grupos de trabajo sin contar el de René Thom, todos de ellos europeos. Las aplicaciones de esta teoría al lenguaje no

deben, por tanto, sorprender. No en vano Thom (1972), adelantándose demasiado en el tiempo, definió la lingüística, junto con la biología, como la “disciplina morfodinámica por excelencia”. Tampoco es casualidad que el libro de Lorenz (1995) comience con una descripción del carácter caótico de la polisemia.



*Dña. Manuela Romano Mozo*

Entre los grupos de investigación en el campo cabe señalar, en primer lugar, el grupo de Jean Petitot en la Escuela de Semiótica de París. Petitot (1985, 1989, 1993) ha centrado sus investigaciones en las relaciones entre realidad y percepción, entre categorización y lenguaje y entre la Teoría de las Catástrofes, la Teoría Cognitiva y la Psicología Conexionista.

En Bremen, Wolfgang Wildgen (1982, 1983, 1990) ha publicado numerosos artículos y libros sobre Lingüística Catastrofista, sobre todo aplicando el concepto de *arquetipo* de Thom a la semántica.

En Aarhus, Per Aage Brandt (1989, 1992) se ha dedicado a estudiar desde 1987 lo que él denomina la modalidad, es decir, la dinámica interna del lenguaje o la evolución de aquellos fenómenos lingüísticos que cambian de forma gradual y no repentina o catastrófica.

Finalmente, tenemos que mencionar el grupo de trabajo dirigido por Enrique Bernárdez en el Departamento de Filología Inglesa de la Universidad Complutense de Madrid. Desde 1992 este grupo ha estado investigando la aplicación de la Teoría de las Catástrofes y de la Auto-Regulación o Sinérgica a diversos fenómenos de la lengua inglesa como son: el cambio lingüístico, el concepto de texto, la polisemia, la evolución de los verbos modales, la transitividad y la pragmática, entre otros aspectos (Bernárdez 1994, 1995, 1997, 1998,...; Marín 1999; Romano 1994, 2000).

Pasemos ahora brevemente a describir algunas de las similitudes más relevantes entre el comportamiento del lenguaje y el de los sistemas complejos.

Si adoptamos una visión realista y natural del lenguaje, esto es, intentamos explicar su uso real por parte de los hablantes, nos encontramos con que su comportamiento es muy similar al de los sistemas complejos. Así, podemos definir el lenguaje como un sistema *complejo, no-lineal, caótico, sensible a las condiciones iniciales, abierto, dinámico* y de carácter *fractal*.

En primer lugar, el uso del lenguaje es *complejo* por dos razones: porque está compuesto por diferentes subsistemas (fonológico, morfológico, sintáctico, semántico, pragmático) y, lo que es más, porque estos subsistemas son interdependientes, es decir, un cambio en cualquiera de ellos produce modificaciones, bien de forma directa o indirecta, en los demás. En definitiva, el lenguaje es complejo porque su comportamiento global emerge de la interacción de los subsistemas, no es una mera suma o producto de ellos.

En segundo lugar, el funcionamiento del lenguaje es *no-lineal* y *caótico* tanto desde el punto de vista sincrónico como diacrónico. Esto quiere decir que el uso de una determinada palabra, construcción, registro, etc. depende de una gran variedad de factores o parámetros y, por tanto, no se puede predecir en el sentido estándar o tradicional del término (en el sentido de relación directa entre causa y efecto). Así, no podemos predecir qué palabras, qué estructura sintáctica, qué variedad o dialecto ni qué registro exacto utilizará una determinada persona para emitir un determinado texto/mensaje en un contexto concreto, ni podemos predecir con precisión si se producirá un nuevo préstamo o cambio léxico en el año 2015. Tampoco es posible saber la correlación exacta de factores que se tienen que dar para que ocurra un determinado cambio ni describir las condiciones iniciales exactas en las que se produjo. Lo único que podemos predecir es que si ocurre una cierta correlación de los valores de  $x$  parámetros, es muy probable que ocurra dicho cambio. Es decir, sólo podemos predecir en términos probabilísticos.

En tercer lugar, el comportamiento del lenguaje es *sensible a las condiciones iniciales* en las que se produce. Podemos decir que existe una gramática universal que contiene características muy generales compartidas por todas las lenguas del mundo. Sin embargo, la individualidad de cada lengua se debe a unos factores iniciales relacionados con el entorno psico-social y cultural de cada una de ellas. Sin la inclusión de estos factores socio-culturales y pragmáticos no se entendería, por ejemplo, la diferente evolución de las lenguas inglesa y alemana. La primera, como sabemos, perdió casi por completo su flexión nominal y verbal y desarrolló un orden de palabras ‘fijo’ hacia el siglo XIII (características más orientadas hacia las necesidades del oyente), probablemente debido a las constantes y directas relaciones con otras lenguas; mientras que la segunda, con una historia socio-cultural muy distinta, sigue manteniendo hoy un sistema flexivo muy similar al de sus orígenes y un orden de palabras más ‘libre’, características más orientadas hacia los intereses del hablante.

Esta dependencia de las condiciones iniciales está íntimamente relacionada con otra característica de los sistemas complejos: su *carácter abierto*. En este sentido, el lenguaje se comporta como un sistema abierto, incluso ecológico, ya que está en continuo proceso de cambio y existe una interacción constante (un intercambio de energía) con su entorno cognitivo y social. En definitiva, el lenguaje es un sistema que se *auto-regula* constantemente o, en otras palabras, es *homeomórfico*.

El lenguaje, además, es *dinámico* por el mero hecho de que es un sistema que se ve afectado por el tiempo.

Finalmente, el lenguaje como sistema complejo es *fractal*, es decir, muestra similitudes formales en sus diversos niveles de análisis. Es precisamente el carácter fractal del lenguaje el que permite su funcionalidad, es decir, el que permite acceder a una cantidad de información infinita mediante un número finito de elementos. Así, las unidades básicas y simbólicas de la gramática de una lengua, las palabras, estarían formadas por la combinación de un polo fonológico y otro semántico, cuya combinación formaría palabras, cuya combinación formaría sintagmas, cuya combinación formaría oraciones cuya combinación formaría textos/discursos, que en definitiva no son más que la relación simbólica entre forma fonológica y significado.

Para concluir, podemos decir que las Teorías del Caos y en concreto la Teoría de las Catástrofes:

1. Muestran analogías entre fenómenos naturales, sociales y lingüísticos.
2. Permiten una aproximación más natural al lenguaje debido a que no necesitan realizar una idealización tan extrema del objeto de estudio como han hecho los modelos estructurales y generativos hasta ahora.
3. Permiten un estudio unitario del lenguaje, esto es, una aproximación global a sus aspectos formales, semánticos, textuales, pragmáticos, al cambio lingüístico, la variación sincrónica, etc.; aspectos que hasta hace poco se estudiaban desde subdisciplinas diferentes.
4. Son compatibles con los últimos descubrimientos sobre el funcionamiento del cerebro (Edelman 1992, Damasio 1994).
5. Son compatibles con las premisas de las Teorías Funcionales y Cognitivas que conciben el lenguaje como un proceso continuo, integrado en las demás capacidades cognitivas y sociales del ser humano (Johnson 1987, Lakoff 1987, Langacker 1987).

## REFERENCIAS CITADAS

- Bernárdez, Enrique (1994): "Can catastrophe theory provide adequate explanations for linguistic change?". En: *English Historical Linguistics*. F. Fernández et al. (eds.) Amsterdam: John Benjamins. 17-27.
- Bernárdez, Enrique (1995): *Teoría y Epistemología del Texto*. Madrid: Cátedra.
- Bernárdez, Enrique (1997): "A partial synergetic model of deagentivisation". *Journal of Quantitative Linguistics* 4: 53-66.
- Bernárdez, Enrique (1998): "Catástrophes, chaos and lexical semantics". En: *Lexical Semantics, Cognition and Philosophy*. B. Lewandowska-Tomaszczyk (ed.). Łódź: Łódź University Press.
- Brandt, Per Aage (1989): "The dynamics of modality: a catastrophe analysis". *RSSI* 9 1-2-3: 3-15.
- Brandt, Per Aage (1992): *La Charpante Modale du Sens. Pour une Sémiolinguistique Morphogénétique et Dynamique*. Aarhus: Aarhus University Press.
- Damasio, Antonio. R. (1994): *Descartes' Error: Emotion, Reason and the Human Brain*. Nueva York: Putnam.
- Edelman, Gerald M. (1992): *Bright Air, Brilliant Fire. On the Matter of the Mind*. Nueva York: Basic Books.
- Johnson, Mark (1987): *The Body in the Mind: The Bodily Basis of Meaning*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakoff, George (1987): *Women, Fire and Dangerous Things*. Chicago: Chicago University Press.
- Langacker, Ronald (1987): *Foundations of Cognitive Grammar, Vol.1: Theoretical Prerequisites*. Stanford: Stanford University Press.
- Lorenz, Edward (1995): *The Essence of Chaos*. Washington. University of Washington Press.
- Marín-Arrese, Juana (1999): "Conceptualization of events, semantic relations between constructions and typology: a catastrophe theoretic study of *get* and *be*". *Journal of English Studies* 1: 97-117.
- Petitot, Jean (1985): *Morphogénèse du Sens*. Paris: P.U.F.
- Petitot, Jean (1989): "On the linguistic import of Catastrophe Theory". *Semiotica* 74 3-4: 179-209.
- Petitot, Jean (1993): "Attractor syntax". En: *Mind as Motion*. T. Van Gelder & R.Port (eds.) Cambridge/MASS: The MIT Press.
- Romano, Manuela (1994): *El Léxico de la Amistad en Inglés Antiguo*. Tesis Doctoral. U.C.M.
- Romano, Manuela (2000): "A synergetic account of English modal verbs". *ATLANTIS*.
- Thom, René (1972): *Stabilité Structurale et Morphogénèse*. Paris: IntrÉditions (2° ed. 1977).
- Wildgen, Wolfgang (1982): *Catastrophe Theoretic Semantics*. Amsterdam: John Benjamins.
- Wildgen, Wolfgang (1983): "Modelling vagueness in catastrophe theoretic semantics". En: *Approaching Vagueness*. T.T. Ballmer & M. Pinkal (eds.). Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 317-360.
- Wildgen, Wolfgang (1990): "Basic principles of self-organisation in language". En: *Synergetics of Cognition*. H. Haken & M. Stadler (eds.). Berlín: Springer Verlag: 415-426.

Jesús Lizcano: La ponente que va a desarrollar seguidamente su presentación en este Seminario es **Dña. Manuela Romo Santos**. *Manuela es Profesora Titular del Área de Psicología Básica en la Universidad Autónoma de Madrid. Su labor investigadora se ha centrado en la psicología de la creatividad con numerosos trabajos de ensayo e investigación publicados sobre el tema. Es autora del libro: Psicología de la Creatividad. Ha sido organizadora del I Encuentro Estatal de Docentes e Investigadores Universitarios en Creatividad, y es coordinadora en esta Universidad Autónoma del Programa Interuniversitario de Doctorado en Creatividad Aplicada.*

## CAOS Y CREATIVIDAD

La psicología, ante las limitaciones de los enfoques mecanicistas para explicar su objeto tendrá que tomar insights prestados de la teoría del caos sobre la forma de representar y analizar sistemas complejos.

Hemos visto en las intervenciones de los anteriores ponentes cómo en tantas ocasiones nos movemos en el borde del caos y que los sistemas adaptativos complejos, cuando deben adaptarse a las acciones de otros funcionan con una lógica y estructura interna equilibrada entre el orden y el caos. Como dice Stuart Kauffman, las leyes que gobiernan la emergencia de nuestro mundo biológico y social están soportadas en el núcleo de las ciencias de la complejidad.



*Dña. Manuela Romo Santos*

Nos encontramos ante una nueva epistemología de la ciencia donde el modelo mecanicista instaurado por Newton y consagrado por Laplace ya no es suficiente para dar cuenta de todo lo conocido: incertidumbre en la física cuántica, caos en la conducta de muchos sistemas naturales.

La psicología científica, sin embargo, en su siglo y pico de vida ha buscado casi siempre una explicación mecanicista de sus procesos de estudio, basada en un principio de causalidad lineal. Como dicen Abraham y Gilgen en su libro *Chaos theory in Psychology* en psicología tratamos con la complejidad intentando reducir o neutralizar aspectos de ella.

Así ha sido en los dos grandes paradigmas. En el conductismo, la búsqueda de una causalidad eficiente y el análisis de la conducta en términos de las relaciones funcionales entre estímulos y respuestas, alejando de su estudio cualquier vestigio de lo mental -negando "el fantasma de la máquina"- y reduciendo la explicación del sujeto psicológico a una máquina de carne y hueso y sin conciencia.

Por su parte, la psicología cognitiva en su visión más reduccionista de la metáfora del ordenador dominante por los años 60 y 70, reproduce el modelo mecanicista aunque referido a lo mental, donde el sujeto humano es un procesador de información que sigue el flujo abajo-arriba y, por otra parte, incondicionado respecto a su complejo contexto de motivos, emociones, rasgos personales o condicionantes sociales.

Pero ya el padre de la psicología, Wilhen Wundt había depurado el objeto de la psicología desde su nacimiento. Haciendo una "química de la mente" encargó a la psicología el estudio de los átomos mentales, de los procesos mentales más simples y más mecánicos de la percepción o la memoria. Instaurándose así, por cierto, una disciplina aplicada de gran trascendencia: la psicofísica.

La psicología científica, desde su nacimiento, ha tenido el objetivo de exorcizar el fantasma de la máquina.

Pero en todos estos esfuerzos por ordenar y mecanizar el estudio de lo psicológico han quedado parcelas indómitas y voy a referirme a la que considero como el último e inexpugnable reducto del caos que una psicología determinista no se puede permitir: la creatividad.

Estamos hablando de la dimensión de la conducta humana más compleja e impredecible. Aquella que se define en términos de la producción de ideas -materializadas en aparatos, cuadros, sonetos, teorías filosóficas o científicas, exquisiteces gastronómicas o spots publicitarios- que son nuevas y valoradas por un contexto.

Hablamos de impredecibilidad porque, como es obvio, por su propia naturaleza la creatividad es impredecible. O, mejor dicho, el producto. Si pudiera predecirse, dejaría de ser creativo. ¿Cómo predecir la revolución de las vanguardias, el genio de Leonardo o la mecánica newtoniana? Tomando prestada de Margaret Boden la distinción entre h-creatividad o creatividad histórica: la de aquellos productos que han trascendido y p-creatividad o creatividad psicológica: la creatividad personal en la vida cotidiana, es evidente que la h-creatividad es, de todo punto, impredecible. Estamos hablando de una revolución en el contexto que sea -la pintura, la física o la música-; algo que no se desprende de los principios organizadores del sistema previo sino que comporta un nuevo sistema simbólico, en términos computacionales: un nuevo espacio conceptual. Es una forma nueva de organizar la disciplina con nuevas reglas que no se derivan de las anteriores. Por eso es impredecible o h-creativo.

Con la aparición de las vanguardias artísticas -donde el desarrollo de la fotografía tuvo gran influencia- el arte nunca más va a tener el objetivo de ser reproducción fiel de la realidad. Pero ¿quién puede predecir la aparición de un movimiento pictórico que rompe de forma absoluta con la perspectiva renacentista, que descompone las figuras en elementos geométricos y donde a las personas se las representa simultáneamente de frente y de perfil?.

Hablamos en la h-creatividad extrema de un nuevo paradigma o incluso, de una nueva disciplina. La trascendencia que tuvo la teoría darwinista fue tal que no solo cambió el paradigma de la historia natural de su tiempo sino que afectó a muchas otras disciplinas -antropología, geología, paleontología y psicología- pero, sobre todo, modificó la percepción que, desde entonces, el ser humano tiene de sí mismo: "un nuevo punto de vista", dice Howard Gruber en su valioso libro *Darwin sobre el hombre: Un estudio psicológico de la creatividad científica*.

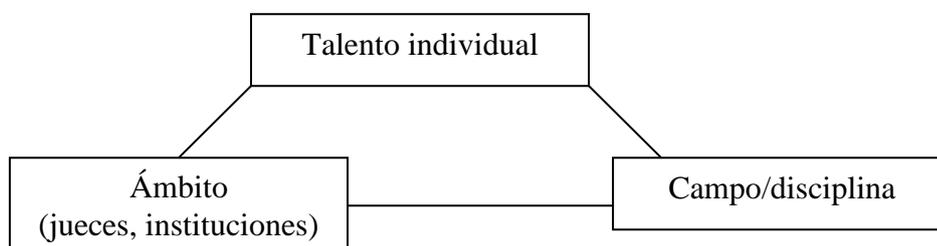
Y, al igual que hizo Darwin, el creador en su producto lo que ha hecho ha sido encontrar una estructura oculta en un conjunto de datos desordenados. Paul Vernon, otro psicólogo de la creatividad, habla de "una maravillosa capacidad de encontrar orden donde en ningún modo aparece".

Aquí tenemos otra de las formas en la que el caos tiene que ver con la creatividad. En este caso, caos en el sentido de desorden. Pensemos en Kepler con el conjunto de datos deslabazados sobre los movimientos planetarios proporcionado por las observaciones de Tico Brahe, o quizás en Picasso, organizando y dando forma en un mural al conjunto de bocetos para el Guernica.

Sin embargo, si cabe predicción en la p-creatividad. Si puedo arriesgarme a decir que el próximo libro de Javier Marías o el próximo cuadro de Antonio López serán originales y valiosos; y también la próxima campaña publicitaria de Fulano que ha tenido ya varios spots premiados o los canapés con que me va a sorprender mi amiga Mengana en la fiesta del sábado, pues siempre nos sorprende con su creatividad culinaria.

Es "la gente que siempre nos sorprende", la gente creativa la que hace que podamos hablar de creatividad en la conducta como una condición estable y, hasta cierto punto, predecible. Como vamos a ver, empezamos a conocer las condiciones iniciales y las reglas que intervienen en la creatividad humana. Empezamos a conocerlas y nos permiten hablar de una disciplina científica de la creatividad.

Es cierto, no podemos predecir la h-creatividad, porque, además el que una cosa sea diagnosticada como h-creativa no depende del autor sino del ámbito. Por eso es tan importante la sociología de la creatividad. Como ha dicho Csikszentmihalyi, la creatividad se encuentra en la dialéctica de tres nodos: individuo, campo o disciplina y ámbito o conjunto de expertos que deciden en la disciplina. Pero el reconocimiento del ámbito, que va a determinar que un producto pase a formar parte de una disciplina puede venir mucho después de la muerte del individuo.



El triángulo de la creatividad, según Csikszentmihalyi (1998)

Sin embargo, a efectos de su estudio científico psicológico, h-creatividad y p-creatividad son lo mismo. Y ese es el argumento para una ciencia de la creatividad. Pero la visión romántica siempre lo ha negado, con un extremado celo porque la creatividad sea guardada en manos de sus propietarios, por salvaguardar el misterio del genio, como si sacarlo a la luz fuera a acabar con él, a hacerle desintegrarse.

Pero aún cuando la posibilidad de predicción de las obras maestras nos esté vedada para siempre, eso no condena el estudio de la creatividad al terreno de la mitología. El valor de la ciencia no está en predecir sino en explicar. "La ciencia no es profecía" dice Margaret Boden. Lo importante no es saber qué ocurrirá sino saber cómo ocurren las cosas.

Pero, con absoluta honestidad, debemos admitir la impredecibilidad en la creatividad. Al margen de que pueda deberse o no a un funcionamiento de la mente humana como un sistema caótico en este cometido -cosa que, por ahora, no podemos confirmar- lo cierto es que existe un desconocimiento relativo de las condiciones iniciales y de las reglas sobre la creatividad humana.

La complicación de las condiciones iniciales es extrema, además de que no sabemos exactamente cuales son las condiciones relevantes y el papel diferencial que juegan. Por otra parte, somos ignorantes todavía de muchos principios involucrados en el trabajo creador en contextos particulares. Sabemos que se conjugan las habilidades propias de la creatividad, es decir, los heurísticos que intervienen en el pensamiento creador -la flexibilidad en el pensamiento, el uso de analogías, la habilidad para detectar problemas, etc,...- con las habilidades de dominio -las capacidades específicas del campo donde trabaja el creador-. Así lo recogen modelos componenciales de la creatividad como el de Theresa Amabile. Sin embargo los pesos relativos de unas y otras y la manera en que se conjugan para que el pensamiento alcance resultados creativos es todavía un misterio. Por mi parte, en mi libro *Psicología de la creatividad* he intentado sistematizar ese conjunto de reglas y de condiciones de partida en lo que he llamado

#### LOS SIETE INGREDIENTES DE LA CREATIVIDAD:

1. Habilidades de “infraestructura”
2. Conocimiento
3. Destrezas
4. 10 años o más de intensivo trabajo inicial
5. Características personales de autoconfianza, fuerza del yo y ambición
6. Motivación intrínseca y de logro
7. Y... ¡un poco de suerte!

Está claro que todos estos ingredientes estaban presentes en aquellas personas que han hecho alguna aportación importante en no importa qué área, al progreso de la humanidad. Algunos añadirían quizá otros factores psicológicos; lo que puedo decir es que son todos los que están, pero lo que no puedo decir es la forma en que tiene lugar la contribución de cada uno de ellos. Quizás algún día algún modelo de la teoría del caos pueda ayudarnos en esta misión.

Por cierto, que un elemento cuya contribución nadie discute es el azar. Está claro que con esto ya estaría garantizada la impredecibilidad. Pero, sin embargo, no debemos identificar este azar con aleatoriedad. En otras palabras, se trata de un "azar domesticado" relativamente.

Estamos hablando, por ejemplo, del azar de haber nacido en una familia de profesionales, librepensadora, cosa que se muestra, con gran frecuencia, en las familias de los premios Nobel. Familias que alimentan la motivación del futuro creador hacia un campo científico o del arte y que facilitan las condiciones favorecedoras para ello.

Hablamos también del azar de tener alguien al lado en los duros momentos -mejor años- de trabajo en que el creador se halla involucrado en un proyecto de gran alcance. Alguien que le quiere y conoce su trabajo. Es lo que Howard Gardner en sus 7 estudios de caso sobre grandes creadores de la era moderna ha denominado "apoyo cognitivo y afectivo en el momento del avance"

Estamos hablando de la suerte de estar el lugar apropiado en el momento oportuno, léase, por ejemplo, la Florencia del quattrocento o el París de principios de siglo. Pero, hasta esta suerte era buscada... No es casualidad que Picasso trabaje en París. El momento oportuno es también la crisis de un paradigma que convierte en revolucionarias y h-creativas las aportaciones que en un periodo de ciencia normal no convertirían en genio a su autor.

Estamos hablando del azar en muchos descubrimientos aleatorios. Lo que se ha llamado "serendipia", como reza el libro de Royston Roberts. Citemos, entre las decenas que menciona este autor, el de Fleming, el más paradigmático. Fue un azar el que aquel cultivo de estafilococos se contaminase con aquel hongo pero lo que no fue un azar -y, por eso hablo de azar domesticado- fué

que Fleming reparase en lo que había sucedido con aquella placa y supiera interpretarlo. ¿Tendríamos penicilina si aquel azar se hubiera producido en el laboratorio de otro bacteriólogo?

Como dijo Pasteur "la suerte favorece solo a la mente preparada". Fue casualidad que aquel hongo se instalara en el cultivo de Fleming pero no es azar que solo sepan sacar provecho de estas serendipias las personas verdaderamente creativas. Dijo Picasso "Yo no creo en las musas, pero por si acaso bajan, prefiero que me encuentren trabajando".

El azar tiene un papel importante, pero es imposible explicar la creatividad en términos del azar. Para mí es el séptimo ingrediente y solo cuenta cuando están presentes los otros 6.

Quiero terminar con una analogía entre la evolución biológica y la evolución cultural entendida como la acumulación de los productos de la creatividad humana.

Como dice Paul C. Davies "la naturaleza auténticamente creativa del caos emerge de lleno cuando éste se combina con otros principios". En el progreso biológico el caos, las variaciones al azar se combinan con los principios de la selección natural para explicar la evolución de la vida en la tierra: *azar y necesidad* como el título del libro de Monod.

En el caso de la evolución cultural, la teoría evolucionista de la creatividad propuesta por Donald Campbellen una analogía con la teoría darwiniana combina los principios de variación ciega: aparición de nuevas ideas en los ámbitos de la ciencia, la tecnología o las artes y de retención selectiva: el criterio de necesidad determinado por el trabajo selectivo de los ámbitos relevantes que decidirán sobre los productos que han de convertirse en h-creativos. Tales productos son los "memes o unidades de información cultural que habrán de transmitirse a través de las generaciones.

Como vemos, hay muchas implicaciones de la teoría del caos para la explicación de la creatividad humana pero en un sentido epistemológico yo destacaría que es el ámbito donde la psicología más claramente ha tenido que rebasar los límites de ese determinismo mecanicista importado de la física. El estudio de la creatividad nos demuestra que explicar la mente humana no significa buscar el fantasma de la máquina porque afortunadamente, no hay tal máquina.

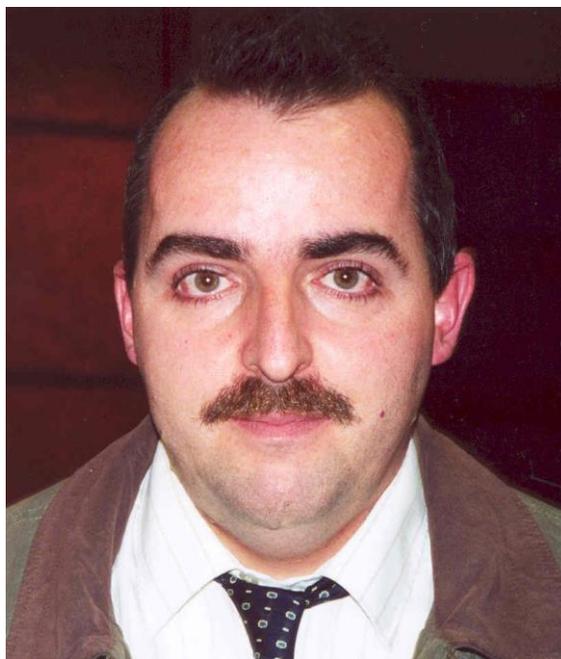
Jesús Lizcano: El ponente que va a desarrollar la última intervención en este Seminario multidisciplinar, perteneciente igualmente al campo de las ciencias sociales, y más concretamente al área de la Educación, es **D. Agustín de la Herrán Gascón**. *Agustín es precisamente Doctor en Educación, así como Magister Universitario en Psicología Escolar. Ha obtenido Premio Nacional de Licenciatura, y también Premio Extraordinario de Doctorado. Viene desempeñando sus tareas docentes en el Departamento de Didáctica y Teoría de la Educación. Cabe señalar, por otra parte, que ha publicado varios libros, así como un buen número de artículos, sobre educación, la conciencia, también sobre filosofía, etc.*

## **DIALÉCTICA CAOS-CONCIENCIA. IMPLICACIONES DIDÁCTICAS Y FORMATIVAS**

### **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo se presenta un *método de interpretación global [u holística]* de lo caótico en la formación, la educación y la didáctica, mediante lo que podría llamarse *síntesis evolutiva de la realidad*. Se aspira a que, mediante una propuesta de cambio de óptica, quede mejor habilitado este *campo explicativo* para las aspiraciones educativas y de ayuda a la persona en general.

Casi todo lo relativo a la *formación* responde a la “no predicción de probabilidades” (Prigogine). Casi todo lo humano es así, obedece a esto. Por tanto, es susceptible de análisis a través de las premisas teóricas de los *sistemas caóticos* <sup>(1)</sup>. Y, sin embargo, al no estudiarse movimientos, formas, estructuras..., sino al ser humano, no podemos concluir con *ecuaciones* o *números* <sup>(2)</sup>. Ni sería bueno hacerlo. Es necesaria su *blandura*. Su *solidificación* sería empobrecedora. Y no sería posible, porque median en *unicidad* el sistema cerebro-mente y la intencionalidad formativa.



D. Agustín de la Herrán Gascón

Además, hay otros intereses que diferencian a la Didáctica del sector científico *duro*: Por una parte, su *explicatividad* es en función de la *normatividad* y la *aplicación reflexiva* (más tecnológica, interpretativa, socrítica y/o complejo-evolutiva). Por otra, el interés determinista por *predecir* no es tan importante, quedando casi solapado por el de ofrecer una *ayuda ajustada* al alumno. Finalmente, la complejidad del trabajo docente comprende formas más amplias de investigación e innovación, más allá del necesitar *estar al tanto del último descubrimiento generalizable*.

Para el desarrollo del tema, que sólo pretende *aproximarse para habilitar*, presentaremos una serie de *premisas epistemológicas* y unas cuantas aplicaciones generales y didácticas.

### ¿CAMBIO EPISTEMOLÓGICO PROFUNDO?

Para M. Almendro (2000), la percepción científica clásica entrega el testigo cuando comienzan a fundamentarse las concepciones asociadas al caos (J. Gleick, 1994, p. 11, adaptado). F. Borondo ha expresado que la Teoría del Caos constituye para la Física una tercera revolución, tras la Teoría de la Relatividad y la Mecánica Cuántica. Desde una perspectiva amplia sostengo que, con la acomodación del *caos* a los diferentes ámbitos científicos, ha habido, sí, una “entrega de testigo” o incluso una “revolución epistemológica”, pero no una modificación fundamental. Para la ciencia, el *caos* podría ser una *treta* de la naturaleza para *madurar*, no sólo para *conocer*. ¿Qué se ha verificado con el *estudio del caos*? Un incremento de complejidad, un cambio de *índoles de contenidos* de estudio, un viraje hacia enfoques más cualitativos, un motivo más de análisis *sustantivo*, pero no una permuta *verbal*. Continúan el *determinismo* de fondo, el culto al conocimiento fragmentario, el estatus multidisciplinar predominante, el normal desgajamiento *ciencia-conciencia* en el científico, la escasez de *norte*

<sup>(1)</sup> Aquéllos en los que los puntos de equilibrio son inestables.

<sup>(2)</sup> Sigue siendo válido aquello de K. Jaspers (1996), de que “con los números se puede probar todo” (p. 32).

*trascendente* o de *sentido evolutivo*, y, por lo general, la *ausencia de duda* y el *exceso de quietismo proxémico*. La sociedad demanda en silencio otros cambios en la ciencia y los científicos: cambios de profundidad. En lo que a la superficie (acciones y objetos) se refiere, por mucho que avance el conocimiento científico, siempre habrá *caos* por explicar. Lo no-lineal, lo no-ordenado, lo no-simétrico o lo autoorganizable desde la no-predicción se hace fuente de orden y de evolución, y más *caos-matriz* aparentemente no-determinado, dándose aquello que Eduardo Galeano decía para la *utopía*: “caminas dos pasos y la realidad se aleja dos pasos”. También debemos prevenir contra una dictadura adelantable del *indeterminismo*, capaz de incidir en los diversos planteamientos como otra clase de *metadeterminismo*.

## UN MODELO COMPRENSIVO PARA LA EDUCACIÓN.

Desde el punto de vista de la *formación humana y didáctica*, no es del todo interesante *fragmentar*, centrarse sólo en lo *caótico* (o en lo *no-caótico*). De hecho, la tendencia de hecho es justo la contraria: *armonizar* e *integrar* su persona, y relacionarla con su entorno y circunstancias desde su conciencia, ampliándose y profundizándose hacia la *universalidad* desde la síntesis y la complejidad. Por ello, quizá fuera clarificador normalizar *megasíntesis*, utilizables por todas las ciencias, y útiles para la expansión de las conciencias desde la formación: “naturaleza mental” (Eddington), “orden implicado” (Bohm), “evolución humana” (Teilhard), “tao” (Capra), “autoorganización evolutiva”, “universalidad”, “noogénesis”, “autoconciencia”, etc. Todos éstos y otros inferiores o relativos, podrían considerarse potenciales *atractores* <sup>(3)</sup> *envolventes* de *conocimiento formativo*, capaz, además, de *sintonizar* mejor con el fenómeno, pero con todo el fenómeno. La realidad no es parcial o fragmentaria, ni lo ha sido nunca. O casi mejor, lo es y no lo es a la vez. Si el sistema comprensivo se sitúa en un referente sólo-dual (caos–no-caos, determinación-indeterminación, etc.), se aprehenderá parcialmente.

Desde este punto de vista *complementario, dinámico y orientado*, lo *caótico* aparecería integrado en lo regular, en el marco de un *principio de unicidad universal*. Una conceptualización dialéctica de *caos*, en consecuencia, va más allá de las dualidades clásicamente entendidas, porque ni siquiera se centra en el propio concepto-fenómeno del *caos* o del orden como facetas de realidad aislables o absolutas. En consecuencia, si el sistema de referencia se coloca en la realidad misma, no tenemos más remedio que identificarnos con *terceros elementos* (guiones de en medio, parejas envolventes), que tornan a ser *uno*, en mayor medida comprendido, más sencillamente *predecible, comprensible, explicable y útil*.

Cuando la referencia del conocimiento se sitúa en algo equivalente a la posible *evolución* <sup>(4)</sup>, el *caos* motivado por la *segunda ley de la termodinámica*, pide a gritos la *conciencia*, que mediante la *ley de la complejidad-conciencia teilhardiana*, otorga a la trascendencia humana un *norte aclarador*, un sentido constructivo y una gran posibilidad explicativa del *caos* mismo. En efecto, los *sistemas integrados* pueden dinamizarse desde *atractores oscilantes y extraños*, pero también *evolutivos*. Dependiendo de su carácter, éstos pueden ser interpretados como *negatividad positivizable* (“irreversibilidad”, de Teilhard de Chardin) o como *fase de un ciclo* (“estructuras disipativas”, de Prigogine)<sup>(5)</sup>. Si, como aquellos autores, desarrollamos paralelamente un alto compromiso con la existencia, resultará que podemos interpretar la realidad de otras formas a las habituales, algo de incalculable valor para la formación, cuyo optimismo subyacente convendría promover y normalizar en la conciencia ordinaria.

---

<sup>(3)</sup> Entiéndase *atractor* como *punto que mueve hacia sí a todos los demás elementos y a los comportamientos del mismo sistema integrado*: subsistemas de caos y de no-caos.

<sup>(4)</sup> Sobre la *evolución biológica* (Darwin), desde la *evolución del universo* (Darwin), y hacia la *evolución de la conciencia* (Teilhard de Chardin).

<sup>(5)</sup> Esta hipótesis expresa, en palabras de M. Almendro (2000), una nueva forma de entender el desorden, desde la definición de un marco interpretativo amplio.

La propia *conciencia* se construye desde relaciones y síntesis. Ésta es la hipótesis referencial: aprendiendo a integrar síntesis de máxima potencia, capaces de orientar pares conceptuales de manera coherente para el desempeño eficiente del conocimiento y lo que desde él se construye, se acrecienta la *conciencia*, desde la que los factores o instrumentos de la realidad (como puede ser el *caos*), se interiorizan mejor, y se compensan más eficientemente.

Y al contrario: todo planteamiento *dual simplifica* la realidad. Por ello asocia una incapacidad inherente para comprender la realidad en su complejidad, porque se aleja de la *naturaleza íntima* (síntesis) de los fenómenos a los que se refiere, y una capacidad válida para aprehenderlos superficial, parcial o fragmentariamente, y para identificar (apegar) al observador con esa parte. Interesa para la formación didáctica (por ejemplo *universitaria*) entrenarse en la *superación de dualidades*, para acceder a sistemas comprensivos más capaces. El cerebro y su estructura biocognoscitiva están preparados para interpretar no-dualmente la realidad, aunque los prejuicios humanos y la educación para la parcialidad no ayuden. Si esto no se pretende desde una *educación para la complejidad*, la *enseñanza* no estará a la altura de la potencialidad mental del ser humano. Esteremos, en sentido estricto, *desperdiándonos*.

### **SUPERACIÓN DE DUALIDADES.**

Pongamos algunos ejemplos de superación de dualidades, relacionables con el *caos*:

- a) Los sistemas simples pueden expresarse de forma caótica (compleja *a priori*).
- b) *Orden y desorden* podrían ser apreciaciones *a priori* y relativas.
- c) Algunas regularidades pueden ser la antesala de catástrofes.
- d) En toda la realidad hay un orden subyacente. Por tanto, lo hay en los *sistemas caóticos*, pero también en los *azarosos*. Otra cosa es que no se haya *ecuacionalizado* todavía.
- e) Los *sistemas integrados* (caos-no-caos), y por tanto sus subsistemas caóticos, contienen un orden subyacente, que a su vez puede actuar como expresión caótica de un sistema de orden superior, y así sucesivamente.
- f) Entre *caos social* y *complejidad de conciencia* existe una tensión dinámica.

Desde un punto de vista humano, puede ser *formativo general* considerar las siguientes polaridades superadas:

- a) No se avanza rectilíneamente, pero sí irreversiblemente.
- b) Los procesos de *inestabilidad* o *desorganización* pueden ser crisis transformadoras.
- c) La destrucción de la vida, es sustrato de vida siguiente.
- d) El sufrimiento elaborado puede actuar como caldo de cultivo del desarrollo (global) y madurez (individual).
- g) Las limitaciones e imprecisiones temporarias, son requisitos para otorgar sentido a la vida.
- h) Las muertes, pueden entenderse como realidades estadísticas y *evolutivas*, y pasos hacia la *noosferización*: por tanto, sólo hay muerte para el *ego*. Para la *conciencia*, no hay un término.
- i) La *entropía social*, es apoyatura para la emergencia de *conciencia* <sup>(6)</sup> *colectiva* contrarrestadora.
- j) Los deterioros, condiciones de orden.
- k) El caos cognoscitivo, posible instrumento de evolución del conocimiento.
- l) La matemática de la naturaleza, *impresión* de un orden implicado, que abarcaría desde los comportamientos de los sistemas azarosos, los caóticos, lo *causal ordenado* y lo *acausal ordenado* (léanse los procesos *sincrónicos*, investigados por Jung, Peat, etc.).

---

<sup>(6)</sup> Capacidad-consistencia de la evolución humana, *sustantiva*, *adjetiva* y *verbal* de ella, orientada siempre a la *posible evolución humana*.

## ÁMBITOS DE INTERPRETACIÓN FORMATIVA ASIMILABLES AL CAOS.

Desde el punto de vista de la formación humana, algunos aspectos vinculados con el *caos* son así mismo explicables desde una *complejidad* englobadora, desde cuya óptica pueden adquirir nuevos sentidos desde la síntesis, como ocurría con las dualidades anteriores:

- a) La sensibilidad puede ser entendida como *ruptura con lo lineal* (M. Almendro, 2000), es básica para la emocionalidad (Mc Lean, Goleman) y puede ser *lecho* de creatividad.
- b) Los errores en el funcionamiento del cerebro, posibles raíces de *comportamientos creativos*.
- c) Los métodos poderosos de enseñar, losa para el aprendizaje *original*.
- d) La *enseñanza inacabada*, invitación a la compleción creativa del estudiante.
- e) Los errores discentes y docentes, referentes de *desempeoramiento*.
- f) Las síntesis creativas (inducciones espontáneas, eureka, *awareness*, *kairos*, etc.), logros inesperados.
- g) Las síntesis de altos estados de conciencia (*satoris*, *samadh*, *zikh*, *éxtasis*, etc.), aperturas a otros estados del ser.
- h) El aprendizaje por descubrimiento puede ser inicio de encuentro (*subjetivamente*) *creativo* y puerta de elaboraciones abiertas indefinidas.
- i) La enseñanza por descubrimiento, la puerta de una creatividad didácticamente organizada.
- j) El *inconsciente*, clave para el equilibrio personal y la madurez personal y colectiva.
- k) El *procesamiento inconsciente de la información*, matriz de conocimiento.
- l) La *comunicación inconsciente-consciente e inconsciente-inconsciente* verbal y no-verbal, referente explicativo de lo que ocurre dentro y fuera del aula, más allá de las pretensiones formativas.
- m) Los olvidos, posibilidad de clarificación (defensivo-constructiva).
- n) El “residuo de indeterminación técnica” (M. Fernández Pérez, 1971), condición de *posible desarrollo artístico* de la actuación docente.
- o) La duda, uno de los soportes más fiables del conocimiento (A. de la Herrán, 1998).
- p) El “fracaso escolar”, *baliza* para una reorganización *positivadora*.
- q) La *innovación educativa* (sobre todo como *proceso deliberativo*), un proyecto no determinable.
- r) Los *conflictos*, momentos privilegiados para el aprendizaje.
- s) Las dinámicas *sólo-permisivas*, causa de disgregación.
- t) Las *regularidades excesivas* orígenes de sistemas obsesivos y ansiedad.
- u) La *autorregulación cooperativa de los grupos*, el esquema ideal de funcionamiento.
- v) La enseñanza no directiva, una *inductora de autoorganización*.
- w) Un sistema disciplinario rígido, un *tapón* para la autonomía.
- x) La puerta cerrada a lo *indeterminable*, un *lastre* para la *autopoiesis* del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Almendro, M. (2000): El Significado de las Teorías del Caos en Psicoterapia. Tesis doctoral. Facultad de Psicología. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid.
- Fernández Pérez, M. (1971): El Residuo de Indeterminación Técnica de Educación. Revista Española de Pedagogía (115), 275-295.
- Gleick, J. (1994): Caos. Barcelona: Editorial Seix Barral, S.A.
- Guadarrama, P. y Tussel, E. (1986): El pensamiento filosófico de Enrique José Varona. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales.
- Herrán Gascón, A. de la (1998): La Duda como Principio de Enseñanza. Tendencias Pedagógicas, I (nº extraordinario: "La Formación de los Maestros en los Países de la Unión Europea"), 109-118.
- Jaspers, K. (1996): Psicopatología general. México: Editorial Fondo de Cultura Económica, S.A. (e.o.: 1913).

**Jesús Lizcano:** Ha llegado el momento de la finalización de este Seminario-debate. En él hemos tenido ocasión de comprobar el carácter eminentemente multidisciplinar de las *Teorías del Caos y los Sistemas complejos*, y hemos tenido ocasión, una vez más, de intercambiar ideas, experiencias y conocimientos -y en definitiva de comunicarnos-, estudiantes, profesores e investigadores de tantas y tan variadas disciplinas académicas como las que hemos asistido a este Seminario, y de tan diversas zonas geográficas. Deseamos que haya merecido la pena vuestra asistencia al Seminario, sobre todo a los que habéis hecho el esfuerzo de venir de más lejos, y esperamos seguir viéndonos en los próximos *Seminarios-debates multidisciplinares*.