

# EL ORDEN EN EL CAOS: UNA AMPLIACION DEL MECANICISMO

F. Javier Massa Rincón  
Dpto. de Filosofía Teorética  
U. de Barcelona

## 1. *Introducción*

"Tradicionalmente los procesos fundamentales de la naturaleza eran considerados como deterministas, predictivos y reversibles, mientras aquellos procesos con irreversibilidad o aleatoriedad se consideraban como marginales, incluso como ilusiones subjetivas. Hoy vamos poco a poco reconociendo cuán esencial es el papel del azar u de la irreversibilidad en cualquier nivel de descripción, desde el de las partículas elementales hasta el de la cosmología."<sup>1</sup>

Tal es el cambio de paradigma científico que anuncia la teoría del caos. En contra de lo que pensaba la mecánica clásica, la realidad no se rige por leyes estrictamente deterministas. El conocimiento de las leyes de la física, junto al de las condiciones instantáneas que definen sus sistemas, no es suficiente para predecir su evolución. La caología cuestiona la visión estática (y reversible) de la dinámica newtoniana y, en su lugar, propone una cosmovisión en la que el determinismo se desvincula de la predicción.

La teoría del caos ofrece una nueva comprensión de la relación entre orden y desorden, azar y necesidad. Para algunos, constituye la superación del reduccionismo mecanicista y el fin de la metáfora de la máquina cósmica. A lo largo de las siguientes páginas intentaremos mostrar que, por el contrario, esta teoría se presenta

---

<sup>1</sup> PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., *La nueva alianza*, Alianza Editorial, Madrid, 1983, p. 2.

como una reformulación más sofisticada del ideal omnisciente de la ciencia clásica.

## 2. El *paradigma mecanicista*

Prigogine y Stengers señalan que lo singular de la ciencia moderna es el "encuentro entre la técnica y la teoría, la alianza sistemática entre la ambición de modelar el mundo y la de comprenderlo"<sup>2</sup>. La antigüedad había distinguido claramente entre pensamiento teórico y actividad técnica. La práctica ingenieril de los artesanos mecánicos no consistía en un saber "racional", sino en el ejercicio de la astucia y el artificio. No se trataba tanto de conocer los procesos naturales cuanto de "engañar" a la naturaleza. Con sus artefactos, los mecánicos aspiraban a obrar prodigios, a maquinar efectos extraños en el orden natural de las cosas. Pero según la física aristotélica, el saber práctico (rudimentariamente racional, a lo sumo) de las *technai* no era, en ningún caso, transferible al mundo de la naturaleza. Tanto el Estagirita como Platón habían contrapuesto *theoria* a *techné*, otorgando sólo a la primera un carácter racional y el rango de *episteme*. Al respecto, el profesor Medina observa que "la marginación intelectual de la técnica se debe... al tradicional primado filosófico del conocimiento teórico sobre el saber operativo, de las elaboraciones teóricas como ideal del conocimiento. Se identifica sabiduría y, en particular la ciencia, con la teoría"<sup>3</sup>.

Esta separación, metateórica o filosófica, entre el dominio técnico y el discurso científico ha perdurado hasta nuestros días. la concepción estándar de la ciencia todavía ve en las técnicas (o en las tecnologías) meras aplicaciones de conocimientos teóricos previos. Sin embargo, puede decirse que ya en el Renacimiento se inaugura la ciencia moderna, gracias a la teorización de las

---

<sup>2</sup> PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., *op. cit.*, pp. 43-44.

<sup>3</sup> MEDINA, M., *De la techné a la tecnología*, Tirant lo Blanch, Valencia, 1985, p. 5.

técnicas de los ingenieros<sup>4</sup>; y con ella, la alianza descrita por Prigogine y Stengers.

De acuerdo con la denominada sociología del conocimiento científico, la descripción científica del mundo y la ciencia misma son construcciones sociales. No es nuestro propósito entrar aquí en estos detalles. Tan solo destacaremos que los desarrollos teóricos de los ingenieros renacentistas no se limitaron a la matematización de la mecánica. La actividad científica comenzó a matematizar la realidad misma. Galileo dió el primer paso declarando solemnemente que el universo está escrito en caracteres matemáticos y geométricos, y atendiendo únicamente a los aspectos cuantitativos de la materia (i.e., sus propiedades primarias). "Todo sucedió - escribe Thuillier- como si los mecanismos concebidos y fabricados por el hombre hubiesen permitido concebir.. que la propia naturaleza se comportaba con un rigor mecánico"<sup>5</sup>. El mito epistemológico de la máquina, nacido en el mundo de la producción, había de proporcionar inteligibilidad en el mundo de la naturaleza.

El mundo natural es, pues, susceptible de ser analizado, explicado y re-construido como una máquina. El universo es equiparado a un mecanismo de relojería. Ahora bien, Prigogine y Stengers señalan que "el reloj es un mecanismo *construido*, sometido a una racionalidad que le es exterior, a un plan que sus engranajes realizan de manera ciega. El mundo reloj constituye una metáfora que remite al Dios Relojero, ordenador racional de una naturaleza autómatas"<sup>6</sup>.

La naturaleza mecanizada por la ciencia newtoniana pudo ser del agrado de los teólogos, para quienes el orden del mundo debía manifestar la omnipotencia divina; y al mismo tiempo, satisfacer a los físicos, preocupados por la matematización de los fenómenos naturales. En este sentido, Prigogine y Stengers afirman que la

---

<sup>4</sup> MEDINA, M., *op. cit.*, p. 119.

<sup>5</sup> THUILLIER, P., *De Arquímedes a Einstein*, Alianza Editorial, Madrid, 1990, p. 192.

<sup>6</sup> PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., *op. cit.*, p. 49.

ciencia clásica nace en una cultura "que dominaba la alianza entre el hombre, situado en la bisagra entre el orden divino y el orden natural, y el Dios legislador racional e inteligible, arquitecto soberano que habíamos concebido a nuestra imagen"<sup>7</sup>. Esta alianza entre filosofía natural (o ciencia) y religión ha presidido, según estos autores, el pensamiento científico moderno.

Con independencia de la plausibilidad que quiera otorgarse a esta tesis<sup>8</sup>, es indudable que Galileo, Kepler, Descartes, Newton y Laplace vieron la naturaleza como la vería un relojero. El mecanicismo considera que los sistemas naturales son como mecanismos complejos de relojería, compuestos de palancas, resortes y engranajes. Así, los sistemas del mundo natural son reducibles a ciertos componentes atómicos o elementales, que se combinan con mayor o menor complejidad. La tarea de la ciencia consiste precisamente en desentrañar los elementos simples de la complejidad natural. Se trata de descubrir las leyes que operan en la realidad. El desciframiento de la legalidad oculta en la naturaleza debe ser posible, si se atiende a lo simple y matematizable, es decir, si se desciende a lo que podríamos denominar el nivel fundamental de descripción. El diálogo experimental con la naturaleza, que la física lleva a cabo sistemáticamente, se basa en ese supuesto: se puede reducir el comportamiento del mundo natural a la simplicidad de un conjunto de leyes universales. En la medida en que sea así, la naturaleza responderá monótonamente cada vez que sea interrogada. Este reduccionismo mecanicista condujo a la concepción del universo como un gran sistema dinámico, cuyos procesos no son otra cosa que trayectorias mecánicas.

Toda descripción dinámica contiene dos clases de datos empíricos: las descripciones de las posiciones y las velocidades de

---

<sup>7</sup> *Ibid.*, p. 54.

<sup>8</sup> El sentido de esta cláusula concesiva puede ilustrarse con la siguiente anécdota: se cuenta que Laplace, al ser interrogado por Napoleón acerca del papel de Dios en el sistema del Mundo, respondió: "No tengo necesidad de esta hipótesis". (cfr. PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., *op. cit.*, p. 55).

cada partícula (o punto) de un sistema en un instante dado y la naturaleza de las fuerzas dinámicas actuantes (es decir, el modo en las aceleraciones instantáneas producidas pueden ser deducidas del estado instantáneo del sistema).

El éxito reduccionista de la ciencia newtoniana reside en el descubrimiento de una sola fuerza, -la gravitación universal-, determinante del movimiento de todos los cuerpos, sean planetas, cometas u objetos que caen hacia el centro de la tierra. Todo cuerpo, sea cual sea su dimensión, tiene una masa y, por tanto, está sujeto a la fuerza de la gravedad. Si un sistema dinámico puede ser definido por la posición y la velocidad instantáneas de los puntos materiales que lo integran, puede decirse entonces que el universo en su conjunto es el único sistema dinámico.

Es cierto que después de Newton se han descubierto otras fuerzas distintas de la gravitatoria -la fuerza electromagnética y las fuerzas nuclear débil y nuclear fuerte-, y que han modificado el contenido empírico de las leyes del movimiento, pero no la *forma*. esta, como indican Prigogine y Stengers, "define lo que, fundamentalmente, es el mundo de la dinámica, lo que significa la reducción del cambio a un conjunto de trayectorias. Este significado queda contenido en los tres atributos de la trayectoria mecánica: *la legalidad, el determinismo, la reversibilidad*"<sup>9</sup>. Una vez conocidas las leyes que rigen un sistema, cualquier estado instantáneo del mismo es suficiente para definirlo completamente, de modo que es posible deducir tanto su evolución futura como cualquier estado anterior. Las leyes dinámicas son, pues, deterministas y reversibles.

### 3. *El paradigma del caos*

Un sistema dinámico de tres o más cuerpos puede ser descrito mediante un sistema de ecuaciones lineales. Se sabe que todo sistema de este tipo es caótico, es decir, que su comportamiento es imprevisible. Pero no por eso deja de ser determinista. La única

---

<sup>9</sup> *Ibid.*, p. 63.

restricción que impone la teoría del caos es la previsibilidad. La caología disocia determinismo y predicción. La clave de ello reside en el concepto de alinealidad.

### 3.1. *Los sistemas no lineales*

La alinealidad es el criterio que permite distinguir entre comportamiento simple y comportamiento caótico.

En los sistemas lineales existe una relación simple entre causa y efecto. Una pequeña variación o error en los valores a computar sólo implica leves cambios en los resultados obtenidos tras el cálculo. Además, si la causa A produce el efecto X, y la causa B produce el efecto Y, A y B juntas producen X e Y juntos. Ambos procesos causales son independientes. No interactúan.

Por el contrario, en los sistemas no lineales puede darse una desproporción considerable entre las magnitudes de causa y efecto. Una pequeña variación en el valor asignado a una variable puede comportar un cambio significativo e incluso abismal en la solución de un sistema de ecuaciones no lineales. Estas ecuaciones no tienen, en general, soluciones explícitas, por lo que la evolución de los sistemas dinámicos no lineales son, tanto teórica como prácticamente, impredecibles. Se dice entonces que esos sistemas son caóticos, o que se comportan caóticamente.

### 3.2. *La retroalimentación*

Para explicar por qué los sistemas caóticos son imprevisibles, introduciremos la noción de "retroalimentación". La retroalimentación o *feed-back* consiste en la reversión parcial de un efecto o resultado final en la causa que la produce, de modo que la producción de dicho efecto varía espectacularmente. En rigor, esto significa que no media, o no es posible establecer, ninguna proporción o correlación cuantitativa entre causa y efecto.

Los mecanismos de retroalimentación, también conocidos como rizados de realimentación, pueden ser positivos o negativos, según cuales sean sus efectos. Si la realimentación conduce a una amplificación del efecto, se dice que es positiva. Si, por el contra-

rio, lo disminuye entonces es negativa. Las reacciones químicas autocatalíticas, esto es, aquellas reacciones en las que el producto sirve de catalizador del reactivo, constituyen un ejemplo de realimentación positiva. Otro ejemplo del mismo tipo es el fenómeno de acoplamiento que se produce cuando se acerca un micrófono a un altavoz. Los termostatos o, en general, cualquier servomecanismo basan su funcionamiento en un bucle de realimentación negativa.

Actualmente se piensa que existen circuitos de retroalimentación en todas partes: en los organismos vivos y en los ecosistemas, en los comportamientos psicológicos y sociales, en los sistemas económicos, en las funciones matemáticas no lineales y en numerosos procesos físicos y químicos. En efecto, los sistemas "depredador-presa", las ecuaciones logísticas de las colonias bacterianas, los mecanismos de la motivación personal, la teoría smithiana de los mercados concurrenciales y la teoría malthusiana del crecimiento de la población, los pesos y contrapesos constitucionales, la ecuación demográfica de Verhulst<sup>10</sup>, el conjunto de Mandelbrot<sup>11</sup>, o la formación de borrascas constituyen casos de realimentación. Es importante recalcar que el concepto de retroalimentación es, originalmente, técnico. En el 250 a.C. Kresibios concibió un regulador de la altura del agua para su clepsidra. Los ingenieros de todas las épocas han diseñado mecanismos regulado-

---

<sup>10</sup> La ecuación demográfica de Verhulst es iterativa:  $X_{n+1} = N \cdot X_n (1 - X_n)$ , donde  $N$  es la tasa de natalidad y  $X_n$  representa la población correspondiente a cada unidad de tiempo. (Cfr. al respecto, BRIGGS, J. & PEAT, F.D., *Espejo y reflejo: del caos al orden*, Gedisa, Barcelona, 1994, pp. 56 y ss.).

<sup>11</sup> El conjunto de Mandelbrot es un conjunto de números complejos generados a partir de la iteración de la ecuación  $Z^2 + C = X$ , mediante un programa informático. El proceso iterativo es sencillo: al cuadrado de un número complejo cualquiera se le suma otro número complejo,  $C$ , fijo. El resultado obtenido es introducido de nuevo en la ecuación, obteniéndose otro número complejo; y así sucesivamente. Estas iteraciones se repiten para otros cualesquiera números complejos iniciales, comprendidos entre unos intervalos numéricos prefijados tanto para la parte real como para la parte imaginaria. El programa sólo escoge aquellos números complejos cuya cantidad de dígitos no exceda la capacidad de cálculo del ordenador. El conjunto de Mandelbrot consiste precisamente en aquellos números complejos  $C$  para los cuales  $Z^2 + C$  es finito. La representación gráfica de ese conjunto se obtiene asignando el color negro a esos números. Los números que la iteración acerca al infinito se colorean con gris. El blanco se reserva para aquellos números que la iteración lleva más rápidamente al infinito. El resultado es sorprendente. La figura obtenida, llamada por algunos "el ojo de Dios" (aunque el propio Mandelbrot prefiere el nombre de "el polímero del diablo"), se repite en diversos niveles de escala. Esta propiedad, conocida como *autosimilitud*, es característica de los sistemas caóticos.

res. Pero sólo a partir de la década de 1940, con la cibernética, se acuñó la expresión *feed-back* para designar un bucle de realimentación negativa. La teoría de la información del lenguaje de máquina, y los proyectos para desarrollar una inteligencia artificial (un programa autoprogramable, en definitiva) contribuyeron a la popularización de ese concepto. La tecnología industrial de la década siguiente utilizaría, además, rizados de realimentación positiva. Desde entonces, no ha cesado la exportación de este término a los más diversos ámbitos de la realidad.

### 3.3. La hipersensibilidad a las condiciones iniciales

Otra característica común a los sistemas no lineales es su gran sensibilidad a las condiciones iniciales. Desde el punto de vista matemático, esa sensibilidad viene dada por la presencia en las ecuaciones no lineales de términos que se multiplican repetidamente por sí mismos. En la construcción por ordenador de modelos de estas funciones matemáticas, el resultado de un cálculo sirve como entrada para el siguiente. Por tanto, una pequeña variación en los valores asignados inicialmente (que en un sistema lineal sería despreciable) puede conducir a resultados imprevisibles.

Desde el punto de vista físico, la sensibilidad a las condiciones iniciales significa que pequeñas fluctuaciones microscópicas pueden amplificarse rápidamente, afectando al comportamiento macroscópico del sistema. Un caso típico es el denominado *efecto mariposa*. En 1961, el norteamericano Edward Lorenz diseñó un modelo matemático para describir la meteorología terrestre. Se trataba de un sistema de tres ecuaciones diferenciales no lineales<sup>12</sup>. El procedimiento para efectuar un pronóstico meteorológico consistía

---

<sup>12</sup> Una ecuación diferencial describe el cambio de una variable respecto a otra. por ejemplo, la aceleración de una partícula se define como la derivada de su velocidad respecto al tiempo, o también como la derivada segunda de su posición respecto al tiempo, es decir,  $a = dv/dt = d^2s/dt^2$ . Si ambas variables cambian correlativamente (esto es, si se trata de un movimiento uniformemente variado), su representación gráfica será una recta. Si la relación entre dos variables no es lineal, el gráfico mostrará una curva. si es fuertemente no lineal, la curva seguirá una trayectoria errática. En general, sólo las ecuaciones diferenciales lineales tienen soluciones explícitas. Algunas ecuaciones diferenciales no lineales pueden ser resueltas, pero constituyen excepciones.

en introducir en un ordenador unos datos iniciales (presión atmosférica, temperatura, velocidad y dirección de los vientos, etc.) para esas ecuaciones y obtener, tras sucesivas iteraciones, un gráfico que representase la evolución temporal del sistema. Cada secuencia obtenida a partir de unos valores de entrada constituía una predicción.

En cierta ocasión, revisando una de sus predicciones, Lorenz tuvo la ocurrencia de reinicializarla. Pero para ello no empleó los datos iniciales, sino los obtenidos hacia la mitad del proceso iterativo. Este meteorólogo supuso que la nueva secuencia concordaría con la anterior desde el punto medio. Para su sorpresa, descubrió que los gráficos de ambas secuencias divergían; al principio sólo un poco, pero luego espectacularmente. ¿Qué había ocurrido? Los cálculos del ordenador eran puramente mecánicos, por lo que los resultados finales deberían haber sido los mismos en cada caso. Tras reflexionar, Lorenz se percató de que la memoria del ordenador almacenaba seis dígitos, y que la impresora solamente proporcionaba tres, por redondeo. Lo que él había hecho era introducir esos valores redondeados para el segundo cálculo. Lorenz había supuesto, -equivocadamente-, que una aproximación del orden de 1 por 1000 produciría errores insignificantes en los resultados. Estaba claro, pues, que ese sistema era extremadamente sensible a las condiciones iniciales. En la práctica, quedaba claro que un pronóstico meteorológico a largo plazo carecía por completo de fiabilidad (actualmente se considera que una previsión del tiempo no puede efectuarse con una antelación superior a tres días).

El modelo meteorológico de Lorenz evidenciaba que las perturbaciones más ínfimas podían afectar drásticamente al comportamiento global de un sistema. El propio Lorenz acuñó la expresión "efecto mariposa", dando a entender que el aleteo de una mariposa en cualquier rincón del planeta podía desencadenar una tormenta en las antípodas<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Cfr. DAVIES, P.C.W., *Imágenes y metáforas de la ciencia*, Alianza Editorial, Madrid, 1992, p. 100;

Por otro lado, el hallazgo de este meteorólogo fue presentado como una corroboración de que los sistemas alineales, pese a ser estrictamente deterministas, se comportan de modo aleatorio o imprevisible. Esta combinación de azar y necesidad es característica del caos. Como observa Davies, "un sistema puede cumplir estrictamente unas leyes deterministas y mantener, sin embargo, un comportamiento tan complicado que, a todos los efectos prácticos, resulta fortuito"<sup>14</sup>.

### 3.4. La imprevisibilidad

Acabamos de ver que según la teoría del caos la realidad escapa, a menudo, a todo pronóstico. El comportamiento caótico es intrínseco a los sistemas, y su imprevisibilidad nada tiene que ver con ningún principio de incertidumbre (como en la mecánica cuántica, por ejemplo). Davies sostiene que "la naturaleza impredecible del comportamiento caótico... es fortuita en el sentido algorítmico", aplicando así la teoría de la complejidad algorítmica al caos determinista<sup>15</sup>. En esencia, esta teoría sostiene que una secuencia numérica es no fortuita o algorítmicamente comprimible siempre que pueda hallarse una fórmula o algoritmo que la genere y que sea más breve que la propia secuencia descrita. Uno de sus resultados más importantes es que puede probarse que una secuencia no es fortuita (hallando el algoritmo que la genera), pero es imposible demostrar que sea fortuita<sup>16</sup>. Así, una secuencia (supuestamente) fortuita no dispone de ningún algoritmo más breve que ella misma que la reproduzca<sup>17</sup>. El algoritmo o expresión algebraica más simple que puede generarla contiene tantos

---

BRIGGS, J. & PEAT, F.D., *op. cit.*, pp. 68-69; y HAYLES, K.N., *La evolución del caos*, Gedisa, Barcelona, 1994, pp. 188-189.

<sup>14</sup> DAVIES, P.C.W., *op. cit.*, p. 100.

<sup>15</sup> *Ibid.*, pp. 93-97 y 101.

<sup>16</sup> Este resultado, observa Davies, está relacionado con el teorema de Gödel acerca de la incompletud de la aritmética. (Cfr., *ibid.*, p. 97).

<sup>17</sup> En rigor, no puede saberse si una secuencia es fortuita. Además, me parece obligado admitir el carácter "supuestamente" fortuito de una secuencia aleatoria cualquiera, si es que se está dispuesto a conceder cierta plausibilidad a la identificación que hace Davies del comportamiento caótico con el fortuito en sentido algorítmico.

bits de información como ella misma. Por eso se dice que es algorítmicamente incompresible. Según Davies, la teoría de la información algorítmica proporciona "una sólida base matemática" para el concepto del caos.

Este recurso a una teoría lógico-matemática puede sin duda facilitar la comprensión del caos, pero sirve también para legitimar una tesis metafísica. Para Prigogine y Stengers, el reconocimiento del caos por la ciencia pone de manifiesto que los científicos se han liberado por fin del mito newtoniano, es decir, del mito de un saber omnisciente. El caos, entendido como un rasgo esencial del universo, nos presenta además un futuro abierto, en el que tiene cabida el libre albedrío (o cuanto menos, la libertad para explorar su evolución).

Fijémonos, sin embargo, en el recorrido seguido hasta ahora: de la constatación de que ciertos modelos matemáticos utilizados para describir algunos sistemas físicos son alineales, se ha pasado a la atribución de la no linealidad a la realidad misma. El cosmos se ha revelado caótico. Con todo, ese caos resultaba ser determinista. Y finalmente, de la imprevisibilidad teórica se ha llegado a la idea de un porvenir abierto, es decir, un futuro capaz de seguir múltiples trayectorias distintas.

La conclusión parece excesiva, sobre todo si atendemos al simple hecho de que, en principio, la cuestión se reducía a los problemas técnicos (o matemáticos) suscitados durante la elaboración de un pronóstico por ordenador. "Aunque las iteraciones son deterministas -escriben Briggs y Peat-, el error de redondeo explota las limitaciones del ordenador y quita sentido a cualquier predicción"<sup>18</sup>. La atribución al mundo de las propiedades del caos nos remite, pues, a las dificultades que plantea su mecanización.

Aunque autores como Prigogine se apropian de la teoría del caos para formular argumentos humanísticos contra la cosmovisión totalizadora (i.e., reduccionista) de la ciencia clásica<sup>19</sup>, para otros

---

<sup>18</sup> BRIGGS, J. & PEAT, F.D., *op. cit.*, p. 73.

<sup>19</sup> Cfr., PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., *op. cit.*, caps. I y VI. Véase también el monográfico de

dicha teoría no refuta el mecanicismo; antes bien, lo supera. En este sentido, Hayles sostiene que "por un lado, la teoría del caos muestra que la mecánica newtoniana es mucho más limitada en su aplicabilidad que lo que Laplace supuso. Por otro, intenta domesticar la turbulencia situándola en el dominio de la construcción de modelos matemáticos y de la teoría científica... La teoría del caos no socava una visión omnisciente sino que, más bien, la extiende más allá de donde la mecánica newtoniana podía llegar"<sup>20</sup>.

#### 4. *El orden en el caos*

Bajo el rótulo de "teoría del caos" se ha presentado un conjunto interdisciplinario de investigaciones en campos como la dinámica no lineal, la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio, la meteorología o la epidemiología. En general, puede decirse que la caología intenta establecer un nexo entre el comportamiento complejo de ciertos sistemas físico-químicos o matemáticos y algún tipo de orden o estructura.

Dentro de la teoría del caos se distinguen dos tendencias o planteamientos básicos distintos, según se acentúe el orden subyacente de los sistemas caóticos o el caos como precursor del orden. El primer planteamiento parte del orden para llegar al caos. El segundo, en cambio, arriba a la comprensión del orden partiendo de la complejidad del caos.

##### 4.1. *El orden precursor del caos: los atractores extraños*

Este enfoque se fija en la transición ordenada de algunos sistemas hacia el caos: aquí, la noción de caos puede asociarse con la de imprevisibilidad, pero no con la de azar. Se considera que los sistemas caóticos no se comportan aleatoriamente. En ellos subyace

---

Archipiélago, 1993, 13, donde diversos autores ponen la teoría del caos al servicio de determinados discursos ideológicos. Destacable es el pintoresco análisis del poder en IBÁÑEZ, J., 'El centro del caos', *loc. cit.*, pp. 14-26; y las propuestas radicales de fiscalización de la gestión pública en ESCOHOTADO, A., 'Caos como regeneración política', pp. 35-38.

<sup>20</sup> HAYLES, K.N., *La evolución del caos*, Gedisa, Barcelona, 1994, pp. 35-36.

algún tipo de orden o estructura muy sofisticada y altamente codificada, que recibe el nombre de *atractor extraño*.

Un atractor es un punto o una región de un espacio de fases hacia la cual tiende la trayectoria de un sistema dado. El espacio de fases es una representación gráfica n-dimensional de un sistema con n grados de libertad, es decir, con las n variables necesarias para la descripción de su comportamiento. Su trayectoria es simplemente la recta o curva obtenida en la representación gráfica de la evolución del sistema. Si la trayectoria tiende a un punto determinado del espacio de fases, esas coordenadas constituyen un atractor de punto fijo. Cuando la trayectoria descrita es cíclica, se dice que el atractor es un ciclo límite. Por ejemplo, el atractor de ciclo límite de un péndulo oscilando en el vacío viene representado por una circunferencia, cuyo centro se sitúa en el origen de coordenadas de dos ejes cartesianos. Uno de ellos representa la elongación; el otro, la velocidad del péndulo. Si ese mismo péndulo se moviese en el aire, el atractor de su trayectoria en el espacio de fases sería un punto fijo (correspondiente, en el espacio real, al punto de equilibrio). La trayectoria descrita será parecida a una espiral. La razón de ello es que el rozamiento del aire disminuye progresivamente la velocidad y la elongación del péndulo, hasta que finalmente este se detiene en la perpendicular<sup>21</sup>.

La noción de atractor extraño es difícil de definir. Briggs y Peat lo caracterizan como "un atractor que ha sido fragmentado a través del espacio de fases"<sup>22</sup>. Hayles compara el comportamiento caótico con el representado por una trayectoria dentro de un espacio de fases "que hubiera sido estrujado y después doblado"<sup>23</sup>.

---

<sup>21</sup> El movimiento armónico simple es un caso sencillo que puede ser representado en un espacio de fases bidimensional. Las representaciones de sistemas con más de tres grados de libertad son complicadas. El espacio de fases multidimensional empleado con más frecuencia es el toro (cfr., BRIGGS, J. & PEAT, F.D., *op. cit.*, pp. 40-41).

<sup>22</sup> *Ibid.*, p. 45.

<sup>23</sup> HAYLES, K.N., *op. cit.*, p. 192.

Un atractor extraño es, pues, una zona del espacio de fases hacia la cual se dirige erráticamente la trayectoria de un sistema. El atractor extraño no se resuelve en un ciclo límite sumamente complicado, sino en una infinidad de trayectorias estocásticas disjuntas que "vagabundean" alrededor de una región del espacio. Tomemos, por ejemplo, el atractor de Lorenz. Como se recordará, el modelo de este meteorólogo consistía en un sistema de tres ecuaciones diferenciales no lineales, correspondientes a otros tantos grados de libertad. Cuando Lorenz representó gráficamente la evolución de su modelo meteorológico en un espacio de fases tridimensional, obtuvo un dibujo parecido a las alas de una mariposa. Un detalle importante es que dicha figura estaba constituida por órbitas que repetían una trayectoria cíclica, parecida a un aro alabeado, sin que jamás se cruzaran o coincidirían. Esto indicaba que el sistema nunca repetía el mismo movimiento, es decir, que era aperiódico y, por tanto, imprevisible. Además el gráfico mostraba cómo la asignación de valores similares para una variable disparaba los valores obtenidos en las restantes; mientras que otros valores, muy alejados en la escala numérica, asignados a una misma variable daban, para las otras, valores casi iguales (en esto consistía, recordémoslo, la gran sensibilidad a las condiciones iniciales). Por estas razones, concluye Hayles, no debe asombrarnos que "este atractor fuera considerado extraño. Era una rara combinación de simplicidad y complejidad, determinismo e impredecibilidad"<sup>24</sup>.

Se ha descubierto que los comportamientos de una gran variedad de sistemas pueden ser descritos mediante atractores extraños: las fluctuaciones bursátiles, las epidemias, las crecidas periódicas de algunos ríos, la cantidad de piezas cobradas durante las temporadas de caza o incluso los movimientos oculares de los esquizofrénicos son algunos ejemplos. La multiplicabilidad del concepto de atractor extraño ha contribuido decisivamente a fortalecer y, por qué no decirlo, legitimar la teoría del caos. Esa

---

<sup>24</sup> *Ibid.*, p. 192.

criatura teórica bautizada con el nombre de "atractor extraño" introduce inteligibilidad, orden, *episteme*, donde antes reinaba la confusión, el caos, la ignorancia. Al respecto, Hayles observa que "mientras que los sistemas verdaderamente aleatorios no muestran un esquema discernible cuando se los organiza en un espacio de fase, los sistemas caóticos se concentran en un región limitada y trazan modelos complejos dentro de ella"<sup>25</sup>. El atractor extraño, en efecto, separa el caos del puro azar. Por ello se dice que el caos es determinista, o que combina azar y necesidad. Pero una vez más, deberíamos interrogarnos sobre el modo en que esta peculiar combinación ha sido transferida a la naturaleza. Originalmente, el atractor extraño designa un cierto tipo de configuración que aparece en las representaciones gráficas de funciones matemáticas no lineales por ordenador. Desde el punto de vista conceptual, no creo que pueda decirse que el atractor extraño "conecte" el mundo real y empírico con el mundo ideal y matemático (tal como lo hacen, por ejemplo, los conceptos métricos o las leyes de la física. El concepto de atractor extraño parece ser, más bien, un concepto de segundo orden. En cualquier caso, se trata de un artificio teórico inspirado por una técnica de representación simbólica (el espacio de fases), y por los programas informáticos de iteración de un conjunto de ecuaciones. Pero ahora, según los caólogos, los atractores extraños están abrumadoramente presentes en el mundonatural. Estas entidades han adquirido, al parecer, un status ontológico por derecho propio.

#### 4.2. La simetría recursiva

La teoría del caos vincula estrechamente la noción de atractor extraño con la de simetría recursiva. Si se magnifican la representación gráfica de cualquier atractor extraño, se observará que se reproduce parcial o totalmente la misma figura<sup>26</sup>. Los atractores

---

<sup>25</sup> *Ibid.*, p. 29.

<sup>26</sup> Cfr. BRIGGS, J. & PEAT, F.D., *op. cit.*, p. 89. Véase, por ejemplo, la representación del atractor de Hénon, generado mediante la iteración de cierta ecuación. La figura de este atractor extraño es notablemente parecida a la obtenida en la representación gráfica del goteo de un grifo averiado. Dicha

extraños son como muñecas rusas de un orden sutil. En particular, este orden consistió en la existencia de simetrías invariantes respecto de la escala de medición escogida.

El ejemplo más citado en la literatura es el conjunto de Cantor, también conocido como "la polvareda de Cantor": sea un segmento que representa el tramo real del 0 al 1. A este segmento se le borra el tercio medio. A los dos segmentos sobrantes se les resta también su tercio medio; y así sucesivamente. Mediante la reiteración de esta operación se obtiene, en el límite, un conjunto muy extraño: el "polvo" de Cantor es un conjunto infinitamente divisible pero discontinuo.

Se dice que las series que tienen este tipo de simetría poseen "puntos fijos". Según la teoría del caos, en un sistema que posee puntos fijos las perturbaciones en la escala más reducida se transmiten rápidamente a través de todo el sistema, afectando al comportamiento macroscópico. "Un atractor extraño, afirma Hayles, posee simetrías de punto fijo, lo que implica que tiene muchos puntos de acoplamiento que transmiten y amplifican las pequeñas fluctuaciones, convirtiéndolas en grandes cambios dentro de su órbita (i.e., trayectoria)"<sup>27</sup>. Esto explicaría, al parecer, por qué existe un punto crítico a partir del cual el comportamiento de un sistema deviene caótico. Se trataría de un fenómeno de resonancia o realimentación positiva.

Lo que, a mi juicio, no se explica es qué relación puede haber entre la simetría recursiva o autosimilitud y esta nueva entidad denominada "punto de acoplamiento", que actúa como un intermediario o transmisor entre el comportamiento microscópico y el macroscópico dentro de un sistema. Desde un punto de vista matemático, la explicación era clara: las funciones fuertemente no lineales son muy sensibles a la más pequeña variación en los valores que les son asignados. Pero ahora, viendo cómo se intenta hallar

---

representación se efectúa en un espacio de fases bidimensional, en el que se registran la intensidad (o para el caso, valga decir la sonoridad) de las gotas que caen y el lapso de tiempo transcurrido entre cada caída. Cualquier ampliación de la figura obtenida conserva la autosimilitud.

<sup>27</sup> HAYLES, K.N., *op. cit.*, p. 201.

un correlato ontológico del atractor extraño, uno no puede evitar el pensar que asiste a algún fabuloso montaje cosmológico, al estilo del que Edgar Allan Poe describiera en su delirante *Eureka*<sup>28</sup>.

Por otro lado, el recurso al conjunto de Cantor ilustra perfectamente la apropiación acrítica que con frecuencia se hace, en la caología, de conceptos de otras disciplinas. La serie del "tercio medio" de Cantor forma parte de los procedimientos que este matemático empleó en sus investigaciones, tras demostrar que el conjunto de los números reales es no-numerable<sup>29</sup>. Esta serie posee un cierto tipo de simetría y es generada por un procedimiento iterativo, pero no está claro que pueda aplicarse sin más a la estructura de los atractores extraños. Los teóricos del caos a menudo se muestran proclives a especulaciones de esta índole<sup>30</sup>

---

<sup>28</sup> POE, E.A., *Eureka*, Alianza Editorial, Madrid, 1979 (original de 1847).

<sup>29</sup> Cfr. KLEENE, S.C., *Introducción a la metamatemática*, Tecnos, Madrid, 1974, pp. 15 y ss.

<sup>30</sup> Mandelbrot y algunos físicos sostienen, por ejemplo, que el conjunto de Cantor sirve para describir la distribución en el espacio de las estrellas y las galaxias (cfr., BRIGGS, J. & PEAT, F.D., *op. cit.*, p. 105).