

CAOS Y FRACTURA

Carlos Rodríguez Ipiens

Revista "Spin Cero" nº 2. I.E.S. "Pablo Picasso". Málaga, 1996

*«...mientras que las máquinas se encuentran
inquietantemente vivas, el ser humano
permanece preocupantemente inerte...»*

D. Haraway

Hasta hace muy poco tiempo, se hacía uso del término CAOS para designar la aleatoriedad.

Sin embargo, ya en 1903, Henri Poincaré (1854-1912), matemático francés, postulaba acerca de lo aleatorio y del azar en los siguientes términos: "El azar no es más que la medida de la ignorancia del hombre", reconociendo a la vez la existencia de innumerables fenómenos que no eran completamente aleatorios --que simplemente no respondían a una dinámica lineal--, aquellos a los que pequeños cambios en las condiciones iniciales conducían a enormes cambios en el resultado. Se establece así lo que más tarde Edward N. Lorenz llamará "dependencia sensible".

Podemos considerar esta observación de Henri Poincaré como el embrión de un nuevo paradigma científico: la creación de una nueva Ciencia como reconoce James Gleick en el título de uno de los libros iniciáticos de la teoría y más ilustrativo: "CAOS la creación de una ciencia".

De este modo, podemos anunciar esta Teoría como el primer intento desde la Ciencia Oficial en la búsqueda de las leyes que gobiernan los innumerables fenómenos tan desconocidos en su dinámica y tan naturales y cotidianos a la vez --el clima, el movimiento de las nubes, el aire que se desplaza sobre el ala de un avión, la sangre cuando fluye a través del corazón y todo su sistema dinámico (el infarto como la transición de un estado de regularidad a un estado caótico), las turbulencias en general, las formaciones geológicas, la manera en que las flores silvestres aparecen en un campo, la bandera que ondea, el humo de un cigarrillo, el movimiento de una hoja al caer, las epidemias, los conflictos bélicos, los atascos de tráfico, el comportamiento de la bolsa...-- que no son susceptibles de control con las herramientas calculistas de las que nos provee la Matemática y la Física actual.

La Ciencia ha tenido tendencia a confundir --no se sabe si por ignorancia como nos adelantaba H. Poincaré-- el contenido determinista o de azar asociado a un fenómeno atendiendo a su predicibilidad o no. Así, una gran cantidad de fenómenos --generalmente naturales-- no predecibles se incorporaban sutilmente al mundo de lo azaroso, quedando así aparcados sin ser sometidos a tratamiento alguno.

¿Son los fenómenos enunciados anteriormente fenómenos de azar?. La respuesta es no.

Así, los fenómenos de azar (completamente de azar) --lanzar un dado legal-- no son deterministas, pues no podemos predecir de antemano su resultado, pero ésta no es una condición suficiente para que un fenómeno se considere completamente de azar, es decir, existen

fenómenos de los que no podemos predecir su comportamiento y no son de azar. Es ésta una primera característica, según Edward N. Lorenz, de los fenómenos caóticos.

Así, Lorenz utiliza el término CAOS para referirse a un conjunto de procesos o fenómenos que "parecen" comportarse de acuerdo con el azar aunque, de hecho, su desarrollo esté determinado por leyes bien precisas.

Dependencia Sensible

"Por perder un clavo, el caballo perdió la herradura, el jinete perdió al caballo, el jinete no combatió, la batalla se perdió, y con ella perdimos el reino."

"El aleteo de una mariposa en Pekín puede provocar un tornado en Texas."

La pérdida de un reino y el efecto mariposa no son más que típicos ejemplos de como lo "pequeño" puede provocar (originar) lo "grande".

Siguiendo en términos de una exposición no rigurosa, hablemos de los sistemas dinámicos.

Un Sistema Dinámico podemos considerarlo como una colección de partes que interactúan entre sí y se modifican unas a otras a través del tiempo.

El movimiento regular de los objetos, planetas en órbita, péndulos, resortes, bolas que ruedan..., son fenómenos que se sitúan en lo que llamamos una dinámica lineal, sus comportamientos se describen mediante ecuaciones lineales y las Matemáticas resuelven este tipo de ecuaciones fácilmente. Un Sistema Dinámico decimos que es lineal, cuando pequeños cambios en las condiciones iniciales del sistema no originan grandes cambios en el proceso y resultado final del mismo.

Cuando, por el contrario, la dependencia interactiva entre las partes que configuran el sistema es muy sensible --pequeñas variaciones en las condiciones iniciales provocan cambios substanciales en el resultado final (efecto mariposa)-- decimos que la dinámica que rige el sistema es no lineal, o que el sistema está sujeto a una dinámica caótica.

Una consecuencia inmediata de la dependencia sensible en cualquier sistema es la imposibilidad de realizar predicciones perfectas, ni siquiera mediocres.

Es esta dependencia sensible otra característica que incorporar en la descripción de los fenómenos caóticos; así, podemos decir que un fenómeno es caótico cuando, pareciendo comportarse como un fenómeno de azar, no lo es, las partes que los conforman sufren dependencia sensible o son sensiblemente dependientes.

Fractalidad y Atractores Extraños

Será la Fractalidad, como vemos enseguida, otra cualidad inherente a los procesos caóticos.

Desde los comienzos de la creación de la ciencia en Grecia, como cuerpo de doctrina que pretenderá explicar el ser y el comportamiento de nuestro universo, la cultura

occidental se ha visto prisionera de la Geometría Euclídea para la explicación de los fenómenos que acaecen, acarreando con ello una cultura heredada de la idea de que los puntos, las líneas, los círculos, los cubos..., son de alguna manera "más naturales" que la propia naturaleza. El mundo platónico, el mundo de las ideas, era el universo en donde estas formas euclídeas, formas perfectas, permanecieran como ideales. Para el mismo Platón, el universo de lo humano se caracterizaba precisamente por lo contrario, la imperfección; el universo humano era una imagen imperfecta del universo utópico basado en las formas de la geometría que Euclides postulaba.

Es de esta manera como hasta nuestros días la cultura y la forma de hacer del hombre siguen intentando presas de la idea platónica y siguen intentando cambiar lo que la naturaleza nos da en sus formas por otras "ideales"; así, el hombre es arquitecto de formas generalmente cúbicas, las ruedas han de ser redondas, los jardines rectangulares o a lo más circulares... Puede que sea esta cultura euclídea de nuestro universo lo que nos lleve a la destrucción de las formas naturales, fomentando el impulso por la creación de ciudades cada vez más cuadriculadas tanto en el plano como en el espacio, en todo caso ¿más humanas?

Lo cáustico de esta situación es el uso de la Geometría Euclídea para modelar la naturaleza, de manera que, cuando el modelo no se ajusta a ser explicado con dicha geometría, la ciencia oficial pone en entredicho a la propia naturaleza en vez de a la geometría que utiliza.

Puede decirse que es Benôit Mandelbrot el creador de la geometría fractal, también conocida como geometría de la naturaleza. Después de un periplo profesional bastante largo y variado, Mandelbrot ingresa en la École Normale (París), en el periodo "histórico" en el que nace y se desarrolla en Francia y se exporta a las matemáticas de todo el mundo el fenómeno "Bourbaki". Su dominio en la École Normale fue tan absoluto, e insoportable para Mandelbrot, que huyó de aquella escuela y, diez años después, por la misma razón, de Francia.

Mandelbrot, con su huída, nos suministra una herramienta imprescindible para el estudio del Caos, el objeto fractal, la dimensión fractal, la fractalidad.

Una meta inicial de la nueva geometría fractal es la de descubrir, desde fuera, la forma de diversos objetos, para posteriormente estudiar una de las características principales de cualquier objeto fractal, su dimensión, que no será más que un índice del grado de irregularidad e interrupción que posee. Así, al contrario de las dimensiones habituales (enteras) a las que nos tiene sometidos la Geometría Euclídea, la dimensión de un objeto puede ser muy bien una fracción simple como $1/2$ o $5/3$ e incluso un número irracional. No obstante, existen objetos fractales, irregulares o interrumpidos, que satisfacen dimensiones enteras 1, 2 y sin embargo no se parecen en nada ni a rectas ni a planos. El término "fractal" nace del adjetivo latino "fractus", que significa interrumpido o irregular.

La geometría elemental no enseña que un punto aislado o un número finito de puntos, constituyen una figura de dimensión 0; que una recta, así como cualquier curva estándar, constituyen figuras de dimensión 1; que un plano o cualquier superficie ordinaria, son figuras de dimensión 2; que un cubo, o una esfera, posee dimensión 3. En la nueva geometría fractal, existen curvas planas muy irregulares para las que su

dimensión se encontrará entre 1 y 2, podrá hablarse también en esta geometría de ciertas superficies muy hojaldradas de dimensión intermedia entre 2 y 3, o podremos definir polvos sobre la recta que generan objetos de dimensión comprendida entre 0 y 1.

Como hemos dicho, la dimensión fractal de un objeto es la medida de su grado de irregularidad, considerada a todas las escalas, y puede ser algo mayor que la dimensión geométrica euclídea de un objeto. La dimensión fractal es afín a lo rápido que la medición estimada del objeto aumenta según disminuye el tamaño del instrumento de medida. Una dimensión fractal mayor quiere decir que el fractal es más irregular y que la medición estimada aumenta con mayor rapidez. Para objetos de la Geometría Euclídea (líneas, curvas,...) la dimensión del objeto y su dimensión fractal coinciden.

El espacio de Fase nace como una herramienta en la Física actual, considerado como un espacio hipotético que posee tantas dimensiones como el número de variables necesarias para especificar un estado de un sistema dinámico dado. Las coordenadas de un punto en el espacio de Fase son un conjunto de valores simultáneos de las variables. De esta manera, cualquier estado del sistema parado durante un instante vendrá representado como un punto en el espacio de Fase. Cuando el sistema cambia, el punto se moverá a otra posición del espacio de Fase, y si el sistema se modifica sin tregua de tiempo (con continuidad), el punto determinará una trayectoria a la que denominamos órbita. Un ejemplo sencillo para ilustrar este concepto de espacio de Fase, lo constituye un péndulo que oscila sin fricción. Una variable sería la posición y otra la velocidad; las dos cambian continuamente; podemos considerar como espacio de Fase un sistema cartesiano en el que cada eje representa a cada una de las variables. La gráfica que obtendríamos será de una curva más o menos cerrada, la cual se repite una y otra vez siempre.

Para el caso de que el péndulo esté expuesto a fricción, no son necesarias las ecuaciones del movimiento para conocer el resultado final: el péndulo perderá constantemente energía a causa de la fricción, y las trayectorias (órbitas) que describen los puntos del espacio de Fase decrecerán en espiral hacia un punto interior, que representa el estado estable, en este caso, el de la inmovilidad absoluta. Este punto final es el ejemplo de atractor más sencillo posible; lo podemos imaginar como un imán del tamaño de la cabeza de un alfiler. Podemos considerar un atractor en un sistema disipativo como un conjunto límite (puede ser un punto como el de este ejemplo) del cual no emanan órbitas.

Pues bien, la conexión entre la Geometría Fractal y la caología nace de la siguiente situación: cuando representamos en un espacio de Fase el estado de un sistema caótico, las órbitas y los atractores asociados a dicho sistema son objetos de dimensión fractal, este es, son fractales. Son estos atractores de dimensión fractal los que se denominan atractores extraños.

Fue E. N. Lorenz quien en 1963 logró computar el primer atractor extraño, y el primero en descubrir la dimensión fractal de dicho atractor. Este atractor, llamado de Lorenz (véase figura), se caracterizaba por ser estable, de pocas dimensiones y no periódico. Así lo caracteriza J. Gleick, sus órbitas no se cortaban entre sí, sus lazos y espirales eran infinitamente hondos; jamás se juntaban y jamás se intersecaban. Sin embargo, permanecían dentro de un espacio finito, confinados en una casilla. ¿Cómo acontecía

aquello? ¿Cómo cabían en un espacio finito innumerables, infinitas órbitas? Esto es la fractalidad.

Podemos concluir la caracterización de los sistemas o fenómenos caóticos, por tanto, como aquellos que, aparentando ser fenómenos de azar, no lo son, presentan una dinámica no lineal (dependencia sensible) y su comportamiento llevado al espacio de Fases se caracteriza por la existencia de atractores extraños, atractores de dimensión fractal.

Presentados los sistemas caóticos y, así, la caología como ciencia que se ocupa de su estudio, podemos, dentro de la caología, presentar dos enfoques básicos generales. En el primero, el Caos se considera como precursor y socio del orden y no como su opuesto. Figura central en esta dirección de investigación del Caos es Ilya Prigogine, Premio Nóbel por su trabajo en termodinámica irreversible. El título del libro del que es coautor con Isabelle Stengers, *Order out of Chaos* (Orden a partir del Caos) representa básicamente este enfoque.

El segundo enfoque del que podemos elegir como representantes a E. N. Lorenz, Mitchell Feigenbaum, Benoit Mandelbrot, Robert Shaw... destaca el orden oculto que existe dentro de los sistemas caóticos.

El enfoque de los "atractores extraños" difiere del "orden a partir del Caos" por la atención que presta a los sistemas que siguen siendo caóticos, esto es, los sistemas que no generan orden. Mientras Prigogine considera que la línea del orden a partir del caos (línea filosófica) reside en su capacidad para resolver el problema metafísico de reconciliación entre el ser y el devenir, los defensores de la línea de los atractores extraños destacan la capacidad de los sistemas caóticos para generar información. El orden no sería más que una manifestación del desorden, una anécdota.

De cualquier forma, no podemos dejar pasar cómo "sutilmente" existe un nexo entre ambas direcciones. La herramienta indispensable que utilizan ambas para un tratamiento efectivo del Caos y la Geometría Fractal: el ordenador. Sólo con las nuevas tecnología de la Computación es posible una investigación positiva en estos campos y en cualquiera de las líneas de trabajo aludidas anteriormente. El propio Mandelbrot ha señalado que la Geometría Fractal depende de los ordenadores como ninguna otra geometría dependió antes de un objeto mecanizado; los ordenadores han permitido practicar la Matemática como una "ciencia experimental". Así, los fractales generados por ordenador se desenvuelven en una interacción continua y fluida entre ser humano y la "inteligencia" de la máquina, resultado que inscribe fuertemente al Caos y la Geometría Fractal como un nuevo paradigma en el seno de lo que hoy día llamamos posmodernismo.

Asistimos con el posmodernismo a un proceso de desnaturalización de todos los contextos que rodean al ser humano y a la vez al propio ser humano. De este modo, los grandes centros de poder de este planeta codician el control de la tecnología de la computación, tecnología que será la herramienta indispensable para controlar lo que ya, no a tan largo plazo, será nuestro nuevo hábitat: el ciberespacio. Frente a esta realidad tan incierta, la figura del hombre se hace cada vez más confusa, se encuentra en parte desterrado en un mundo cada vez más fluctuante y fragmentado.

El individuo se diluye así, bajo el efecto del byte, mientras que el tratamiento informático lo reduce a la existencia estadística para constituir un efectivo, un mercado, un público, un electorado, o simplemente una muestra en un sondeo.

Nos encontramos en el instante de la historia donde se dibuja un horizonte, en el que la creación y la curiosidad dan paso al aburrimiento, la educación a la programación de los individuos; un mundo donde la cultura se atrofia mientras que la ciencia y sus aplicaciones se hipertrofian en todo caso mucha ciencia y poca conciencia.

¿Que ocurrirá cuando el ser humano quede desnaturalizado y considerado una construcción, un artificio, como cualquier otra cosa? ¿Ese será el momento de la fractura?

Bibliografía:

GLEICK, J. *Caos: La creación de una ciencia*. Seix Barral.
MANDELBROT, B. *Los objetos fractales*. Metatemas 13. Tusquets.
LORENZ, E. N. *La esencia del caos*. Debate/Pensamiento.
BALANDIER, G. *El desorden, la teoría del caos y las ciencias sociales*. Gedisa Editorial.

LA PREDICCIÓN Y LA TEORÍA DEL CAOS

Por Juan de Dios Ruano Gómez

Profesor de Técnicas de Investigación Social en la Facultad de Sociología de la Universidad de A Coruña.

La capacidad de predecir con certeza y precisión el comportamiento futuro de un sistema, bien sea físico, biológico o social se ha situado como una de las máximas aspiraciones de la ciencia clásica. No obstante, desarrollos recientes físico-matemáticos comienzan a acabar con esta ilusión en términos absolutos, para mostrarse únicamente posible la predicción en sistemas de gran simpleza. En el centro del debate se encuentra la conocida como Teoría del Caos, que aporta un plus de cientificidad a las aproximaciones sociológicas a su objeto de estudio.

Palabras clave: *Sociología, predicción, teoría del caos.*



Para la ciencia clásica, que ha tenido como referente genérico a la física —y dentro de ésta a la dinámica—, el conocimiento y comprensión total de su objeto de investigación suponía la capacidad del científico de predecir con certeza y precisión la situación de su objeto tanto en el pasado como en el futuro, con sólo conocer la definición de uno de los estados del objeto considerado y la ley que rige su evolución. No muy lejana a esta concepción, en el ámbito concreto de la reflexión sociológica, la estructura social como vertiente descriptiva de una sociedad y el cambio social como búsqueda de las leyes que dirigen su evolución, se muestran deudoras de esta particular epistemología vertebradora de los últimos siglos de la historia de la ciencia. Sin embargo, esta estrategia global que preside la ciencia clásica, y que puede encuadrarse en el principio de razón suficiente, ha significado varias cosas: En primer lugar, la independencia del objeto respecto de quien le observa; y, en segundo lugar, la igualdad entre

causa y efecto, lo que implicaba que nada pertinente para la definición del objeto y su posterior comportamiento o evolución, escaparía a la observación científica.

Ambas características han cuestionado –en mayor o menor medida– la científicidad clásica de las aproximaciones sociológicas a su objeto de estudio. Ahora bien, tanto la noción de inestabilidad –que se encuentra en la base de los comportamientos caóticos– como la noción de suceso –originaria de la mecánica cuántica– han constituido un revulsivo trascendental para las descripciones efectuadas en términos clásicos, los cuales dejarán de representar, en adelante, el ideal de conocimiento para el conjunto de la ciencia. Así, la noción de suceso puso en cuestión la separación sujeto/objeto en el ámbito de la física cuántica, mientras que los denominados comportamientos caóticos han desarbolado el principio de razón suficiente por cuanto que han permitido descubrir que, descripciones tan precisas como se quieran, no garantizan –en modo alguno– la certeza en la predicción de la situación futura del objeto de investigación.

Desde la perspectiva de la sociología, lo importante del camino recorrido por la ciencia clásica no es tan sólo el hecho de que la física haya llegado a reconocer límites intrínsecos a su modo de conocer desde los presupuestos epistemológicos subyacentes al principio de razón suficiente, sino que –sobre todo y más ampliamente– nos ha descubierto que se está produciendo un acercamiento a aquellos aspectos tradicionalmente más vinculados y distintivos de las ciencias sociales y humanas: la *historia* y la *complejidad*. A este respecto, puede decirse que la ciencia que asume la complejidad y la historia como propiedades intrínsecas a su objeto de estudio es completamente diferente de la que encontramos reflejada en los postulados de la ciencia clásica.¹

Con todo, ambas nociones –historia y complejidad– no sólo han sido marginadas en las ciencias físicas, sino que han sido apartadas, igualmente, en todas las disciplinas que han seguido los supuestos epistemológicos de la ciencia clásica. En este sentido, incluimos también a las corrientes teóricas tradicionalmente dominantes en la sociología. Así, conviene señalar lo reciente que es la reivindicación del estudio de los fenómenos alejados de la «normalidad» desde planteamientos que no estigmaticen a estos sucesos en tanto que desviaciones desintegradoras y/o caóticas respecto al orden social vigente en el momento. Este hecho ha acercado a algunos sociólogos a estudiar fenómenos tales como la difusión de las innovaciones sociales, el cambio de valores o las situaciones de crisis, de un modo potencialmente integrador, siguiendo así una perspectiva más abierta y representada en física por Prigogine y sus colaboradores.²

Ello no obstante, se presentan en la actualidad nuevas aportaciones y reflexiones científicas en torno al estudio de fenómenos difícilmente abordables desde concepciones clásicas, que manifiestan una ambigüedad entre los supuestos epistemológicos que constituyen las perspectivas complejas de investigación científica y las consideradas como visiones clásicas de la ciencia. Entre ellas, la denominada *Teoría del Caos* resalta por mostrarse como el dios Jano, con un doble rostro que observaría, de un lado las aproximaciones clásicas, y de otro las perspectivas complejas de investigación. Por su carácter ilustrativo y por la resonancia que esta teoría está desempeñando en nuestros días en el estudio de fenómenos inestables, conviene aclarar algunas de las características que hacen

de la Teoría del Caos un campo de controversia entre los seguidores de unos y otros supuestos epistemológicos.

Para iniciar una somera exposición sobre la Teoría del Caos, nada como hacerlo a partir de la imagen que más ha contribuido a difundir esta teoría. Nos estamos refiriendo, naturalmente, al conocido como *efecto mariposa*. Este efecto ha sido expuesto por el meteorólogo Edward Lorenz y está siendo desarrollado con el nombre técnico de *dependencia sensible de las condiciones iniciales*³. La expresión hace referencia y viene a explicar cómo es que una pequeña perturbación del estado inicial de un sistema puede traducirse, en un breve lapso de tiempo, en un cambio importante en el estado final del mismo. Volviendo al popular efecto de la mariposa, éste vendría a decir muy sintéticamente que «...*si agita hoy, con su aleteo, el aire de Pekín, una mariposa puede modificar los sistemas climáticos de Nueva York el mes que viene.*» (Gleick, 1988: 16).

Es esta dependencia sensible de las condiciones iniciales del sistema la que hace, por tanto, que la más mínima diferencia en la descripción del estado del sistema provoque cambios que hace distintos a sistemas complejos que, originariamente, eran tan parecidos como se les quiera suponer. En el campo de los sistemas políticos y/o sociales altamente inestables, esta característica significaría que la comparación del comportamiento de uno de esos sistemas inestables con otro de iguales características –por muy parecidos que el investigador crea que ambos sistemas son entre sí– no permitiría al científico social garantizar una predicción, respecto a la evolución del sistema, equivalente a otra ya ocurrida en otro sistema político o social de similares características.

En clara conexión con la dependencia sensible de las condiciones iniciales que comparten todos los sistemas caóticos, encontramos una segunda característica general que sería la *no-linealidad*. Como hemos visto, para la ciencia clásica, causa y efecto se corresponden totalmente y –aún más– se relacionan proporcionalmente. Es decir, en el ideal clásico, una buena teoría científica debería identificar y asociar plenamente un efecto –o fenómeno– con una causa; además, debería contemplar que una variación en la causa habría de provocar, igualmente, una variación proporcional en el efecto que se sigue de esa causa. Tal vez para los sociólogos, la implicación del supuesto matemático de linealidad pueda ser mejor entendido con esta frase: «*Una teoría lineal os da la totalidad desde las partes. Sumad las partes y tendréis la totalidad. (...). Una teoría no lineal no da el todo desde las partes. La suma de las partes no da la totalidad. Esta es la no linealidad. Los grupos no se portan como sus miembros.*» (Kosko, 1995: 110-111).

Una tercera característica de los sistemas caóticos viene dada por sus *formas complejas*, circunstancia ésta que implica una problematización de la escala en la que se efectúe la eventual medición del sistema. Como afirma Katherine Hayles: «*En la física clásica se considera que los objetos son independientes de la escala elegida para medirlos. Se supone que un círculo tiene una determinada circunferencia, ya sea que se lo mida con un metro o con una regla de una pulgada.*» (1993: 32). Ciertamente se supone que el cambio de escala puede aumentar la precisión, pero ello no afecta a la creencia en la existencia de una medida exacta que podría asociarse a la identidad del objeto. Pues bien,

ambos supuestos (cambio de escala asociado a la precisión y posibilidad de relacionar a un objeto con su medida exacta) funcionan a la perfección con las formas regulares —círculos, rectángulos, triángulos, etc.—, no así con las formas irregulares complejas tales como aquellas que podemos observar distraídamente en la naturaleza: costas marítimas, paisajes montañosos, movimientos de partículas de polvo en el aire o, sencillamente, nubes.

De esta tercera característica se derivan dos instrumentos analíticos cualitativos de la máxima actualidad. Nos estamos refiriendo a la *geometría fractal* (o *teoría geométrica de la medida*) y a la llamada *lógica borrosa* o más propiamente *teoría de conjuntos borrosos*. Sendas teorías se pronuncian respecto a la medición de las formas complejas en un mismo sentido: A mayor información sobre el objeto, mayor imprecisión sobre el mismo. Sorprendente ¿no? Y sin embargo, los científicos sociales suelen estar acostumbrados a este tipo de impresiones. Como escribiera en 1972 el autor de la teoría de conjuntos borrosos: «*A medida que aumenta la complejidad de un sistema, nuestra capacidad de hacer enunciados precisos y significantes sobre su comportamiento decrece hasta un umbral más allá del cual la precisión y la significatividad (o pertinencia) se vuelven casi características mutuamente excluyentes. ...A modo de corolario hay un principio que se puede enunciar sucintamente así: «Cuanto más de cerca se mira un problema del mundo real, tanto más borrosa se vuelve su solución».*» (Kosko, 1995: 147).

Si la precisión de la medida aumenta el grado de indefinición del objeto de investigación ¿cómo afrontar el estudio de los sistemas complejos inestables? La solución forma parte de un cambio de enfoque. En efecto, no se trata tanto de considerar el nivel de los elementos que forman el sistema como de fijarse y establecer las *simetrías recursivas entre niveles de escala*. Para exponer esta idea en términos sociológicos, diremos que esta operación —por ejemplo— fue la que el autor de este artículo, junto con Andrés García (sociólogo del Centro Europeo de Información a la población en Situaciones de Emergencia), puso en marcha para analizar la lamentación, multiplicación, caza de chivo expiatorio y guerra contra las autoridades, que el colectivo de taxistas madrileños inició a finales del año 1994 tras anunciarse el homicidio de dos de ellos. La escala no era más que una «escalada de violencia» que terminó colapsando una conocida plaza madrileña; la simetría recursiva se constituía en la forma social que Canetti, en su conocida obra *Masa y Poder*, describió como *muta*, esto es, un grupo de personas excitadas que nada desean con mayor vehemencia que ser más.

El análisis concluía en la sucesiva *mutación* de una clase de muta en otra. Es decir, en el paso de una muta de lamentación (grupo de personas que se reúnen para sentir duelo por la muerte de un semejante, de un próximo, de un igual —coincide con los momentos en los que se componen los primeros grupos de taxistas para conocer y condolerse mutuamente de las trágicas circunstancias en las que murieron dos de sus compañeros—) para, al ir aumentando en número de miembros, convertirse en una muta de multiplicación que, posteriormente (una vez conocidas las características físicas de los presuntos asesinos), se transforma en una muta de caza en busca de venganza, que concluye (tras no encontrar a sus potenciales víctimas) en una muta de guerra que descargó sus iras frente a todo

poder instituido que se puso a su alcance –incluidos, por supuesto, sus propios representantes gremiales.

Lo que exponemos a continuación sería, sin embargo, un ejemplo de simetría recursiva entre niveles de escala extraído de la física: *«(...) el flujo turbulento se puede representar con el modelo de pequeños torbellinos dentro de torbellinos mayores, albergados a su vez dentro de torbellinos aún mayores. En vez de tratar de seguir una molécula individual, como se haría en los flujos laminares, este método representa la turbulencia por medio de simetrías que se repiten en muchos niveles de escala. Se considera que los diferentes niveles están conectados a través de puntos de acoplamiento. En cualquiera de estos puntos de acoplamiento las fluctuaciones pequeñas pueden causar que el flujo evolucione de manera diferente, de modo que sea imposible predecir cómo se comportará el sistema.»* (Hayles, 1993: 33).

Por lo demás, esta cita nos lleva a las orillas del problema que se plantea en relación con la Teoría del Caos y su bifronte rostro epistemológico, esto es, respecto al motivo de la controversia entre enfoques científicos clásicos y perspectivas complejas de investigación. Y esta cuestión no es otra que la del *determinismo* y la *predicción*. En efecto, tradicionalmente para la ciencia clásica, si podemos determinar –en un instante– uno de los estados del sistema que queramos investigar y conocer la ley que rige la evolución de ese mismo sistema podremos entonces predecir el comportamiento, la posición futura de ese sistema, así como retrodecir cualesquiera de sus anteriores posiciones en el pasado. Ibáñez solía exponer con el ejemplo de las encuestas electorales la conexión que se producía entre determinismo y predicción, decía así: *«Para valorar las encuestas electorales debemos hacer dos preguntas: ¿en qué medida prevén el comportamiento electoral?, y ¿en qué medida lo determinan? La respuesta, como veremos, será única: la medida en que prevén el comportamiento electoral es la medida en que lo determinan (pues sólo es previsible lo que está determinado).»* (1997: 108). En la actualidad, no obstante, ni siquiera acerca de lo que está determinado puede garantizarse la posibilidad de que sea previsible. La Teoría del Caos ha acabado con esa conexión, los sistemas caóticos son deterministas (y en este sentido, son clásicos), conocemos –tan precisamente como queramos– la secuencia que les da origen, la ley que rige su evolución y, sin embargo, son impredecibles dada su dependencia sensible de las condiciones iniciales (y en este aspecto, mostrarían su carácter complejo).

Ibáñez apuntaba en ese mismo contexto a la reflexividad del sujeto social como explicación de la dificultad de predicción en los sistemas sociales, la Teoría del Caos –por su parte– incorpora mediante el concepto de dependencia sensible de las condiciones iniciales esa reflexividad. Es por esto que a la dependencia sensible de las condiciones iniciales cabría conceptualizarla en sus consecuencias como la reflexividad de los sistemas inestables, sean estos del tipo que sean. De su mano, historia y complejidad se integran en la matemática y en la física de nuestros días. De tal manera que la unión entre determinismo y predicción no es ya sino un caso particular dentro de una incertidumbre generalizada a medio y largo plazo. Para los científicos sociales, este hecho confirma –desde los últimos desarrollos de la física y de la matemática– que la

batalla por la cientificidad no debe buscarse en la precisión, como antesala tradicionalmente necesaria para la predicción. Sólo en los sistemas simples esto es así, es decir, que la precisión ayuda a la predicción. Por el contrario, en los sistemas complejos, y toda sociedad lo es, la precisión puede llegar a hacer más borrosa la comprensión del futuro.

Si tomamos como ejemplo el caso de un sistema social o político en situación de inestabilidad, lo anterior es tanto más cierto cuanto que el propio sistema está a expensas de que una perturbación, por insignificante y local que en los tiempos de calma pueda parecernos, se amplifique (efecto mariposa) hasta el punto de dejar de ser una perturbación del orden social y constituirse en el comportamiento que, finalmente, termine estructurando el sistema en su globalidad. El conocimiento preciso de las perturbaciones susceptibles de alcanzar una importancia significativa en la evolución del sistema social o político inestable implicaría someter a los centros reguladores del sistema a una crisis aún más aguda⁴. Como ha señalado Atlan, una crisis no supone meramente la destrucción de información, sino el hecho de la *creación de ruido* a partir de la información producida en el sistema mismo. En este contexto, la búsqueda de la precisión en la información acerca de las perturbaciones que afectan al sistema inestable, termina desencadenando una crisis en el nivel de interpretación de esa información⁵. ¿Qué clase de información y en qué cantidad será necesario disponer para calcular el comportamiento futuro de un sistema inestable? Como ha puesto de manifiesto Balandier, tal vez lo que debemos aceptar es que: «*La imprevisibilidad no es necesariamente el signo de un conocimiento falso o imperfecto; es el resultado de la naturaleza de las cosas, es necesario dejarle su lugar y su cualidad.*» (1989: 63).

BIBLIOGRAFÍA

Atlan, H. (1990): *Entre el cristal y el humo: Ensayo sobre la organización de lo vivo*, Madrid, Debate.

Balandier, G. (1989): *El desorden. La teoría del caos y las ciencias sociales. Elogio de la fecundidad del movimiento*, Barcelona, Gedisa.

Canetti, E. (1994): *Masa y poder*, Barcelona, Muchnik Editores.

Dobry, M. (1988): *Sociología de las crisis políticas*, Madrid, Centro de Investigaciones Sociológicas.

Gleick, J. (1988): *Caos: La creación de una ciencia*, Barcelona, Seix Barral.

Hayles, N. K. (1993): *La evolución del caos: El orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas*, Barcelona, Gedisa.

Ibáñez, J. (1997): *A contracorriente*, Madrid, Fundamentos.

Kosko, B. (1995): *Pensamiento borroso: La nueva ciencia de la lógica borrosa*, Barcelona, Grijalbo/Mondadori.

Lorenz, E. N. (1995): *La esencia del caos*, Madrid, Debate.

Prigogine, I. (1988): *¿Tan solo una ilusión? Una exploración del caos al orden*, Barcelona, Tusquets.

TEORÍA DEL CAOS

Se aproxima una crisis de percepción. La complejidad del mundo ha llevado al ser humano a simplificar la realidad, a abstraer la naturaleza para hacerla cognoscible y, tristemente, a caer en la trampa de la dualidad. Bien y mal; objetivo y subjetivo; arriba y abajo. Pero la tendencia a ordenarlo todo choca con la misma realidad, irregular y discontinua. Muchos científicos ya han renunciado a la ilusión del orden para dedicarse al estudio del caos, que acepta al mundo tal y como es: una imprevisible totalidad.

A mediados de este siglo, la evolución de la ciencia se vio alterada por una reflexión comparable a esta: "conocemos el movimiento de los planetas, la composición de las moléculas, los métodos para explotar la energía nuclear..., pero ignoramos por qué las cebras tienen manchas o el motivo de que un día llueva y al siguiente haga sol". La búsqueda de una explicación a los fenómenos naturales que observamos, complejos e irresolubles mediante fórmulas, configuró lo que se conoce como Teoría del Caos, una disciplina que, si bien no niega el mérito de la ciencia clásica, propone un nuevo modo de estudiar la realidad.

Un ligero vistazo a nuestro alrededor advierte de la tendencia general al desorden: un cristal se rompe, el agua de un vaso se derrama... nunca ocurre al revés. Pero, contrariamente a lo que se piensa, este desorden no implica confusión. Los sistemas caóticos se caracterizan por su adaptación al cambio y, en consecuencia, por su estabilidad. Si tiramos una piedra a un río, su cauce no se ve afectado; no sucedería lo mismo si el río fuera un sistema ordenado en el que cada partícula tuviera una trayectoria fija; el orden se derrumbaría.

Las leyes del caos ofrecen una explicación para la mayoría de los fenómenos naturales, desde el origen del Universo a la propagación de un incendio o a la evolución de una sociedad. Entonces, ¿por qué lleva la humanidad tantos siglos sumida en el engaño del orden? El problema parte del concepto clásico de ciencia, que exige la capacidad para predecir de forma certera y precisa la evolución de un objeto dado. Descartes aseguraba que si se fabricara una máquina tan potente que conociera la posición de todas las partículas y que utilizara las leyes de Newton para saber su evolución futura se podría predecir cualquier cosa del Universo. Esta afirmación, tan reduccionista como audaz, ilustra la euforia científica tras el descubrimiento de Neptuno gracias a las leyes de gravitación de Newton. Un hito científico que impuso el orden, el determinismo y la predicción en la labor investigadora y limitó los objetivos a los fenómenos que coincidieran con el patrón previo. Lo demás (turbulencias, irregularidades, etcétera) quedó relegado a la categoría de ruido, cuando ese ruido abarcaba la mayoría de lo observable. Los físicos se dedicaron - y se dedican - a descomponer sistemas complejos corrigiendo lo que no cuadraba

con la esperanza de que las pequeñas oscilaciones no afectaran al resultado. Nada más lejos de la realidad.

EL FANTASMA DE LA NO LINEALIDAD

A finales del siglo pasado, el matemático y físico Henri Poincaré cuestionó la perfección newtoniana en relación con las órbitas planetarias, lo que se conoce como el problema de los tres cuerpos. Planteaba una atracción gravitatoria múltiple, que hasta entonces se resolvía con las leyes de Newton y la suma de un pequeño valor que compensara la atracción del tercer elemento. Poincaré descubrió que, en situaciones críticas, ese tirón gravitatorio mínimo podía realimentarse hasta producir un efecto de resonancia que modificara la órbita o incluso lanzara el planeta fuera del sistema solar. Este devastador fenómeno se asemeja al acople del sonido cuando un micrófono y su altavoz se encuentran próximos: el sonido que emite el amplificador vuelve al micrófono y se oye un pitido desagradable. Los procesos de realimentación se corresponden en física con las ecuaciones iterativas, donde el resultado del proceso es utilizado nuevamente como punto de partida para el mismo proceso. De esta forma se constituyen los sistemas no lineales, que abarcan el 90% de los objetos existentes. El ideal clásico sólo contemplaba sistemas lineales, en los que efecto y causa se identifican plenamente; se sumaban las partes y se obtenía la totalidad. Poincaré introdujo el fantasma de la no linealidad, donde origen y resultado divergen y las fórmulas no sirven para resolver el sistema. Se había dado el primer paso hacia la Teoría del Caos.

SEGUNDO PASO: EL EFECTO MARIPOSA

"Espero que Dios no sea tan cruel para hacer que el mundo esté dirigido por fórmulas no lineales", comentaban algunos científicos en la década de los 50. Resultó que, en efecto, la naturaleza se regía por ellos. En consecuencia, como indica Ignacio García de la Rosa, astrofísico del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), "el término 'no lineal' es un poco injusto; sería como llamar a los animales elefantes y no elefantes, pero como en aquellos tiempos no se podían estudiar estos sistemas, se redujo la terminología". En este caso, la panacea se manifestó en forma de ordenador que, aunque no podía resolver la naturaleza no lineal mediante fórmulas, permitía realizar simulaciones.

En 1960, el meteorólogo Edward Lorenz dio, sin proponérselo, el segundo paso hacia la Teoría del Caos. Entusiasta del tiempo, se dedicaba a estudiar las leyes atmosféricas y realizar simulaciones a partir de sus parámetros más elementales. Un día, para estudiar con más detenimiento una sucesión de datos, copió los números de la impresión anterior y los introdujo en la máquina. El resultado le conmocionó. Su tiempo, a escasa distancia del punto de partida, divergía algo del obtenido con anterioridad, pero al cabo de pocos meses - ficticios- las pautas perdían la semejanza por completo. Lorenz examinó sus números y descubrió que el problema se hallaba en los decimales; el ordenador guardaba seis, pero para ahorrar espacio él sólo introdujo tres, convencido de que el resultado apenas se resentiría. Esta inocente actuación fijó el final de los pronósticos a largo plazo y puso de manifiesto la extrema sensibilidad de los sistemas no lineales: el llamado "efecto mariposa" o

"dependencia sensible de las condiciones iniciales". Se trata de la influencia que la más mínima perturbación en el estado inicial del sistema puede tener sobre el resultado final o, como recoge el escritor James Gleick, "si agita hoy, con su aleteo, el aire de Pekín, una mariposa puede modificar los sistemas climáticos de Nueva York el mes que viene". Cualquier variación, ya sea en una milésima o una millonésima, constituye una pequeña muesca que modificará el sistema hasta el punto de hacerlo imprevisible. La iteración ofrece resultados estables hasta cierto punto, pero cuando éste se supera el sistema se derrumba en el caos. Los científicos J. Briggs y F. D. Peat aplican esta idea al ciclo vital humano: "Nuestro envejecimiento se puede abordar como un proceso donde la iteración constante de nuestras células al fin introduce un plegamiento y una divergencia que altera nuestras condiciones iniciales y lentamente nos desintegra".

TERCER PASO: DIGIRIENDO LA COMPLEJIDAD

El carácter no lineal e iterativo de los sistemas de la naturaleza permite que instrucciones muy sencillas originen estructuras extremadamente complejas. La física de la complejidad busca reglas simples que expliquen estos organismos complejos. El astrofísico Ignacio García de la Rosa parte de la pirámide de la evolución (que incluye quarks, núcleos atómicos, átomos, moléculas simples, biomoléculas células, organismos y sociedades) para tratar la complejidad: "La mayor parte de la materia -señala- se encuentra en los estadios inferiores y no forma elementos más desarrollados, de modo que la pirámide va cerrándose; nosotros somos una minoría en comparación con todo el material que hay en el Universo. La pirámide va de la abundancia de lo sencillo a la complejidad de lo escaso".

Este concepto guarda relación con el de lenguaje, que parte de las letras y pasa por las palabras, frases, párrafos, capítulos, libros, etc... con la peculiaridad de que las letras no tienen nada que ver con las palabras y así sucesivamente. Del mismo modo que la "z" no está emparentada con el concepto de "azul", las moléculas que dan origen a una cebra no determinan su constitución. Las estructuras complejas tienen propiedades ajenas a los ingredientes anteriores, lo que plantea un problema para la ciencia, que pierde su capacidad de predicción.

En la física clásica se presupone que los objetos son independientes de la escala que se emplee para medirlos y que existe la posibilidad de relacionarlos con su medida exacta. No así en la geometría fractal y la lógica borrosa, instrumentos empleados por los científicos del caos. Bart Kosko, autor de la llamada lógica borrosa, afirma de modo tajante que "cuanto más de cerca se mira un problema en el mundo real, tanto más borrosa se vuelve su solución".

Pero si la precisión difumina aún más el objeto de estudio, ¿qué estrategia debe emplearse para estudiar los sistemas complejos? Aquí interviene la teoría de la totalidad, que concibe el mundo como un todo orgánico, fluido e interconectado. Si algo falla no debe buscarse la "parte dañada", como en el caso de un televisor o una lavadora, sino que hay que revisar el sistema al completo, se trata de una unidad indisoluble. El gran error histórico de la

ciencia consiste en observar la naturaleza de modo fragmentado y explicarlo todo mediante la suma de partes, ignorando dos cuestiones primordiales: la imposibilidad de "meter la totalidad en el bolsillo", porque el bolsillo también forma parte de ella, y la dependencia que existe entre el observador, lo observado y el proceso de observación; el hombre integra la realidad, de modo que su mera presencia altera el objeto de estudio.

La obsesión por interpretar el caos desde el punto de vista del orden debe dejar paso a una interpretación global, que salva las fronteras de las diferentes disciplinas y acepta la paradoja que convierte lo simple y lo complejo, el orden y el caos, en elementos inseparables. De hecho, lo más complejo que ha concebido el hombre, el fractal de Mandelbrot, se creó a partir de una ecuación iterativa muy simple; el caos es una inagotable fuente de creatividad, de la que puede también surgir el orden (y viceversa). Las civilizaciones antiguas creían en la armonía entre el caos y el orden, y definían el caos como una "suerte de orden implícito". Quizá sea el momento de hacerles caso.

Libro:

Douglas R. Hofstadter

Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid

Basic Books, 1979
(Pulitzer Prize Winner, 1980)

Writing a book is an art. However, this normally does not refer to nonfiction books, especially scientific ones. Douglas R. Hofstadter's literary marvel is *the* exception. It is a philosophy book that reads like music, a work of art that many consider second to none.

Gödel, Escher, Bach (GEB) debates the question of consciousness and the possibility of artificial intelligence. It is a book that attempts to discover what "self" really means. Introducing the reader to cognitive science, *Gödel, Escher, Bach* draws heavily from art to illustrate fine points in mathematics. The works of M.C. Escher and J.S. Bach are discussed, in addition to other works of art and music. The topics presented range from mathematics and meta-mathematics to programming, recursion (in math as well as in computing), formal systems, multilevel systems, self reference, self representation, and others.

Before each of *GEB*'s twenty chapters, Hofstadter includes a dialogue, in which Achilles, the Tortoise, and their company discuss various aspects that will later be examined by the author in the chapter to follow. In writing those dialogues, Hofstadter created a whole new form of art. Concepts are presented by the dialogues on two different levels, simultaneously: *form* and *content*. The more obvious level, that of content, presents each idea directly, by providing the views of the merry band -- sometimes right, often wrong, and always funny. The true joy, however, lies in discovering the way in which Hofstadter interweaves the very same ideas into the physical *form* of the dialogue. The form deals with the same mathematical concepts discussed by the characters, and reminds the

reader of the musical pieces by Bach and printed works by Escher that the characters mention directly in their talks.

A simple example is the dialogue preceding Chapter III. Called "*Sonata for Unaccompanied Achilles*", this dialogue directly quotes only one character, Achilles, while he converses over the phone with his friend the Tortoise. They talk about the mathematical notion of figure and ground: how, by defining one subset of a given set, you implicitly define another subset of that same set -- the part that is *not* included in the first subset. In the visual arts, this is best exemplified by Escher's *Mosaic* lithographs, where the shapes that form the background for a group of black "phantasmagorical beasts" define another set of figures, in white. The musical example that Hofstadter uses is Bach's Sonatas for Unaccompanied Violin, where the listeners' imagination fill in "between the notes" as the violin plays, and one often imagines hearing the accompanying piano. But the form of the dialogue pulls the very same trick, as the reader can easily imagine the Tortoise answering Achilles at the other end of the line!



Part of Mosaic II by M.C. Escher

Another example is the "*Crab Canon*", preceding Chapter VIII. This short but highly amusing piece can be read, much like the notes of Bach's *Crab Canon*, in either direction -- from start to finish or from finish to start, resulting in the very same text. Fiendishly complex to write (or translate), the artistic beauty of that dialogue at least equals that of Bach's piece or Escher's drawing of the same name.

But this is only the tip of the iceberg. Other issues discussed in *GEB* include, for example, self-reference and self-representation, both of which Hofstadter considers to be crucial parts of any attempt to understand what intelligence really is. Self-reference (self-ref for short) is the notion of an object, physical or conceptual, that references its own self in some manner. A person talking about himself, or even just pointing at himself, is self-referencing. Another simple instance of self-reference is the one-line paradox: "*This Sentence is False*". It is easy to see that texts that reference themselves, even if they are as short as the example cited above, can lead to amusing or paradoxical results.

Self-representation (self-rep), on the other hand, is the more complex notion of an object that includes, within itself, a complete representation of itself. This is more complicated to achieve, but one easy to grasp example would be a mirror

facing another mirror. Each of these mirrors contains a complete representation of itself (in fact, it contains an infinite number of such complete self-representations, each smaller than the other).

By playing around in an amusing manner with these, and many other, mathematical concepts, Hofstadter slowly and gently introduces the reader to more advanced mathematical ideas, like formal systems, the Church-Turing Thesis, Turing's Halting Problem and (eventually) Gödel's Incompleteness Theorem.

GEB discusses some very serious matters, and it is not an easy book to tackle. However, it is very enjoyable to read, as Hofstadter augments each subject with examples from very diverse sources. The joy of discovering the puns and other playful gems hidden in the book is part of what makes it so special. Anecdotes, word plays and Zen koans are additional aspects that help make *GEB*'s 777 pages an experience that many readers consider to be a turning point in their lives.

Like every other book published by Hofstadter, *GEB* has an index and a bibliography that must be noted as exceptionally well done.

It is interesting to note that while *GEB* is full of English wordplay, it is in no way tied to the American origin of its author. For years, the book was considered "impossible to translate", but the first translation (to French, done by Robert French and Jacqueline Henry with the help of Hofstadter himself and published in 1985) opened the gate to a flood of additional translations. So far, *GEB* was translated into French, German, Spanish, Chinese, Swedish, Dutch, Italian and Russian. In his latest book, *Le Ton beau de Marot: In Praise of the Music of Language*, Hofstadter discusses translations of *GEB* and the art of translation in general. It is not, however, merely a book about translation, as it might appear at first glance.