
EL CAOS: EL JARDIN

DE LOS SENDEROS QUE SE BIFURCAN

L. E. GUERRERO *

El ordenamiento caótico

El ordenamiento reciente de computadoras rápidas y de poderosas técnicas de análisis rompió las limitaciones que la física y la matemática

tradicionalmente arrastraban para emprender la investigación sistemática y detallada de las propiedades del mundo real, ya no del ideal, y abrió un campo de trabajo fundamentalmente nuevo.

El mundo está lleno de comportamientos "complejos" que violentan el sentido común a la vez que entusiasman por su belleza extraordinaria.

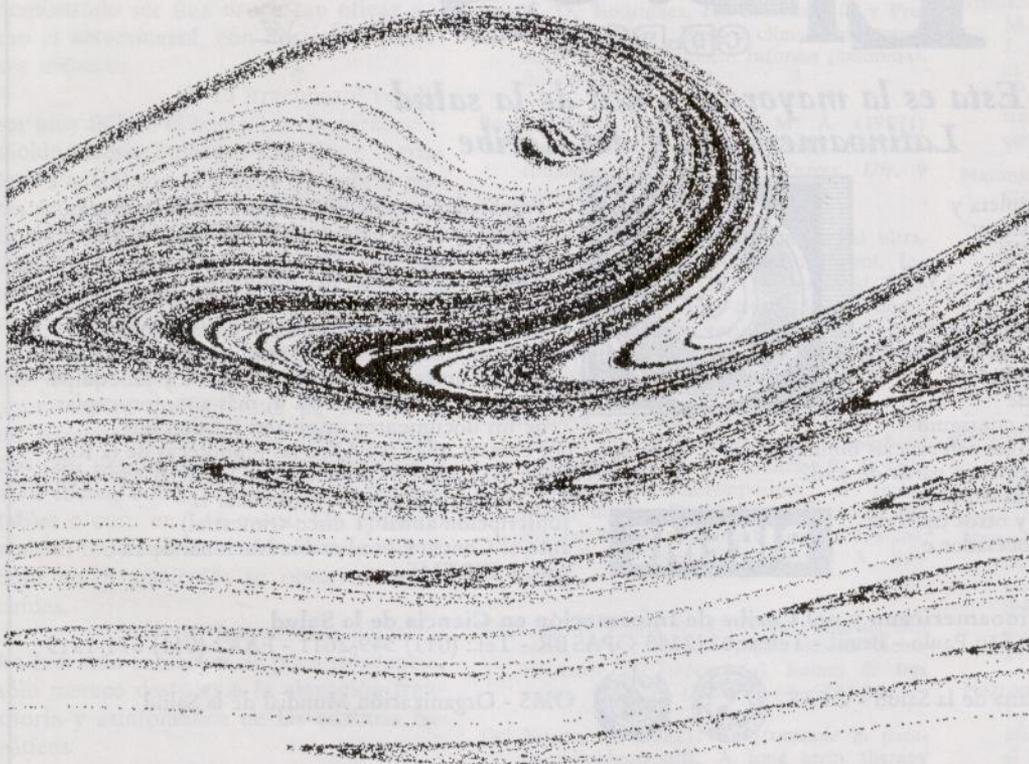
El caos temporal es uno de estos fenómenos a los que es-

tamos haciendo referencia; el caos consiste en la generación *espontánea* de un comportamiento *aparentemente* aleatorio por parte de un sistema natural (un péndulo, una llama, un grifo que gotea, o bien el clima) o un modelo matemático o físico.

Por *caos* también se entiende la pérdida de toda nuestra capacidad de predecir el comportamiento de sistemas que carecen de elementos de aleatoriedad introducidos desde afuera. El mecanismo del caos remueve sistemáticamente la información que se tenga del sistema en un instante dado, haciendo imposible predecir el comportamiento pasado.

Es necesario recalcar que se trata de un fenómeno estrictamente temporal y a nivel macroscópico; la incertidumbre relacionada con la mecánica cuántica, la cual no permite conocer con precisión infinita y de manera simultánea la posición y la velocidad de una partícula, no es la causa del comportamiento caótico. Asimismo, sistemas de gran simplicidad exhiben el fenómeno en cuestión, pues la génesis del fenómeno no está en la complejidad o en la estadística.

* L. E. Guerrero es investigador del Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Apartado 21827, Caracas 1020A, Venezuela.



"El Ojo del Pez", cortesía de Christian Read.



Hacemos hincapié en que el caos no debe ser entendido como simple desorden. Es mucho más apropiado considerarlo como una clase de orden sin periodicidad. Hay un orden en el caos: subyacente al comportamiento caótico hay formas geométricas elegantes que engendran aleatoriedad tales como la figura que acompaña al presente texto. Estas muestran la posición contra la velocidad de un péndulo tomadas en el tiempo de manera estroboscópica.

La Bifurcación en el Tiempo

"Me detuve, como es natural, en la frase: *Deja a los varios porvenires (no a todos) mi jardín de senderos que se bifurcan*. Casi en el acto comprendí; el jardín de los senderos que se bifurcan era la novela caótica: la frase *varios porvenires (no a todos)* me sugirió la imagen de la bifurcación en el tiempo, no en el espacio".

Jorge Luis Borges

El Jardín de los Senderos que se Bifurcan

Uno de los caminos hacia el caos, la cascada de duplicación de período, está asociado al nombre de Mitchell Feigenbaum quien logró en 1978 un impacto sensible con su hallazgo de ciertas propiedades caracterizadas por números muy precisos, los cuales son siempre los mismos en sistemas de los más variados tipos (mecánicos, hidrodinámicos, circuitos, etc.) que presenten el escenario en referencia.

Esta ruta al caos consiste en que al ser incrementada, por ejemplo, la amplitud de la corriente alterna suministrada a un circuito que posea un elemento no-lineal (por ejemplo, un diodo), la respuesta del sistema transita a través de una sucesión de inestabilidades. La corriente que alimenta al circuito tendrá una alternabilidad en uno y otro sentido, alternabilidad que toma en realizarse un cierto tiempo, el cual se conoce como período. El circuito tendrá inicialmente una respuesta con el mismo período que la corriente que lo excita; al incrementar la amplitud de la corriente se encuentra una primera transición; aparece una respuesta adicional que duplica el período de la corriente de alimentación. Un evento de esta naturaleza es un buen ejemplo de lo que se conoce como *bifurcación*.

La duplicación de los períodos que exhibe la respuesta del circuito se repite de nuevo una y otra vez. Los umbrales de aparición de estas bifurcaciones sucesivas aparecen más próximos cada vez, alcanzándose de esta suerte un cierto punto, llamado de acumulación, para el cual existe en principio una multiplicación del período base hasta el infinito. Se alcanza entonces el umbral del caos.

Adicionalmente, existe toda una diversidad de escenarios conducentes al caos por



la vía de distintos senderos que se bifurcan y que abarcan un sinnúmero de posibilidades.

El ocaso del método

Hasta fecha reciente los métodos de la física teórica estuvieron dominados y limitados por ecuaciones y métodos de alcance más bien limitado; ello hizo que los efectos no-lineales fuesen tratados sólo como aproximaciones de problemas que sí se podían resolver exactamente (valga como ejemplo el aproximar el seno de un ángulo por el ángulo, esto es, no considerarlo íntegramente).

En contraste, la no-linealidad, al ser tratada en toda su complejidad resolviendo la ecuación que describe completamente el sistema valiéndose del uso de computadoras, resulta en fenómenos cualitativamente nuevos que no pueden ser alcanzados por la vía de las aproximaciones. Como ejemplo mencionemos toda la riqueza que ocultó hasta los años ochenta la sencilla ecuación que describe el movimiento de un péndulo.

El violento contraste de la física no-lineal con la física ortodoxa, debemos entenderlo como la negación del posible convencimiento de que había una manera definitiva de hacer las cosas y que por tanto la física del futuro sería sólo una versión trabajada al detalle de la ya conocida. En este sentido, dos conceptos de viejo arraigo, el *determinismo* y el *reduccionismo*, han sentido el impacto de los desarrollos recientes en el campo que nos ocupa.

Ya la mecánica cuántica, al afirmar la imposibilidad de determinar simultáneamente con arbitraria precisión la posición y la velocidad de una partícula, había socavado el determinismo. La pérdida de la capacidad de predecir el comportamiento de un sistema a partir de su comportamiento pasado pone



en entredicho el determinismo en su propio terreno, la mecánica clásica.

El reduccionismo, por su parte, que llegó a ser el método mismo de la Física, debe ser abandonado pues la no-linealidad impide simplificar el estudio por la vía de la descomposición y la superposición de efectos o partes.

El campo de trabajo de la Física no-lineal aumenta sensiblemente nuestra capacidad de entender el mundo *real* ya que, además de abarcar una fenomenología soslayada en el pasado, con conceptos y métodos nuevos y poderosos, ha desarrollado su formalismo incorporando desde el principio los fenómenos en los cuales no se conserva la energía (es decir, fenómenos disipativos) y la *geometría fractal*, la cual a diferencia de la geometría euclídea, pretende dar cuenta de las formas que usualmente encontramos en la Naturaleza (por ejemplo, las formas de árboles, montañas y costas).

El interés por el fenómeno caótico se debió en parte a la perspectiva de que la turbulencia (propia de sistemas con infinitos grados de libertad) pudiese ser explicada; sin embargo, en la actualidad el comportamiento caótico aparece como un fenómeno bien entendido y distinto a los regímenes turbulentos, que presentan un mayor desorden en espacio y tiempo, y se entienden mucho menos.