



¿Es tan CAÓTICO el CAOS?

Rosario Aldana-Franco, Ana G. Gutiérrez-García
y Carlos M. Contreras

El término “caos” (del griego $\chi\acute{o}\sigma$: “apertura, oscuridad insondable”) usualmente se refiere a los acontecimientos aparentemente aleatorios, es decir, los que ocurren sin un orden; este uso parecería ser inamovible, al menos a primera vista. Sin embargo, la teoría del caos se centra en la noción de que el análisis de lo *aparentemente* impredecible conduce al esclarecimiento de un orden. El caos es determinable, y no es aleatorio porque tiene un orden subyacente.

Un proceso caótico puede *parecer* aleatorio (al azar, sin orden), pero el análisis total del proceso lleva a distinguir algunos episodios ordenados (que dejan de ser caóticos), entremezclados con otros aleatorios (de los que quizá sólo se desconocen, de momento, las reglas que establecen su causalidad).

Por ejemplo, un proceso aparentemente aleatorio es jugar a la Lotería Nacional (o al Progol), pero si se toma en cuenta el número de billetes que se expiden (o equipos en contienda) y el número total de premios posibles (o los resultados: ganar, perder o empatar), se establece una *probabilidad*. Lo cierto es que la probabilidad de ganar la Lotería o el Progol es mínima. Pero tomemos el segundo caso, el concurso Progol: si compiten doce equipos, y cada partido tiene tres posibles finales, las combinaciones posibles son N^n , donde N es el número de equipos y n son las posibilidades. Saque usted su cuenta: ¡sólo gana una! Queda ahora claro que el proceso no es aleatorio; este caso sigue un orden en términos de probabilidad.

Considerando otro caso, pudiera parecer que la predicción del clima está llena de errores (con perdón

de mis amigos climatólogos); que es caótica. En realidad, esto es falso. Lo que sucede, como se verá más adelante, es que hay una creencia extendida, que raya en la superstición, de suponer que los fenómenos ordenados son sólo aquellos que siguen *relaciones lineales*; es decir, en los que cuando una variable cambia, también la otra lo hace (aumenta o disminuye) siempre en la misma proporción.

Esta aproximación conceptual ayudó a resolver muchos problemas entre el siglo IV antes de nuestra era y el XIV de la era actual; todo lo estudiado era lineal, y no se aceptaba la existencia de lo que saliera de esa norma, so pena de sucumbir en la hoguera, después de un embrutecedor pero muy doloroso proceso instrumental previo de “analgesia”. Pero también es cierto que fueron más las preguntas que se consideraron misterios insolubles que los aciertos.

La presencia de nubes tipo *nimbus* garantiza un buen clima, siempre y cuando no haya viento y la temperatura no varíe. Los climatólogos han aprendido muy bien a predecir en términos de probabilidad el clima, cuando toman en cuenta, por experiencia, los múltiples factores que lo determinan. Esto está muy lejos del concepto de los procesos lineales: lo aleatorio desaparece, y se establece un sistema caótico con niveles de orden diferentes a los de un sistema lineal, y tomando en cuenta que la sensibilidad de un sistema varía si las condiciones de entrada también lo hacen, y por tanto los resultados pueden ser inesperados.

Conviene destacar que la no linealidad y sensibilidad de las condiciones de entrada de los sistemas son

El comportamiento de un sistema caótico es complejo e impredecible por ahora, porque no se han desarrollado las teorías y los modelos experimentales que nos permitan comprenderlo

los aspectos más importantes en los procesos caóticos, y que la teoría del caos puede aplicarse a toda ciencia, pero no se descarta ni el desorden aparente, ni lo que parece ser el “ruido de fondo” de un comportamiento lineal. Su aplicación puede conducir a la comprensión de diversos procesos aparentemente desordenados, como la actividad neuronal, la conducta y la organización social, por ejemplo.

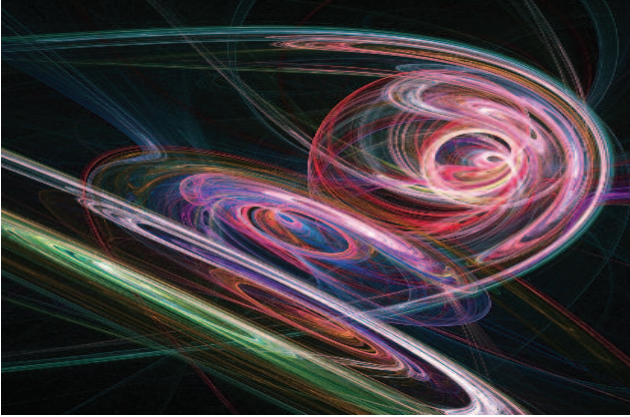
En los sistemas lineales el incremento de una *variable independiente* produce un cambio proporcional en una *variable dependiente*, lo que suele interpretarse como un fenómeno de causa-efecto que puede ser explicado con una sencilla relación matemática. Por ejemplo, cuando un automóvil se mueve a velocidad constante, a medida que pasa el tiempo el auto recorre una cierta distancia. En cambio, en los sistemas no lineales, cuando cambia la variable independiente, no se produce un cambio proporcional en la variable dependiente. Por ejemplo, si observamos el mismo automóvil del ejemplo anterior, pero ahora sometido a una aceleración (como al desplazarse pendiente abajo), ya no se moverá a velocidad constante: ésta se incrementará en función de la aceleración a la que es sometido, y la distancia que recorra no depende solamente del tiempo transcurrido. Por tanto, durante algunos segundos recorrerá una cierta distancia, pero a continuación, en un lapso semejante, la distancia recorrida será mayor. El proceso de desplazamiento de un cuerpo a velocidad constante o con aceleración constante (con-

diciones ideales) es ordenado, pero deja de serlo si la aceleración cambia.

La noción fundamental de la ciencia en el siglo XVIII fue el *determinismo*, doctrina filosófica formulada por Pierre-Simon Laplace, quien sostuvo que todo acontecimiento físico, incluido el pensamiento y las acciones humanas, están regidos por la irrompible cadena causa-consecuencia. Así, las leyes de la física se consideraban fundamentales en el universo y se expresaban de manera estrictamente determinista; es decir, se pensaba que era posible pronosticar qué ocurriría en cualquier instante, porque podía modelarse con ecuaciones matemáticas. Este concepto constituyó durante mucho tiempo la noción fundamental de la ciencia. Pero hacia el final del siglo XIX surgieron preguntas que no podían ser resueltas con supuestos deterministas. Tratar de solucionar este tipo de problemas llevó a los físicos a la teoría de la relatividad, por un lado, y de la mecánica cuántica, por otro; ambas restringieron las aplicaciones de la mecánica clásica. Las relaciones entre variables dejaron de ser puramente lineales; quizá nunca lo fueron.

Hacia finales del siglo XIX, Henri Poincaré intentó resolver el “problema de los tres cuerpos”, que consiste en determinar la posición relativa de tres cuerpos celestes en cualquier instante. La deducción de las ecuaciones que permiten la predicción de la posición de dos cuerpos es simple, y su gráfica es una elipse, pero para tres cuerpos sólo se han deducido ecuaciones para obtener aproximaciones válidas para un intervalo de tiempo dado. Al intentar definir las ecuaciones para determinar la posición de cada uno de los tres cuerpos





celestes, en cualquier momento, Poincaré encontró que el sistema representa un comportamiento extremadamente complicado, tanto que imposibilita hacer predicciones a largo plazo, porque una pequeña causa que pase desapercibida determinará un considerable efecto que es imposible ignorar. También supuso que si se conocieran exactamente las leyes de la naturaleza y la situación del universo en el momento inicial, se podría predecir con precisión la situación del universo en un momento posterior. Pero aun si fuera el caso que las leyes de la naturaleza no guardasen secretos, todavía el investigador conocería la situación inicial sólo aproximadamente, lo que únicamente le permitiría predecir la situación posterior con imprecisiones. Finalmente, Poincaré no resolvió el problema totalmente, pues no pudo predecir la trayectoria de cada uno de los tres cuerpos, ya que si al menos uno de los cuerpos celestes cambia su posición inicial, la trayectoria de los tres cuerpos cambia totalmente. Sin embargo, la importancia de su investigación tuvo repercusiones años más tarde en la forma de concebir el mundo y el papel de la ciencia porque fue el primer científico que consideró el caos en un sistema determinista.

Esas ideas contribuyeron de manera importante para la formulación de la teoría de la relatividad, desarrollada junto con Hendrik Lorentz y Albert Einstein, y que a su vez sirvieron como base al meteorólogo Edward Lorenz para que, en 1960, intentara definir un conjunto de ecuaciones para predecir el clima. En un sistema caótico, como el clima, una causa tan sutil como el aleteo de una mariposa podría tener consecuencias inesperadas y extremas como un huracán en es-

pacios distantes entre sí. Se afirma que el clima es un sistema caótico porque sus variables, como la velocidad del viento, la temperatura atmosférica y la humedad, por ejemplo, cambian de manera compleja y errática, tanto que es imposible determinar todos los estados futuros del sistema con un modelo matemático simple. Posteriormente, se descubrieron comportamientos similares en campos diversos como la genética, la química, la dinámica de fluidos, la economía y la fisiología; por esta razón, se les llama sistemas caóticos o complejos.

Actualmente el concepto de caos se usa en la vida cotidiana con el significado de confusión y desorden, aunque desde hace tres décadas en el ámbito científico y en particular entre los estudiosos de los sistemas complejos, “caos” no significa desorden absoluto, sino un comportamiento regido por factores determinísticos, pero con un nivel significativo de complejidad que, debido a la imposibilidad, históricamente pasajera, de predecir su comportamiento, puede dar la apariencia de desorden.

El comportamiento de un sistema caótico es complejo e impredecible por ahora, porque no se han desarrollado las teorías y los modelos experimentales que nos permitan comprenderlo.

Caracterización del caos

Los sistemas caóticos exhiben tres rasgos característicos:

- 1) Son *deterministas*, es decir, no azarosos, porque existen ecuaciones matemáticas que determinan su comportamiento. Quizá la ecuación de Mountcastle sea un buen ejemplo de un caso determinista: el gran neurofisiólogo de ese apellido demostró que las neuronas de la corteza somatosensorial del cerebro son más activas cuando mayor sea el ángulo de la articulación de la rodilla. Así funciona la propiocepción, que informa al cerebro de la posición de las articulaciones del cuerpo. Pero para lograr entender este fenómeno, Mountcastle tuvo que usar valores logarítmicos, para forzar la curva experimental a algo más parecido a una recta; es decir, a un sistema determinista.

- 2) Son *sensibles a las condiciones iniciales*, porque un cambio muy pequeño en los datos de inicio producen resultados totalmente diferentes al final. Por ejemplo, el desempeño (*performance*) de una persona en un *test*, que puede estar influido por un estado previo de ansiedad.
- 3) *Parecen desordenados, pero no lo son*, porque hay reglas que determinan su comportamiento (lo que pasa es que aún no las conocemos todas). Se pueden modelar con ecuaciones matemáticas deterministas, pero presentan *atractores*. Un atractor, en teoría del caos, es la representación geométrica de la dinámica del sistema en el tiempo. Un atractor es como un imán que atrae al sistema. Por ejemplo, en un huracán, el *ojo* –la parte casi central donde no hay vientos fuertes ni lluvia– es el atractor del sistema, y en su entorno se mueven partículas describiendo órbitas irregulares. Algunas de ellas coinciden entre sí; otras no, pero todas tienen como referente central al ojo del huracán.

Cabría agregar a estas características la autoorganización y la intermitencia. La primera es el proceso por el cual la organización de los sistemas complejos se crea, reproduce o mejora (Maturana y Varela, 1973), mientras que la intermitencia es la interrupción y continuación sucesivas a intervalos regulares. Por ejemplo, después de una lesión cerebral, todo el sistema nervioso entra en un proceso de autoorganización, modificando

la sensibilidad y aumentando la posibilidad de formar nuevos contactos sinápticos, con lo que el sujeto recupera funciones perdidas mediante el proceso de plasticidad cerebral. El enfermo no será el mismo después de la lesión y aun de la recuperación, y por tanto recurrirá a una buena cantidad de estrategias que le permitirán suplir aquellas funciones que no se recuperaron del todo; por ejemplo, la *parafasia* (deformaciones o sustituciones completas de palabras) que se presenta en pacientes con *afasia* expresiva (pérdida de la capacidad de producir el lenguaje) después de una lesión del área de Broca, que les permite comunicarse, así sea de manera imperfecta; un ejemplo de intermitencia.

La autoorganización es una característica de la complejidad porque un sistema caótico cambia su estructura interna para permanecer. Un caso es la evolución biológica, en la que los ácidos nucleicos mutan para adaptarse a los cambios del medio ambiente, y aquellas especies en las que esto no ocurre, desaparecen. Un sistema complejo es intermitente porque no siempre está exhibiendo caos; alterna este comportamiento con episodios de orden. Por ejemplo, al hacer girar un trompo en una superficie plana y horizontal, se pueden observar pequeños tambaleos mientras gira; en un principio el movimiento es ordenado, con unos cuantos tambaleos (caos) ocasionales. Pero éstos se van incrementando con el paso del tiempo, hasta que se extingue el movimiento.

Se puede también hablar de *resonancia*; tal podría ser el caso de las cepas de virus que durante algún tiempo adquieren mayor virulencia, la cual (ojalá) tiende luego a desvanecerse. Cuando un sistema entra en resonancia, su comportamiento puede describirse en forma de ondas que cada vez adquieren mayor fuerza. Tómese por caso el movimiento de un edificio durante un temblor, que se sincroniza con el de la tierra. La fuerza desplazada es cada vez mayor, hasta que el edificio termina por romperse. De ahí la relevancia de que los sistemas de *retroalimentación*, que tantos dolores de cabeza han evitado a los investigadores de prácticamente todas las áreas, sean sistemas autorregulados.

Por el contrario, ¿es posible hablar de un sistema psicosocial en resonancia? Claro que sí: en la reacción de pánico que afecta a varios individuos al mismo tiempo (quizá en algún tiempo la llamada “psicosis colecti-



va”), la situación, se dice, es caótica. Está fuera de todo orden conocido o benigno, pero no ocurrió al azar. Tiene reglas y una secuencia, aunque sólo parcialmente conocidas.

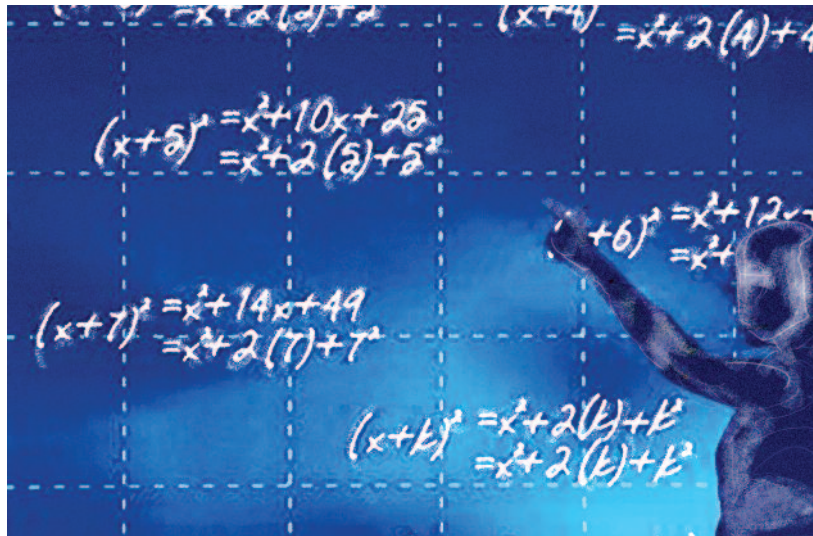
Teoría del caos

La teoría del caos es la rama de las matemáticas y la física que trata ciertos tipos de comportamientos impredecibles de los sistemas dinámicos, llamados así porque cambian a lo largo del tiempo, y se pueden clasificar básicamente en estables, inestables y caóticos. Un sistema *estable* tiende a lo largo del tiempo a un punto u órbita, según su atractor. Un sistema *inestable* tiende a escapar de sus atractores. Y un sistema *caótico* manifiesta los dos comportamientos; es decir, por un lado existe un atractor que atrae al sistema, pero a la vez hay “fuerzas” que lo alejan de éste. Así, tiene etapas predecibles por aproximaciones deterministas y etapas aparentemente aleatorias.

La teoría del caos, también llamada “teoría de las estructuras disipativas”, porque estudia los sistemas abiertos donde se involucra intercambio de materia, energía o información con su medio circundante, permite deducir el orden subyacente que ocultan fenómenos aparentemente aleatorios. También aporta un nuevo enfoque para comprender la complejidad, característica común en la inmensa mayoría de los problemas de la ciencia, como por ejemplo las reacciones químicas en el suelo o el comportamiento humano, que son complejos pero no aleatorios.

El caos no es desorden; simplemente, es un orden diferente que debe verse de otro modo, porque muchas variables no necesariamente han de seguir un comportamiento determinista. A menudo, de sus interacciones emerge un nuevo orden. Por ejemplo, de la interacción de individuos surge la familia, y de muchas familias puede surgir un clan o una tribu; después una sociedad, lo que contiene un orden evidente, regulado por atractores.

Un atractor, según Lorenz, puede generar múltiples órbitas periódicas, y representa un sistema cuya velocidad y posición cambian en una sola dirección. Si se pudiera dibujar la trayectoria de una abeja volando cerca de una flor (hay quien lo ha logrado), se vería



que el revoloteo no es aleatorio, sino que tiende a trazar dos elipses enlazadas; cada una de esas elipses tiene como centro un atractor. Así, un atractor es una zona del espacio de estados posibles que tiende a ser “visitada” con mayor frecuencia que otras por el sistema.

En un principio, la teoría del caos se aplicó al análisis de circuitos electrónicos, produciendo resultados como el aumento de la potencia de láseres y la sincronización de circuitos. Se demostró entonces que es posible sincronizar dos sistemas caóticos, siempre y cuando sean excitados por la misma señal (atractor), independientemente del estado inicial de cada uno. Sin sincronismo, dos sistemas caóticos idénticos progresarán hacia estados finales distintos. Más tarde, la teoría del caos pudo aplicarse al análisis de oscilaciones en reacciones químicas, al seguimiento del latido cardíaco y, más recientemente, al modelaje del comportamiento de las enzimas. Los sistemas naturales son, en su gran mayoría, no lineales, y justamente el caos es un comportamiento no lineal. Actualmente el estudio del caos tiene dos enfoques: en primer lugar, como precursor y compañero del orden, centrado en una disminución ordenada del caos (Hayles, 1993); mientras que el segundo enfoque fue propuesto por Feigenbaum (1978) y Mandelbrot (1977) para estudiar el orden oculto en el caos y la información contenida en el sistema.

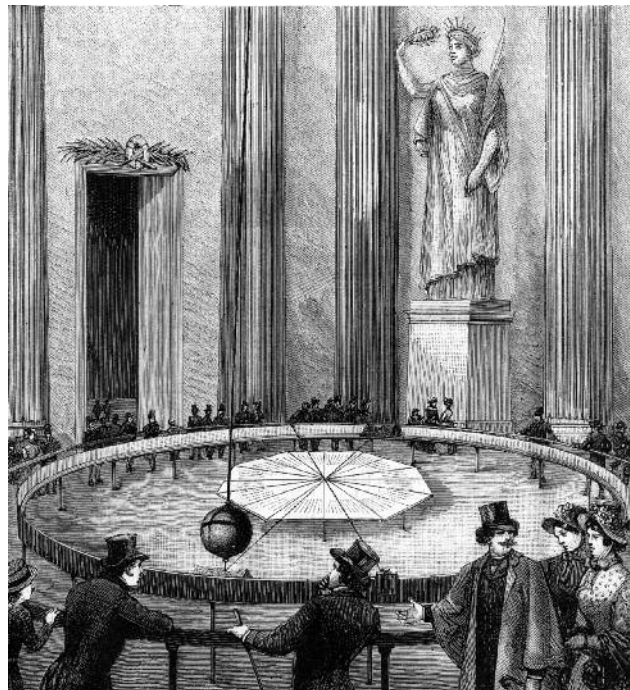


Control del caos

Es posible controlar el caos. Los físicos Edward Ott y Ceslo Grebogi, así como el matemático James A. Yorke (1990) elaboraron un algoritmo matemático con el que un sistema caótico se puede transformar en procesos periódicos sencillos. Un ejemplo es el movimiento de un péndulo al que llamaron OGY (por las iniciales de sus autores); consiste en usar pequeñas perturbaciones de la órbita, de modo que el sistema se estabilice en una de las órbitas periódicas inestables. La perturbación pequeña implica, por ejemplo, el control del comportamiento caótico de un sistema químico, que puede lograrse al perturbar periódicamente alguna de sus variables, como la temperatura. Garfinkel y colaboradores (1992), de la Universidad de California, aplicaron el algoritmo para transformar el movimiento caótico de un corazón, extraído de un conejo, en un movimiento regular, mediante la aplicación de pequeños estímulos eléctricos aperiódicos.

En la actualidad se ha conceptualizado a la actividad neuronal como un sistema de procesamiento holístico que posee importantes características como la secuencialidad, la continuidad, la evolución, la sensibilidad a señales internas y externas y, especialmente, la autoorganización. Por tanto, resulta posible que la propia actividad neuronal esté expuesta a la dinámica caótica no aleatoria. Por mencionar un ejemplo, en un estudio sobre la percepción olfativa en ratones (Freeman, 1991) se concluyó que cuando se trata de identificar la fuente de información, el sujeto se orienta mediante una actividad exploratoria mínima, como resultado de la actividad autoorganizadora que se desarrolla en las vías neurales; la vía olfatoria libera un mensaje de referencia alertando a otros sistemas sensoriales para que se preparen para responder a nueva información.

Las redes neuronales responden en ráfagas de activación y periodos (intervalos) en los cuales la neurona permanece inactiva, lo cual forma una suerte de código. Esta actividad se retransmite a las redes encargadas de la memoria emocional. El acto de la percepción consiste en un repentino salto del sistema dinámico desde la "cuenca" de un atractor caótico hacia otro; la cuenca de un atractor es el conjunto de condiciones iniciales a partir de las cuales el sistema sigue



un determinado comportamiento. La función integrativa del sistema nervioso central es una buena aproximación al concepto de atractor. Pritchard y Duke (1995) concluyen que la conceptualización del cerebro como un sistema dinámico no lineal promete explicar el funcionamiento cognitivo de manera más adecuada que otros modelos artificiales. Según Maturana y Varela (1973), los sistemas biológicos tienen la propiedad de crear y mantener su propio orden (son autopoéticos), lo que les permite adaptarse a su medio, porque pueden crear o destruir elementos del mismo sistema como respuesta. Aunque el sistema cambie estructuralmente, mantiene su identidad a lo largo del tiempo. Pero el proceso de ajuste no puede ser medido por aproximaciones deterministas: es caótico.

Conclusión

La noción de caos abrió una nueva perspectiva científica con la que se pretende comprender el orden y la complejidad del universo. Desde esta perspectiva, no niega el mérito de la ciencia clásica (determinista), pero propone un nuevo modo de estudiar la realidad. Así, las leyes del caos favorecen una explicación para la mayoría de los fenómenos natura-

les, desde el origen del universo a la propagación de un incendio o a la evolución de una sociedad, e incluso al estudio de la actividad cerebral. Por ejemplo, la secuencia temporal de activación de redes neuronales y su relación con el comportamiento, en un intento por contestar a la pregunta de si los eventos conductuales siguen un orden o no. Suponemos que así es, pero sin seguir modelos lineales, en una situación quizá caótica para la que no hemos encontrado las reglas que la rigen. Después de todo, desde los antiguos jonios, “cosmos” significa orden, y nada parece caótico cuando se ve, al menos, por segunda vez.

Agradecimientos

A Miguel Ángel Jiménez Montaña, por su apoyo y orientación. Rosario Aldana-Franco recibió beca para estudios de posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt, reg. 54855). Este trabajo fue parcialmente subvencionado por el Conacyt (CB-2006-1, 61741) y el Sistema Nacional de Investigadores (SNI, Exp. AGG: 32755 y CMC: 754).

Rosario Aldana-Franco es académica de carrera de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Veracruzana (UV). Es maestra en inteligencia artificial, doctora en educación y doctora en neuroetología en la propia UV. Su área de interés es la neuroinformática. Realiza investigación en el modelamiento de sistemas complejos, en el área de neurociencias.
raldana@uv.mx

Ana G. Gutiérrez-García es investigadora de la Facultad de Psicología, adscrita al Instituto de Neuroetología de la Universidad Veracruzana. Es doctora en neurociencias de la conducta por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Sus investigaciones están relacionadas con la comunicación química y las emociones. Pertenecer al Sistema Nacional de Investigadores.
angutierrez@uv.mx

Carlos M. Contreras es investigador del Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, adscrito al Instituto de Neuroetología de la Universidad Veracruzana. Es médico cirujano y doctor en ciencias por la UNAM, y pertenece al Sistema Nacional de Investigadores. Su línea de investigación se relaciona con la neurofarmacología de los trastornos afectivos.
ccontreras@uv.mx

El caos no es desorden;
simplemente, es un orden diferente
que debe verse de otro modo,
porque muchas variables
no necesariamente han de seguir
un comportamiento determinista

Lecturas recomendadas

- Feigenbaum, M. J. (1978), “Qualitative universality for a class of nonlinear transformations”, *J. Statist. Phys.* 19, 25-52.
- Freeman, W. J. (1991), “The physiology of perception”, *Scientific american* 264, 78-85.
- Garfinkel, A., M. L. Spano, W. L. Ditto y J. N. Weiss (1992), “Controlling cardiac chaos”, *Science* 257, 1230-1235.
- Hayles, K. (1993), *La evolución del caos: el orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas*, Barcelona, Gedisa.
- Lorenz, E. N. (1963), “Deterministic nonperiodic flow”, *J. Atmos. Sci.* 20, 130-141.
- Maturana, H. y F. Varela (1973), *De máquinas y seres vivos: una teoría sobre la organización biológica*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria.
- Ott, E., C. Grebogi y J. A. Yorke (1990), “Controlling chaos”, *Phys. Rev. Lett.* 64, 1196-1199.
- Poincaré, H. (1897), *The relativity of space*, disponible en: www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/fr/poincare.htm (consultado: 20 de mayo de 2009).
- Pritchard, W. S. y D. W. Duke (1995), “Measuring chaos in the brain: A tutorial review of EEG dimension estimation”, *Brain and cognition* 27, 353-397.