

Recibido: 07.03.2018 | Aceptado: 25.05.2018

Palabras clave: Caos, complejidad, efecto mariposa, orden y sistemas dinámicos.

El mundo torcido de los sistemas dinámicos caóticos



ROBERTO RAFAEL RIVERA DURÓN
ERIC CAMPOS CANTÓN
INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A. C.

Un hecho común en muchas culturas del mundo antiguo es tratar de explicar nuestro origen mediante las llamadas cosmogonías, narraciones míticas que pretenden dar respuesta a la creación del universo y de la propia humanidad. Las cosmogonías de las culturas antiguas imaginaban un estado primordial donde prevalecían el caos o la nada, de los cuales surgían los seres vivos y las cosas. Dentro de un contexto mágico, místico y religioso es entendible que se atribuyera a alguna divinidad el mérito de favorecer el tránsito desde el caos hasta la realidad que ahora vemos.



Caos determinista

Cuando se menciona la palabra caos, es común que se asocien nociones como desorden, ausencia de reglas o incluso aleatoriedad en el comportamiento de algo. Pero en el mundo de la ciencia sucede lo contrario; cuando se menciona que cierto fenómeno presenta un comportamiento caótico, se hace referencia al caos determinista. Cuando un sistema evoluciona en la naturaleza se conoce como sistema dinámico, es decir, su comportamiento cambia

con el transcurso del tiempo y puede ser descrito por ecuaciones con dependencia del tiempo para que no estén asociados a un proceso aleatorio o estocástico. Debido a la ausencia de una variable aleatoria se les da el nombre de sistemas dinámicos deterministas, esto significa que una condición inicial provoca cierta evolución temporal del sistema y cada vez que se empiece con la misma condición inicial, el sistema evolucionará de igual manera. Así, un sistema dinámico caótico es un sistema dinámico determinista. Además, éstos son no lineales y presentan un comportamiento aperiódico. Los sistemas caóticos son siempre no lineales, mientras que los sistemas no lineales no necesariamente deben ser caóticos.

Una característica de los sistemas dinámicos caóticos es la sensibilidad a las condiciones iniciales, a pesar de ser sistemas deterministas. Pero usted podrá estar pensando ¿a qué se hace referencia con sensibilidad a las condiciones iniciales? Pues este concepto se refiere a que un pequeño cambio

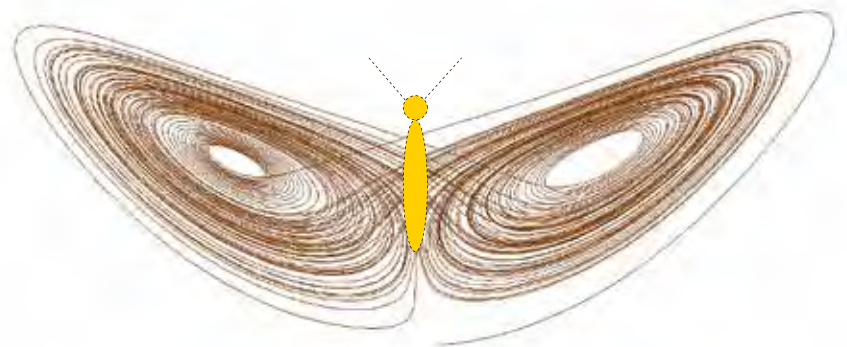
en las condiciones de inicio provocará que el sistema evolucione de manera diferente aunque sea un cambio bastante pequeñito. Así, los fenómenos de tipo caótico son extremadamente sensibles a sus condiciones iniciales; de modo que alteraciones muy pequeñas en las causas son capaces de provocar grandes efectos. De aquí que se haya acuñado el concepto de efecto mariposa en la teoría del caos.

La sensibilidad a las condiciones iniciales es la característica más conocida de los sistemas caóticos. Uno de los trabajos que marcó históricamente el surgimiento formal de la teoría del caos fue reportado como sensible a las condiciones iniciales por Edward Lorenz (1917-2008). En su intento por predecir el clima con ayuda de una computadora, descubrió fortuitamente que pequeñas diferencias en los datos de entrada producían un gran impacto en las predicciones resultantes. El atractor de Lorenz es mostrado en la figura 1, es un concepto introducido en 1963, descrito como un sistema dinámico determinista tridimensional no



Se muestra una trayectoria en color azul que oscila en el atractor de Lorenz.

Figura 1.



lineal derivado de las ecuaciones simplificadas de rolos de convección que se producen en las ecuaciones dinámicas de la atmósfera terrestre. Dicho modelo no presenta ningún término estocástico y es dado como sigue:

$$dx/dt=\sigma(x-y),$$

$$dy/dt=x(\rho-z)-y,$$

$$dz/dt=xy-\beta z.$$

Donde para ciertos valores de los parámetros σ , ρ , β , el sistema exhibe un comportamiento caótico y muestra lo que actualmente se llama un atractor extraño; como se muestra en la figura 1. En 1977, Afraimovich, Bykov y Shilnikov publicaron el estudio del origen y la estructura del atractor de Lorenz.

En nuestra cotidianidad, la palabra *caos* quizás provoque una gran carga emocional, confusiones e, incluso, sea la causa de que se vea a los fenómenos caóticos como algo no deseable y se prefieran los sistemas bien comportados o periódicos.

El caos para las culturas antiguas

Para ciertas culturas, el caos desempeñaba un papel muy importante como principio fundamental y tenía significados distintos a desorden. Por ejemplo, para los egipcios el mundo se engendró de una masa profunda, inerte e ilimitada de agua. Esta masa primordial estaba rodeada de total oscuridad, ya que el sol aún no existía. El caos era esta sustancia material y la representaba Nun, dios del océano primordial. Dentro de aquel abismo oscuro y acuoso yacía la sustancia primitiva que con-

tiene el potencial de vida y con la cual se formaría el mundo (Gadalla, 2003).

Los egipcios hablan del agua como sustancia primordial que dio origen a las cosas. Los chinos, por su parte, presentan al caos como un huevo, un estado difuso que no podía ser percibido ni conocido. Sin embargo, a pesar de esta diferencia, ninguna de las dos culturas habla de desorden en su concepción del término.

Existen versos que hablan acerca del origen del Universo (Hesíodo, 1978), dentro de los cuales el caos es concebido como algo supremo que existió antes que todo. En estos versos aparece por primera vez la palabra *caos* tal como la conocemos y su significado más probable es 'huevo o abismo', es decir, el abismo entre el cielo y la tierra.

La palabra *caos* (*Chaos*) en el contexto de las cosmogonías y la filosofía griega significa 'masa amorfa y confusa', y no 'abismo primordial' por su vocablo $\chi\alpha\omicron\varsigma$ (*khaos*) que comparte su raíz etimológica con $\chi\alpha\iota\nu\omega$ que significa 'entreabrirse, abrir la boca, bostezar'.

Caos en el cuerpo humano

Aunque tendemos a aborrecer el caos y a evitarlo por todos los medios y siempre que nos sea posible, la naturaleza lo utiliza como medio adecuado para crear nuevas entidades, conformar acontecimientos y mantener la cohesión del Universo. Nuestras vidas están en un caos, y no solamente de forma ocasional o repentina, sino de forma permanente.

El cuerpo humano no está exento de fenómenos de tipo caótico. Por ejem-

plo, la actividad eléctrica del cerebro puede registrarse mediante un estudio clínico llamado electroencefalograma (EEG). Se ha observado que los EEG provenientes de pacientes sanos manifiestan actividad caótica en el sistema nervioso (Babloyantz, 1985), es decir, el comportamiento caótico en la actividad eléctrica cerebral lejos de ser un signo de enfermedad, representa un estado saludable. Por su parte, la epilepsia es uno de los trastornos neurológicos crónicos más comunes, la cual se caracteriza por descargas eléctricas repentinas y recurrentes de la corteza cerebral que dan lugar a alteraciones intermitentes de la función cerebral (Lasemidis y Sackellares, 1996). Estas alteraciones consisten en el incremento y sincronización anormales de la actividad eléctrica neuronal. Los síntomas dependen de la localización de la crisis y de la propagación de la misma. En la mayoría de los pacientes, las crisis aparecen de repente sin que exista un factor desencadenante identificable.

En la actividad cerebral de un paciente con epilepsia coexisten dos estados: la aparente normalidad y la espontánea condición patológica. Claramente, la espontaneidad de la crisis no significa que no haya una causa para que ésta ocurra en un momento específico. Lo que el término espontaneidad significa es que simplemente no sabemos cuáles son las causas subyacentes. Entonces, surge la pregunta ¿es posible predecir la ocurrencia de las crisis epilépticas? Si la ocurrencia es puramente estocástica entonces no hay modo de desarrollar métodos de predicción. En este escenario sólo podemos definir qué variables aumentan o disminuyen



ROBERTO RAFAEL RIVERA DURÓN

Es ingeniero electrónico por la Facultad de Ciencias de la UASLP. Y obtuvo el grado de maestro y doctor en el IPICYT. Actualmente realiza una investigación acerca de las formas de obtención de hardware reconfigurable y del fenómeno de sincronización en redes Booleanas.



la probabilidad de una crisis. Si por el contrario, la ocurrencia no depende de una probabilidad, entonces tenemos la esperanza de encontrar algún patrón que prediga su inicio. Una vez que estos patrones sean identificados, con la ayuda conjunta de la teoría de caos y la de control, se pueden diseñar e implementar monitores portátiles de la actividad eléctrica cerebral que predigan la crisis de manera oportuna con la finalidad de que pueda intervenir de manera terapéutica.

Cabe señalar que el área de la biodinámica era de interés para el profesor Afraimovich y este año, antes de partir, nos dejó una de las últimas publicaciones: *Brain-to-brain heteroclinic coordination: model of sequential episodic memory initiation* (2018), y donde reportó que la recuperación de la memoria episódica es un proceso dinámico en las redes cerebrales a gran escala. En los grupos sociales, los patrones neuronales asociados a eventos específicos directamente experimentados por miembros individuales, son codificados, recordados y compartidos por todos los participantes. En esta publicación explicó cómo construir y estudiar un modelo dinámico para la formación y el mantenimiento de la memoria episódica en pequeños conjuntos de cerebros que interactúan.


Comentarios finales

Aunque el caos sea con frecuencia pensado como desorden, ausencia de reglas o aleatoriedad, es mucho más preciso y adecuado pensar en él como un fenómeno en el cual el acomodo resulta de las interacciones de sistemas no lineales y donde las condiciones ini-

ciales juegan un papel determinante. Aun cuando han pasado poco más de 50 años desde su formulación, existe todavía mucho por decir y descubrir sobre la teoría del caos. Muchos científicos, entre ellos el recién fallecido Stephen Hawking, creen que la ciencia del siglo XXI estará basada en tres teorías, y una de ellas es la del caos.

Su impacto en el estudio de diversos problemas científicos debe ser valorado sin sobredimensionarlo y darle la justa medida, recordando siempre que sigue siendo sólo una teoría.

Finalmente, puede parecer que las aplicaciones aquí expuestas plantean un panorama bastante optimista para la solución de dos problemas actuales de salud.

Quizás lleve años de investigación multidisciplinaria poder solucionarlos. Sin embargo, si la finalidad de hacer investigación es generar conocimiento y si, además, puede convertirse en una implementación tecnológica que ayude a mejorar la calidad de vida de las personas con estos padecimientos, bien vale la pena intentarlo, utilizando incluso herramientas tan controversiales como la teoría del caos. 

El autor dedica este artículo al profesor Valentin Afraimovich (1945-2018), quien fue un gran matemático en sistemas dinámicos e ingresó a la UASLP como profesor investigador en el año de 1998

Referencias bibliográficas:

- Afraimovich, V. S., Bykov, V. V. y Shilnikov L. P. (1977) On the origin and structure of the Lorenz attractor. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 234, pp. 336-339.
- Afraimovich, V. S., Zaks, M. A. y Rabinovich, M. I. (2018) Brain-to-brain heteroclinic coordination: model of sequential episodic memory initiation. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 28.
- Babloyantz, A. (1985). Evidence of Chaotic Dynamics of Brain Activity During the Sleep Cycle, *Physics Letters A*, 111(3), pp. 152-156.
- Gadalla, M. (2003). *Egyptian Cosmology The Animated Universe*, Tehuti Research Foundation, North Carolina.
- Iasemidis, L. D. y Sackellares, J. C. (1996). Chaos theory and epilepsy. *The neuroscientist*, 2, pp. 118-126.