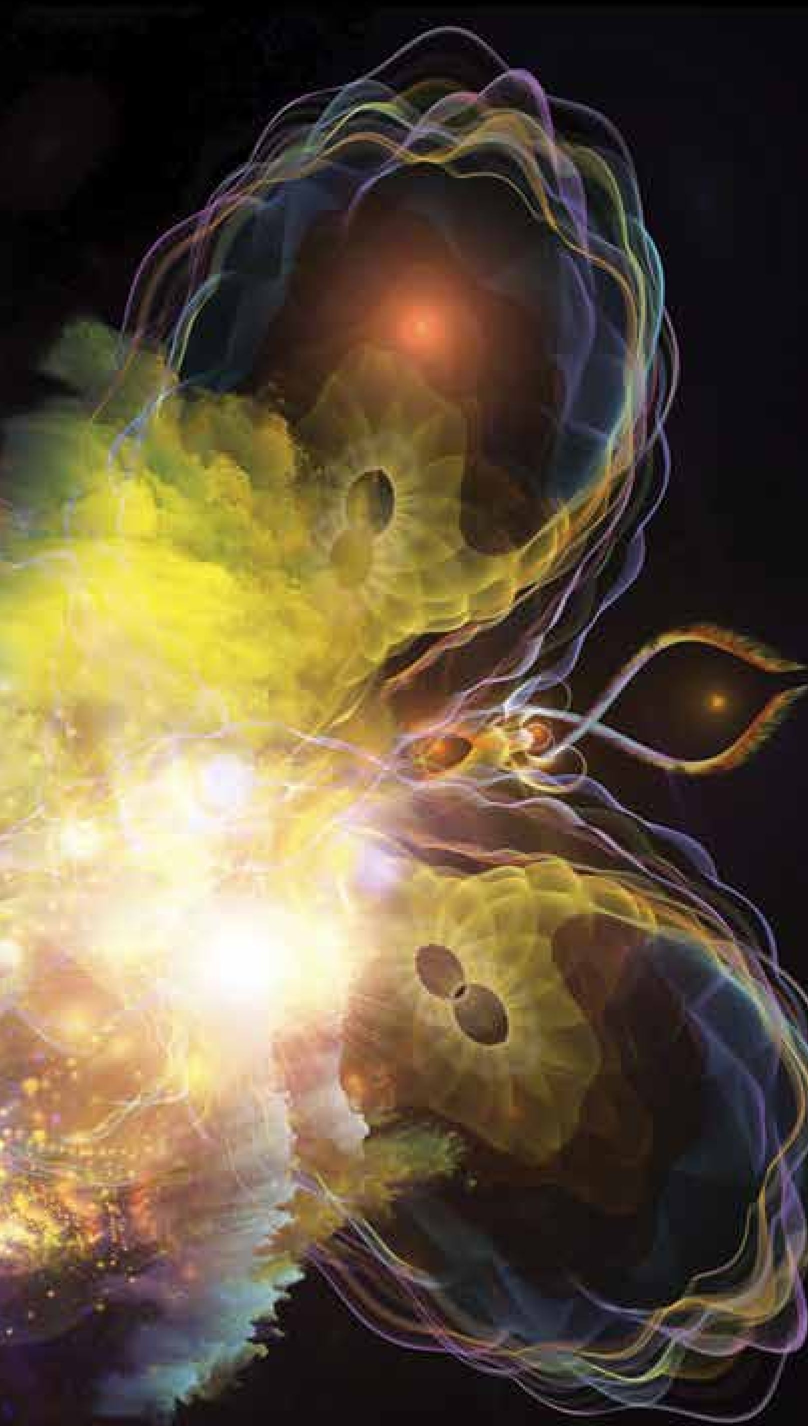
Adriana Elisa Espinosa y Carolina Ureta

La creación de la metáfora “el efecto mariposa”

¿Cómo surgió una metáfora científica que hace referencia a sistemas dinámicos no lineales, en los que un cambio en las condiciones iniciales, por mínimo que sea, puede conducir a un comportamiento caótico? Contrario a lo que suele pensarse, esa metáfora tiene su origen no en la mente de un solo individuo, sino en un conjunto de personas y acontecimientos.



De Newton a Poincaré

Inmersas en un mundo mecanicista, época en la cual el pensamiento científico nos llevó a una visión del universo en la que éste funcionaba de forma exacta y predecible, las leyes del movimiento de Isaac Newton, expuestas a fines del siglo XVII, implican que si se conoce la fuerza que se aplica sobre una partícula se puede conocer la trayectoria que ésta seguirá. Sin embargo, esta posibilidad se halla sujeta a una condición: debe especificarse la posición y la velocidad que tiene la partícula en el instante inicial. Es decir, si se pueden precisar las condiciones iniciales de la partícula, las leyes de Newton permiten conocer por completo su futuro, lo cual resultará válido para cualquier sistema que tenga cualquier número de partículas. Con base en estas leyes el francés Pierre Simon de Laplace, uno de los principales matemáticos del siglo XVIII, llegó a jactarse en 1776, en su *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, de que si se le dieran las posiciones y velocidades iniciales de cada una de las partículas que componen el universo, podría predecir el futuro por el resto del tiempo y también saber lo que había ocurrido en el pasado. En la siguiente cita que se encuentra en Stewart (2001), Laplace lo expresa de la siguiente manera: "Un ser inteligente que en un instante dado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y las posiciones de los seres que la forman, y que fuera lo suficientemente inmenso como para poder analizar dichos datos, podría condensar en una única fórmula el movimiento de los objetos más grandes del universo y el de los átomos más ligeros: nada sería incierto para dicho ser, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos."

Con afirmaciones como las de Laplace nació el paradigma del determinismo clásico, en el que se buscaban ecuaciones para explicar fenómenos de la naturaleza y además que éstas los describieran con exactitud. Sin embargo, aún había cuestiones sin respuesta, y es que a pesar de todos los logros importantes alcanzados en la física y la matemática clásica, algunas áreas de la naturaleza permanecieron sin tocarse. Los matemáticos podían calcular el movimiento de un satélite de Júpiter, pero no el de un copo de nieve en una ventisca; podían describir el crecimiento de una burbuja de jabón, pero no el de un árbol. Los matemáticos habían podido concretar algo del orden del universo y las razones de ese orden, pero vivían en un mundo difícil de ordenar. Creían que gran parte del desorden obedecía a las mismas leyes fundamentales (la primera ley de Newton, llamada "ley de inercia", y la segunda ley de Newton, que se conoce como "el principio fundamental de la dinámica") y que la incapacidad de los matemáticos para aplicar dichas leyes a cualquier efecto era una cuestión de complejidad matemática y física. El movimiento de dos masas puntuales podía calcularse de forma precisa; el caso de tres era ya demasiado difícil para una solución, aunque podía resolverse de forma aproximada. El movimiento a largo plazo de alrededor de los 50 cuerpos mayores en el Sistema Solar era imposible de controlar y predecir.

Henri Poincaré

Físicos y matemáticos empezaron a estudiar el problema de la imposibilidad de predicción, que contradecía un riguroso determinismo en relación con las leyes de la naturaleza. Entre ellos se encontraba Henri Poincaré, matemático francés que fundó la moderna teoría cualitativa de los sistemas dinámicos. Se le conoció como el último de los tradicionalistas y el primero de los modernos. Sus trabajos abarcaron casi todos los temas de la época, como ecuaciones diferenciales, teoría de números, análisis complejo, mecánica, astronomía, física matemática y topología. Aplicó esta última a uno de los problemas más difíciles en la frontera de la dinámica: la estabilidad de los sistemas dinámicos complicados como el Sistema Solar, conocido también como el problema de *n* cuerpos en interacción. Como Poincaré postula que ese problema es irresoluble, lo restringe a tres cuerpos y en 1890 publica los resultados en el trabajo titulado *El problema de los tres cuerpos y las ecuaciones de la dinámica*. Concluye que las trayectorias de más de dos cuerpos en interacción se comportan en una forma que parece aleatoria, en el sentido matemático, y que no hay una predicción de su comportamiento final debido a pequeñas perturbaciones en el estado inicial.

En el año de 1903 Henri Poincaré escribió lo siguiente, según la cita de Braun (1996): "nosotros solamente podemos conocer la situación inicial de manera aproximada. Si esto nos permitiera predecir la situación que sigue en el tiempo con la misma aproximación, es todo lo que necesitaríamos, y podríamos decir que el fenómeno ha sido predicho, que está regido por leyes. Pero esto no es siempre así; puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan condiciones muy diferentes en los fenómenos finales. Si un pequeño error en las condiciones iniciales produce un enorme error en las condiciones finales, la predicción se vuelve imposible y tenemos un fenómeno fortuito".

Poincaré había descubierto que la mayoría de los sistemas dinámicos no lineales son sensibles a las condiciones iniciales y que además nuestro conocimiento de éstas es siempre algo impreciso. Ello explica la poca fiabilidad de las predicciones de algunos sistemas dinámicos, por ejemplo los meteorológicos. Estos sistemas, que obedecen a leyes de la física que por lo regular son inmutables y precisas, no siempre actúan de manera predecible y regular. Leyes deterministas pueden producir comportamientos que parecen aleatorios. Para conocer la evolución que sigue un sistema de este tipo es necesario conocer, además de las leyes que lo rigen o las variables involucradas, sus condiciones iniciales. Bajo las mismas leyes, diferentes condiciones iniciales producen distintas evoluciones en el tiempo.

El extraño atractor de Lorenz

En los años sesenta del siglo pasado el matemático y meteorólogo estadounidense Edward Norton Lorenz, quien fue uno de los pioneros de la teoría del caos, descubrió los primeros atractores extraños y se le atribuye la creación de la metáfora "el efecto mariposa". Motivado por el deseo de entender la impredecibilidad de los sistemas dinámicos no lineales, por ejemplo los del tiempo meteorológico, Lorenz estudió las ecuaciones del movimiento del fluido atmosférico. Al simplificarlas obtuvo un sistema con tan sólo tres grados de libertad. Este sistema era muy simple, pero no así su comportamiento; no se parecía en nada al de otros sistemas, como los que son constantes, periódicos y cuasiperiódicos. El sistema de Lorenz se comportaba de un modo aparentemente estocástico, que escapaba a toda caracterización basada en cualquiera de los tres tipos de comportamientos entonces conocidos.

Usando una computadora digital –una Royal McBee LGP 130– para simular su modelo simplificado, Lorenz dilucidó el mecanismo básico responsable del azar observado: las perturbaciones microscópicas se amplifican hasta alcanzar el comportamiento macroscópico. Dos trayectorias con condiciones iniciales próximas divergen rápidamente de forma exponencial, por ello permanecen cercanas sólo durante un corto periodo. La situación difiere cualitativamente en los atractores periódicos o cuasiperiódicos. En ellos, las trayectorias vecinas siguen estando cerca, los pequeños errores se mantienen acotados y el comportamiento es predecible [véase Figura 1, que apareció por primera vez en Lorenz (1963a)].

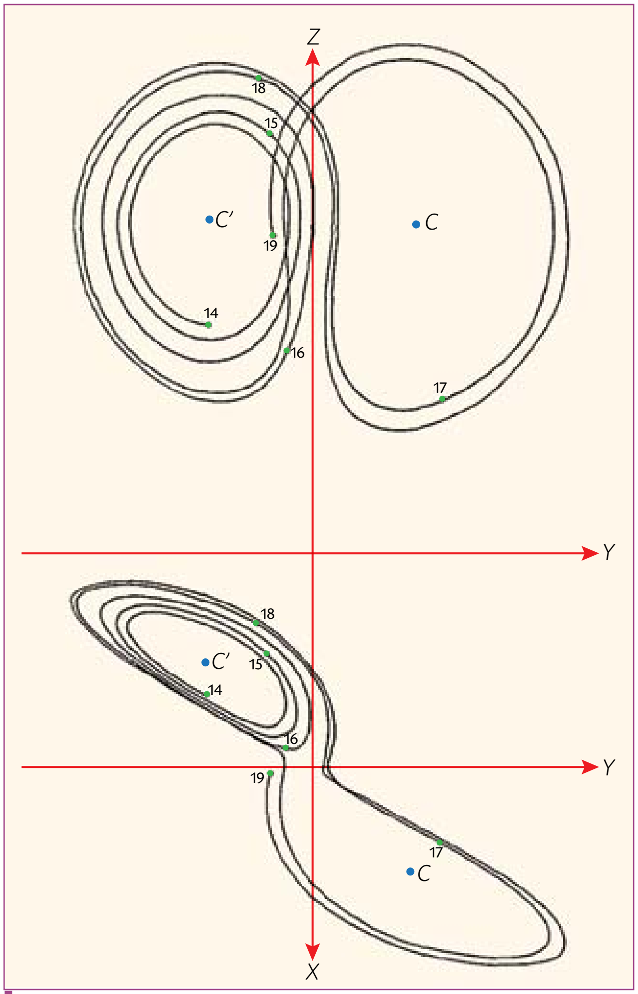


Figura 1. El atractor de Lorenz, que no es periódico ni cuasiperiódico. Este tipo de figuras fueron las primeras en ser nombradas "atractores extraños".

Parte de los resultados que Lorenz obtuvo con su sistema climático los publicó en un artículo en el *Journal of the Atmospheric Sciences* en 1963, titulado "Deterministic Nonperiodic Flow". Lo que Lorenz destaca en ese artículo son los cambios que tienen los patrones atmosféricos, cuyo comportamiento es muy diferente al periódico o cuasiperiódico. Pero además enfatiza el hecho de que si hay cambios, aunque sean muy pequeños, en las condiciones iniciales de un sistema determinístico como el suyo, los comportamientos variarán hasta alcanzar, tal vez, momentos de impredecibilidad. Lorenz explica detalle a detalle las razones de estos dos hechos principales, en virtud de que los resultados que obtuvo de su modelo simplificado no eran lo que él esperaba.

Como por medio de la impresión de esos datos fue que Lorenz se dio cuenta de que había ciertos cambios en las secuencias, en el artículo mencionado incluye una tabla con los datos obtenidos con la computadora Royal McBee y sus gráficas correspondientes en el espacio de fases (Figura 1). Esto fue importante para Lorenz, porque le permitió darse cuenta de que pequeñas perturbaciones en las condiciones iniciales podían provocar cambios drásticos en el comportamiento del sistema no lineal. Él se enfrentó con el problema de la sensibilidad a las condiciones iniciales, el mismo al que Henri Poincaré se había enfrentado años atrás.

Para ilustrar cómo se dio cuenta de esto, Lorenz hace un relato, citado por Stewart (2001), en el que dice que un día de 1961 quería ver de nuevo una secuencia en particular. Para ganar tiempo comenzó a la mitad de la secuencia, en lugar de al principio. Introdujo los números de su copia impresa y dejó que su computadora ejecutara las operaciones pertinentes. Cuando volvió una hora más tarde, la secuencia había evolucionado de forma distinta a lo esperado. En lugar de obtener el mismo patrón de antes, divergía del patrón original finalizando de una forma muy diferente. Lorenz finalmente comprendió lo que había sucedido: la computadora almacenó seis decimales en su memoria, pero al momento de imprimirlos solamente aparecieron tres de ellos. En la secuencia original, el número era 0.506127 y Lorenz sólo había introducido a la computadora los tres primeros dígitos: 0.506.

Según todas las ideas convencionales de aquella época, Lorenz debería haber obtenido una secuencia muy cercana a la secuencia original. Un científico podía considerarse afortunado si era capaz de conseguir medidas con una precisión de tres decimales. Seguramente el cuarto y el quinto, imposibles de medir usando métodos razonables, no podían tener un gran efecto en el resultado del experimento. Lorenz probó que esta idea era errónea.

El artículo "Deterministic Nonperiodic Flow" contenía gráficas con figuras antes no vistas en un diagrama de fases, llamadas *atractores extraños* por los matemáticos David Ruelle y Floris Takens según Gleick (1987). Hasta el momento solamente se conocían el punto fijo, el ciclo límite y la dona o toro matemático como los atractores aceptados, que corresponden a los diferentes comportamientos a los que un sistema dinámico no lineal podía tender. El punto fijo correspondería a un sistema cuyo comportamiento permanece constante con respecto al tiempo, un ciclo límite a un sistema periódico y la dona o toro matemático a un sistema cuasiperiódico [Figura 2, que apareció por primera vez en Crutchfield *et al.* (1987)].

El comportamiento de los sistemas que estudiaba Lorenz parecía ser altamente impredecible; se creía que el azar intervenía en gran medida. Él lo llamó comportamiento irregular, hoy conocido como comportamiento caótico.[1] Lorenz continuó trabajando sobre este tipo de sistemas y sus figuras comenzaron a ser estudiadas por otros matemáticos y físicos. Tal fue la relevancia de sus resultados que en 1972 lo invitaron a dar una conferencia al respecto en la 139th Meeting of the American Association for the Advancement of Science, en una sección especialmente dedicada al tema de la dependencia sensible a las condiciones iniciales. Esta conferencia se tituló "Predecibilidad: ¿el aleteo de una mariposa en Brasil puede provocar un tornado en Texas?".[2]

Con los años la conferencia de Lorenz, y en especial su título, tuvo mucha repercusión. De hecho, es a partir de ese evento que comienza a llamarse "efecto mariposa" a lo que él denominaba "dependencia sensible a las condiciones iniciales", que tienen la mayoría de los sistemas no lineales. Pero, ¿cómo se le ocurrió a Lorenz el título de la conferencia? ¿Cómo se transformó el concepto de "dependencia sensible a las condiciones iniciales" en "el efecto mariposa"?

Origen del término "el efecto mariposa"

Para poder analizar el origen del título de esa conferencia y la asociaión de la mariposa con la dependencia sensible a las condiciones iniciales de los sistemas

[1] Según Lorenz (1993), este término es usado por primera vez en 1975 en un artículo publicado por Li y Yorke titulado "Period Three Implies Chaos". Estos autores introdujeron un nuevo término científico y se dice que fue por accidente, ya que lo que ellos llamaban "caos" no era lo que en realidad tenían en mente, pero el término fue un éxito y hasta ahora se sigue usando en matemáticas como la propiedad que caracteriza a los sistemas dinámicos en los cuales la mayoría de las órbitas exhiben una dependencia sensible a las condiciones iniciales.

[2] El título original se encuentra en Lorenz (1993) y es: "Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?".

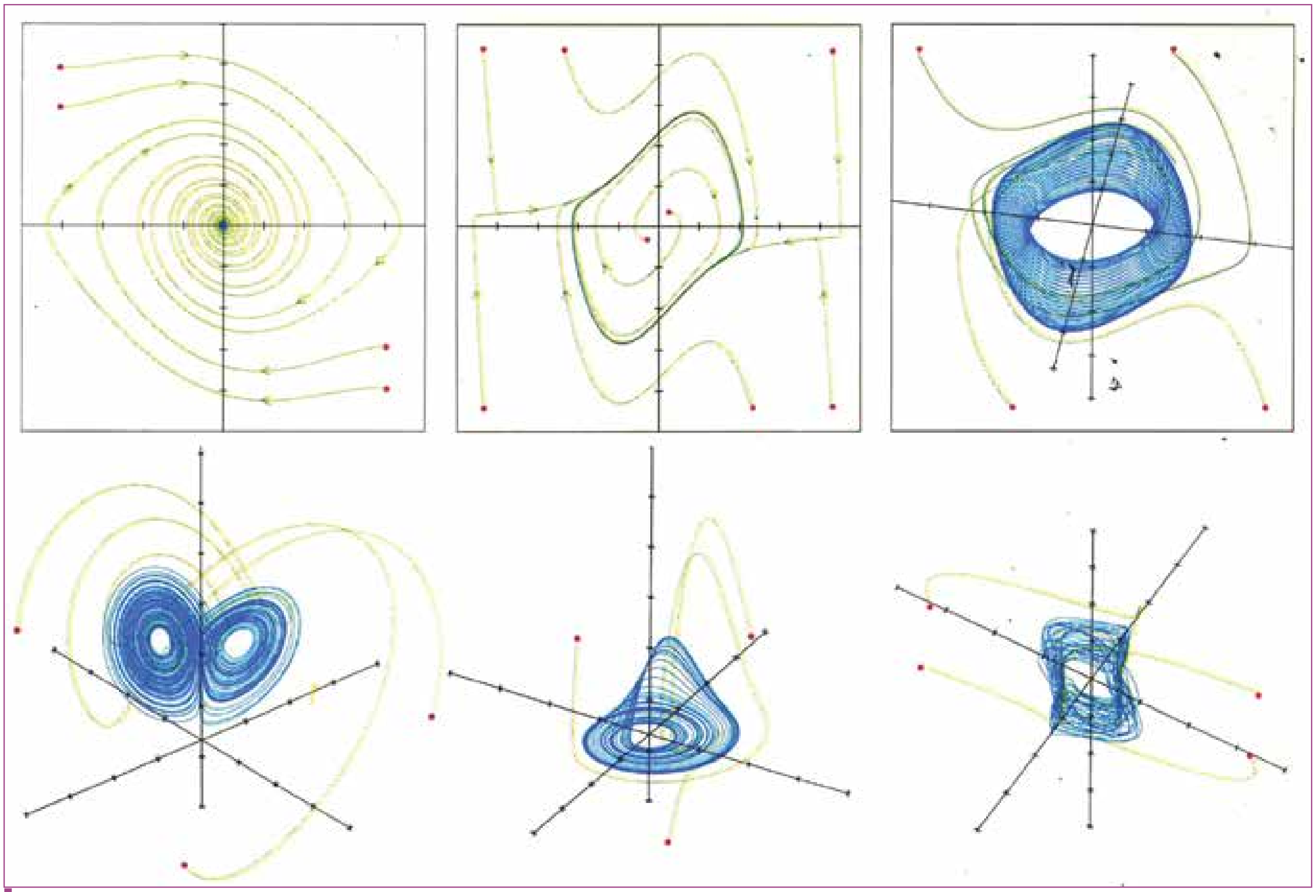


Figura 2. Diferentes atractores en el diagrama de fases que corresponden al comportamiento de sistemas dinámicos no lineales. Las tres primeras figuras corresponden a un atractor de punto fijo, a uno de ciclo límite y a una dona o toro. Los últimos tres son atractores extraños cuyo comportamiento es caótico. El atractor de Lorenz es el que de hecho nos recuerda las alas de una mariposa.

no lineales, debemos comenzar por analizar el trabajo de este científico y fijar nuestra atención en otro artículo que publicó unos meses antes del ya citado "Deterministic Nonperiodic Flow" y titulado "The Predictability of Hydrodynamic Flow" (Lorenz, 1963b). Casi al finalizar este artículo, Lorenz escribe: "Cuando la inestabilidad de un flujo uniforme con respecto a perturbaciones infinitesimales se sugirió primero como una explicación para la presencia de ciclones y anticiclones en la atmósfera, la idea no fue universalmente aceptada. Un meteorólogo remarcó que si la teoría fuera correcta, un solo aleteo de una gaviota podría ser suficiente para alterar el curso del clima para siempre. La controversia no ha sido aceptada, pero la más reciente evidencia parece estar a favor de las gaviotas."

Nos damos cuenta de que Lorenz primero usó otra figura asociativa: la gaviota. Entonces, ¿por qué se refirió al aleteo de una mariposa en lugar del de una gaviota en su conferencia de 1972? Según el artículo de Robert Hilborn (2004) "Seagulls, Butterflies, and Grasshoppers: A brief History of the Butterfly Effect in Nonlinear Dynamics", una de las explicaciones es que Lorenz no fue el autor del título de la conferencia. En ese entonces la sesión en la que él participaría estaba a cargo de su colega meteorólogo Philip Merilees. Era una sesión dedicada especialmente al tema de la impredecibilidad del clima y la dependencia sensible a las condiciones iniciales de éste y otros sistemas no lineales. El jefe de Merilees, Walt Roberts, le recalcó que era importante que los títulos de las conferencias de esa sesión fueran intrigantes, ya que había mucha competencia para atraer a los asistentes y esa era la única manera de llamar su atención. Como Edward Lorenz estaba fuera del país en el otoño de 1972, Merilees no pudo ponerse de acuerdo con él para decidir el título de la conferencia que daría en la 139th Meeting of the American Association for the Advancement of Science.

Merilees conocía perfectamente el trabajo de Lorenz y estaba consciente de que utilizaba la metáfora de la gaviota, pero pensó que sería más atractivo e interesante usar una mariposa. De hecho, él y un colega suyo, Douglas Lilly, barajaron varias ideas de títulos para la plática de Lorenz. Lilly recuerda que le sugirió a Merilees utilizar el de la novela *Storm*, en la que George Stewart relata la intrigante historia de unos meteorólogos que rastreaban una tormenta por la costa del Pacífico; aunque en la novela no hay algo específico que les sugiriera utilizar una mariposa, sí se encuentra la idea básica de la dependencia sensible a las condiciones iniciales expresada de la siguiente forma: "un chino que estornude en Shen-si (región de China) podría conducir a los hombres a traspalar nieve en la ciudad de Nueva York".

Lo que Merilees intentó fue mezclar esa idea del libro *Storm* con una aliteración de las palabras en inglés *butterfly-Brazil* (mariposa-Brasil) y *tornado-Texas*, según la cita que se encuentra en Hilborn (2004): "Había seguido muy de cerca el trabajo de Lorenz y estaba al tanto de la analogía de la gaviota, pero pensé que una mariposa podría ser más atractiva. Además, intenté hacer una aliteración: mariposa-Brasil, tornado-Texas."

Siguiendo con el artículo de Hilborn (2004), Merilees agrega que *seagull-Senegal* (gaviota-Senegal) hubiera funcionado si lo que buscaba era solamente una aliteración que se adecuara estrictamente al uso de la metáfora de la gaviota en Lorenz, pero en cambio prefirió la mariposa. Hay tres posibles razones para ello, y decimos posibles porque él ha declarado no recordar haber estado influido específicamente por algo o alguien para utilizar una mariposa. La primera razón es que las gráficas de Lorenz en el espacio de fases, llamadas atractores extraños en ese entonces y publicadas en el artículo "Deterministic Nonperiodic Flow", le recordaban a Merilees las alas de una mariposa. La segunda es que él pudo haber leído un cuento llamado *A Sound of Thunder* de Ray Bradbury, en el que unos viajeros en el tiempo van al pasado y accidentalmente matan a una mariposa; cuando regresan a su presente encuentran que la historia cambió. Y la tercera es que Merilees leyó el artículo "Problems and Promises of Deterministic Extended Range Forecasting" de otro meteorólogo llamado Joseph Smagorinsky (1969), en el que por primera vez aparece la mariposa: "O, podría el aleteo de una mariposa llegar a amplificarse al punto en que la simulación numérica se aparte de la realidad de modo tal que, ¿llegará un tiempo en que ambos deban relacionarse entre sí aleatoriamente?".

No está claro exactamente cuál fue la influencia directa para usar la mariposa, pero el resultado fue que entre Merilees y Lilly idearon el título: *Predecibilidad: ¿el aleteo de una mariposa en Brasil puede provocar un tornado en Texas?*

En su libro *The Essence of Chaos* (1993), Lorenz relata que él usaba a veces una gaviota para ejemplificar la dependencia sensible a las condiciones iniciales, pero por el título de la conferencia que debía dar se percató de que Merilees y Lilly habían cambiado la gaviota por una mariposa. Añade que él sí había leído tanto la novela *Storm* como el cuento *A Sound of Thunder* y que aunque Merilees no había leído este último, el cambio de la gaviota por la mariposa quizá se debió a que "la mariposa, con su aparente debilidad y carencia de poder, es una opción natural para un símbolo de que lo pequeño puede producir lo grande".[3]

Lorenz recuerda que en la conferencia trató de evitar responder a la pregunta del título, pero hizo notar, principalmente, dos cosas: si un solo aleteo de una mariposa pudiera provocar un tornado, entonces podía igualmente prevenirlo. También destacó que un solo

[3] De hecho, en Hilborn (2004) se menciona que 70 años atrás se había utilizado la metáfora de un grillo para explicar que los pequeños cambios pueden producir grandes cambios, y que el responsable fue W. S. Franklin al escribir una reseña sobre un libro de Pierre Duhem.

aleteo podría no tener más efecto en el clima que el aleteo de cualquier otra mariposa o las actividades de otras especies, incluyendo la nuestra. Lo que Lorenz presentó en esa famosa conferencia fueron los resultados de su trabajo anterior; no usó fórmulas matemáticas ni gráficas, sino una serie de reflexiones acerca de por qué los cambios infinitesimales que tienen los sistemas dinámicos no lineales en las condiciones iniciales generan cambios en su evolución con respecto al tiempo, y que estos cambios pueden llegar a ser impredecibles aun si son deterministas.

Conclusiones

Los trabajos como el de Lorenz estaban bajo el escrutinio de meteorólogos, físicos y matemáticos, porque ellos se oponían a un determinismo capaz de ser predecible en todo momento. En especial, el comportamiento que tenía el sistema climático de Lorenz no se había estudiado antes y fue la base de lo que posteriormente se llamó comportamiento caótico; éste dio paso a una visión completamente diferente, el surgimiento de la teoría del caos, que fue una revolución en términos del filósofo Thomas Kuhn.

Lorenz formó parte del grupo de investigadores que dieron pie a esa revolución y, una vez que se tuvo suficiente evidencia para este cambio de paradigma, la popularización del tema no se hizo esperar. Hubo dos publicaciones que hicieron que el concepto "efecto mariposa" emergiera como la metáfora utilizada por Edward Lorenz: los libros *Deterministic Chaos*, de Heinz Georg Schuster y Wolfram Just (1984), y *Chaos, Making a New Science*, de James Gleick (1987). La metáfora "el efecto mariposa" es pues sumamente popular hoy en día, tanto en la comunidad de expertos como en la sociedad. Es una metáfora relativamente fácil de entender para un público no especializado y además sigue siendo fuente de creatividad.

Adriana Elisa Espinosa estudió la carrera de Ingeniería en Computación en la FES Aragón de la UNAM. En la misma universidad hizo la maestría en Filosofía de la Ciencia en la línea de Comunicación de la Ciencia en 2009. En ese año obtuvo el grado de maestra en Filosofía, Ciencia y Valores por la Universidad del País Vasco en España. Actualmente es candidata a doctora en Filosofía de la Ciencia en la línea de Comunicación de la Ciencia en la UNAM. Tiene más de 25 publicaciones de divulgación de la ciencia entre las que destacan artículos, reseñas y fotografías en revistas y periódicos nacionales. Ha publicado alrededor de 30 artículos de investigación nacionales e internacionales en las áreas de dinámica no lineal, modelos de predicción de series de tiempo, redes neuronales, teoría del caos y, recientemente, sobre creatividad y el surgimiento de nuevas ideas en la ciencia.
adielisa@comunidad.unam.mx

Carolina Ureta estudió la carrera de Biología en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Realizó sus estudios de maestría en Ciencias en el Imperial College de Londres. Obtuvo el grado de doctora en Ciencias Biológicas en 2014 en el Instituto de Biología de la UNAM. Es candidata del Sistema Nacional de Investigadores. Ha publicado cuatro artículos científicos y dos están en revisión. También tiene dos artículos de divulgación publicados y dos en proceso de publicación.
carolina_ureta@hotmail.com

Lecturas recomendadas

Braun, Eliezer (1996), *Caos, fractales y cosas raras*, México, FCE/SEP/Conacyt, La ciencia para todos, núm. 150.

Crutchfield, James P., J. Doyne Farmer, Norman H. Packard y Robert S. Shaw (1987), "Caos", *Investigación y Ciencia*, 125:16-29.

Gleick, James (1987), *Chaos: making a new science*, EUA, Penguin Books.

Hilborn, Robert (2004), "Seagulls, butterflies, and grasshoppers: A brief history of the butterfly effect in nonlinear dynamics", *American Journal of Physics*, 72:425-427.

Lorenz, Edward N. (1993), *The Essence of Chaos*, EUA, University of Washington Press.

Lorenz, Edward N. (1963a), "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20:130-141.

______ (1963b), "The Predictability of Hydrodynamic Flow", *Transactions of The New York Academy of Sciences*, 25:409-432.

Schuster, Heinz Georg y Wolfram Just (1984), *Deterministic Chaos: an Introduction*, New York, VCH.

Smagorinsky, Joseph (1969), "Problems and Promises of Deterministic Extended Range Forecasting", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 50(5):286-311.

Stewart, Ian (2001), *¿Juega Dios a los dados? La nueva matemática del caos*. traducción de M. Ortuño, J. Ruiz Martínez *et al.*, Barcelona, España, Editorial Crítica.