

T-5

Teoría del caos y efecto mariposa

Sensibilidad a las condiciones iniciales y límites de la predicción

COPIA DE ESTUDIO ANONIMIZADA

Portada sustituida; contenido académico conservado desde la página 2.

Introducción

¿Cómo pueden dos situaciones que comienzan casi iguales terminar de maneras muy distintas? Esa pregunta está en el centro de la teoría del caos. La vemos cuando un pronóstico cambia al usar datos apenas diferentes o cuando un pequeño frenazo se propaga por el periférico, ya que está saturado por el tráfico.

La teoría del caos no dice que el mundo funcione sin reglas. Estudia ciertos sistemas que sí siguen reglas, pero pueden volverse difíciles de predecir a largo plazo porque una diferencia mínima al inicio puede crecer con el tiempo. Edward Lorenz mostró este problema al estudiar modelos atmosféricos y ayudó a establecer las bases modernas de este campo (Lorenz, 1963).

Esta investigación explica qué estudia la teoría del caos, qué significa el efecto mariposa y cómo se relacionan. También presenta un mini experimento para observar dos resultados que parten de valores casi idénticos.

Idea central

El caos no significa ausencia de orden. En algunos sistemas conocemos las reglas, pero una diferencia muy pequeña en el punto de partida puede crecer tanto que limita nuestra capacidad de anticipar exactamente qué ocurrirá después.

Introducción.....	2
Idea central.....	2
¿Qué estudia la teoría del caos?.....	3
Características principales.....	3
¿Qué es el efecto mariposa?.....	4
Relación entre ambos conceptos.....	4
Mini experimento: dos puntos casi iguales.....	4
Una analogía cotidiana: el tráfico.....	5
Conclusión.....	6
Referencias.....	6

¿Qué estudia la teoría del caos?

La teoría del caos estudia ciertos sistemas dinámicos no lineales. Estos cambian con el tiempo según reglas y pueden ser muy sensibles a sus condiciones iniciales. El concepto no se aplica automáticamente a todo lo que parece complicado o desordenado.

Un sistema determinista sigue reglas definidas: con exactamente el mismo estado inicial y las mismas reglas produciría la misma evolución. Sin embargo, no podemos medir todos los datos con precisión infinita. En un sistema sensible, dos mediciones casi iguales pueden conducir a resultados muy distintos.

Concepto	Explicación
Sistema dinámico	Es un sistema cuyo estado cambia con el tiempo.
Determinismo	La evolución sigue reglas y no depende necesariamente del azar.
No linealidad	Una variación pequeña no siempre produce una respuesta pequeña.
Condiciones iniciales	Son los datos o valores con los que comienza el sistema o modelo.

Características principales

Estas ideas ayudan a reconocer el comportamiento caótico. No tienen que aparecer de la misma manera en todos los casos, pero juntas explican por qué conocer una regla no siempre basta para realizar una predicción exacta.

Característica	¿Qué significa?
Sensibilidad al inicio	Dos estados casi iguales pueden separarse con el tiempo.
Respuesta no proporcional	Las relaciones internas pueden amplificar o reducir una variación.
Reglas claras	El sistema puede seguir la misma regla y aún producir trayectorias difíciles de anticipar.
Predicción limitada	El pronóstico exacto pierde confiabilidad cuando intentamos mirar muy lejos en el futuro.

¿Qué es el efecto mariposa?

El efecto mariposa explica la sensibilidad a las condiciones iniciales: dos trayectorias pueden empezar casi juntas y separarse después de varias interacciones. La metáfora se popularizó a partir del trabajo de Lorenz sobre los límites de los pronósticos atmosféricos (American Physical Society, 2003; Becker, 2017).

Una mariposa no produce por sí sola un tornado. La imagen indica que, en ciertos sistemas sensibles y no lineales, una perturbación pequeña puede integrarse a muchas relaciones y contribuir a una evolución diferente. No toda acción pequeña tendrá necesariamente una consecuencia enorme.

Qué significa	Qué no significa
Una diferencia mínima puede amplificarse.	Todo detalle pequeño siempre tendrá un efecto enorme.
El resultado depende del punto de partida.	Las reglas dejan de existir.
La predicción exacta puede perder confiabilidad.	El futuro es totalmente incomprensible.
La mariposa es una metáfora.	Una mariposa causa directamente un tornado.

Relación entre ambos conceptos

La teoría del caos es el campo general de estudio; el efecto mariposa es una de sus ideas principales. No son sinónimos exactos. Una forma sencilla de recordarlo es pensar que la teoría del caos es el tema completo y el efecto mariposa explica cómo una pequeña diferencia inicial puede crecer.

Mini experimento: dos puntos casi iguales

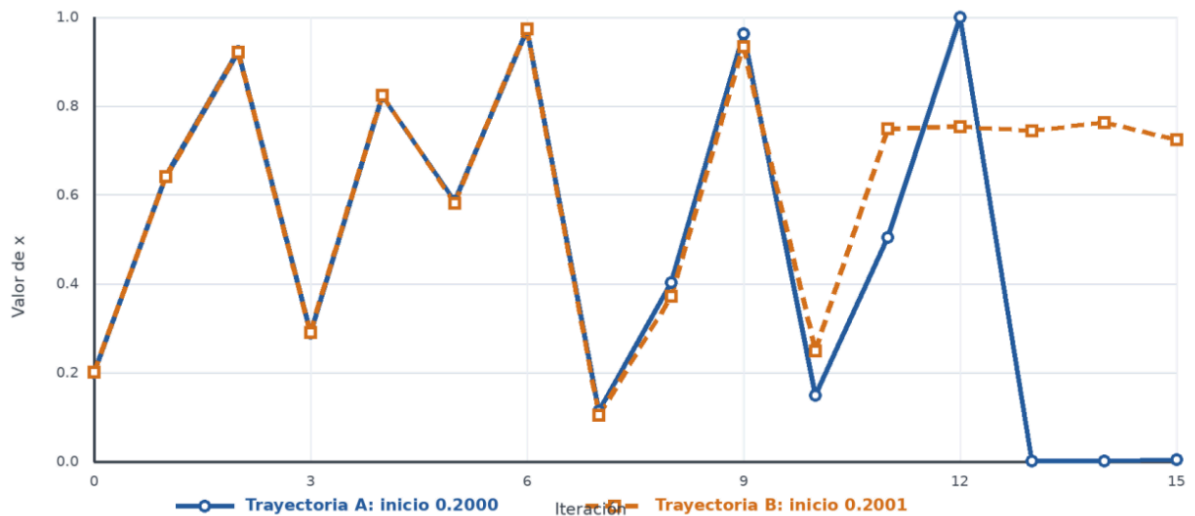
Podemos observar esta idea mediante el mapa logístico, un modelo matemático sencillo estudiado por Robert May (1976). La variable x toma valores entre 0 y 1, y la misma regla se aplica repetidamente:

$$x(n+1) = 4 x(n) [1 - x(n)]$$

No necesitas resolver la fórmula para comprender el ejemplo. Una computadora la aplica a dos trayectorias: A comienza en 0.2000 y B en 0.2001. La diferencia inicial es solamente 0.0001.

Misma regla, puntos iniciales casi iguales

Mapa logístico: $x(n+1) = 4 x(n) [1 - x(n)]$



Iteración	Trayectoria A	Trayectoria B	Diferencia
0	0.200000	0.200100	0.000100
4	0.821939	0.823467	0.001528
8	0.401974	0.370820	0.031154
12	0.999938	0.753283	0.246655
15	0.003936	0.723231	0.719295

Al principio, ambas trayectorias parecen cercanas. En la iteración 15, la diferencia supera 0.71. La regla nunca cambió; solo cambió el valor inicial. Este modelo sirve para observar sensibilidad, pero no representa literalmente una población real ni demuestra por sí solo toda la teoría del caos.

Una analogía cotidiana: el tráfico

Imaginemos que el periférico está a su capacidad máxima. Un conductor frena durante dos segundos; el vehículo de atrás frena un poco más; otros cambian de carril; el transmetro se retrasa y la demora alcanza otros puntos del periférico. La perturbación se propaga porque los vehículos están conectados por sus decisiones y por el poco espacio disponible.

Esta comparación ayuda a visualizar una amplificación, pero no demuestra que todo tráfico sea matemáticamente caótico. Para afirmarlo, sería necesario definir variables, construir un modelo y analizarlo.

Conclusión

La teoría del caos muestra que pueden existir reglas y orden aun cuando los resultados parecen irregulares. En ciertos sistemas dinámicos no lineales, una diferencia casi imperceptible al inicio puede crecer y hacer que dos trayectorias terminen muy separadas.

El efecto mariposa resume esa sensibilidad mediante una metáfora fácil de recordar. No afirma que cualquier acción pequeña produzca una gran consecuencia. Explica que algunos sistemas amplifican ciertas diferencias y, por ello, la predicción exacta a largo plazo tiene límites.

Desde la teoría de sistemas, la lección es analizar tanto las partes como sus relaciones y reconocer el alcance de nuestros modelos. Comprender esos límites permite evitar explicaciones demasiado simples.

Referencias

American Physical Society. (2003, 1 de enero). Circa January 1961: Lorenz and the butterfly effect. APS News. <https://www.aps.org/apsnews/2003/01/lorenz-butterfly-effect-1961>

Becker, E. (2017, 27 de julio). Butterflies, rounding errors, and the chaos of climate models. NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/butterflies-rounding-errors-and-chaos-climate-models>

Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 20(2), 130-141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2)

May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, 261, 459-467. <https://doi.org/10.1038/261459a0>

Material del curso

Teoría de Sistemas 1. (2026). Clase 8: Teoría del caos y efecto mariposa. Explicación y material proyectado por el ingeniero.