

Estudio de la sensibilidad al Caos en sistemas físicos y su impacto en la predicción climática

Rubén Torre Merino

Enero 2025

1. Introducción

En el estudio de los fenómenos naturales, hay sistemas cuyas ecuaciones de evolución son deterministas pero, aun así, resultan impredecibles a largo plazo debido a la enorme sensibilidad a las condiciones iniciales. Este fenómeno se describe comúnmente como “caos”. Ejemplos de ello son el comportamiento del péndulo doble, la función logística y, a una escala mucho mayor y más compleja, el clima terrestre [10], [11] .

La llamada “Teoría del Caos” cobró especial relevancia en el ámbito de la meteorología tras los trabajos de Edward Lorenz en la década de 1960, cuando descubrió que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales del modelo provocaban grandes diferencias en el resultado final de las predicciones. Además, se establecía un horizonte de predictibilidad más allá del cual, los modelos matemáticos no podían llegar a pesar de incrementar la precisión con la se conocía el estado inicial del sistema [7]. Este hallazgo supuso una transformación en la forma de comprender la predicción del clima y la fiabilidad de los modelos matemáticos.

En esta investigación se pretende analizar la aparición de caos en sistemas aparentemente simples (como la función logística [2] y el péndulo doble [6]) y trazar un paralelismo con la complejidad que entrañan los modelos de predicción climática. El foco se pondrá en la imposibilidad de predecir con exactitud el comportamiento de ciertos sistemas —pese a ser descritos por ecuaciones deterministas— cuando se producen ligeras variaciones en las condiciones iniciales.

Las preguntas fundamentales que orientan este trabajo serían:

- ¿Cómo se manifiesta el comportamiento caótico en sistemas relativamente simples, como la función logística y el péndulo doble [9], [5], [8]?
- ¿Qué relación guardan estos fenómenos caóticos con la complejidad de la predicción climática ?
- ¿Es posible realizar analogías entre la falta de predictibilidad de un sistema sencillo (péndulo doble) y la complejidad de la predicción del clima?

2. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es:

- Analizar experimental y teóricamente la presencia de caos en sistemas deterministas sencillos (función logística y péndulo doble) y establecer un paralelismo con la imposibilidad de predecir el clima con total precisión.

Este objetivo incluye:

- Describir el comportamiento caótico a partir de la función logística y del péndulo doble.
- Evaluar la sensibilidad de dichos sistemas a variaciones mínimas en las condiciones iniciales.
- Comparar las características de impredecibilidad en sistemas simples con la problemática de la predicción meteorológica y climática. Realizar entrevistas a expertos (físicos y meteorólogos) para contrastar la visión teórica y experimental con la práctica profesional en instituciones como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

El objetivo es realista porque:

- Se puede programar la función logística y el péndulo doble con Python y otras herramientas (ChatGPT, Algodoo [1], etc.). A lo largo del proyecto se utilizará extensivamente ChatGPT para las labores de programación.
- Se puede construir y seguir experimentalmente el movimiento de un péndulo doble con recursos accesibles.
- Se dispone de la posibilidad de realizar entrevistas y recopilar datos sobre la predicción del clima para establecer comparaciones.

3. Procedimiento

El método de trabajo constará de varias fases:

1. Revisión teórica y bibliográfica

- Lectura de artículos y libros sobre la Teoría del Caos, la función logística y la dinámica del péndulo doble.
- Investigación de los fundamentos de la predicción climática y de la historia del descubrimiento del caos en meteorología (Lorenz, etc.).

2. Estudio de la función logística

- Utilizar Excel para calcular iteraciones de la función logística y analizar gráficamente la aparición de comportamiento caótico al variar el parámetro de crecimiento.
- Emplear Python para automatizar y generar gráficos que muestren la dependencia extrema de las condiciones iniciales.

3. Construcción y análisis del péndulo doble

- Construir un péndulo doble sencillo con materiales asequibles (madera, metal, etc.).
- Implementar un sistema de seguimiento con la cámara del portátil y código en Python (apoyado en bibliotecas de visión por computadora [4]) para grabar y extraer datos de las trayectorias del péndulo.
- Comparar las trayectorias experimentales con simulaciones numéricas (por ejemplo, con Python o Algodoo), observando la divergencia de trayectorias al variar mínimamente las condiciones iniciales.

4. Paralelismos con la predicción climática

- Analizar la bibliografía científica y realizar entrevistas con meteorólogos o físicos en la AEMET u otras instituciones.
- Estudiar cómo la Teoría del Caos influye en la dificultad de predecir fenómenos meteorológicos a medio y largo plazo.
- Elaborar un informe comparando las conclusiones experimentales del péndulo doble con la dificultad de predicción en los modelos climáticos, resaltando la sensibilidad a las condiciones iniciales.

5. Recopilación y análisis de datos

- Organizar los datos obtenidos y de las mediciones del péndulo doble. Analizar la dispersión de resultados, la sensibilidad a condiciones iniciales y las conclusiones sobre impredecibilidad. Redacción de la memoria en L^AT_EX (LyX [3])
- Recoger toda la información teórica, los resultados numéricos y experimentales, las entrevistas y las conclusiones.

- Redactar la memoria final del proyecto

Con el objeto de documentar ampliamente el trabajo realizado, se realizará un blog en el que se irán publicando los resultados intermedios. Si el código generado es significativamente extenso, se procederá a crear un repositorio con el software

4. Recursos necesarios

Materiales de laboratorio y construcción

1. Piezas de metal o madera para construir el péndulo doble.
 - Tornillos, tuercas y herramientas básicas (taladro, destornilladores, etc.).
2. Software
 - Python y bibliotecas científicas asociadas
 - ChatGPT para apoyo en la generación de código y resolución de dudas puntuales.
 - Algodoo para simulaciones gráficas y de dinámica.
 - LyX (editor de \LaTeX) para la redacción de la memoria.
3. Recursos humanos
 - Tutor/a del proyecto para seguimiento y orientación.
 - Entrevistas con profesionales de la AEMET y/o físicos-meteorólogos disponibles.
4. Recursos de búsqueda y documentación
 - Acceso a internet para la consulta de artículos y foros de discusión académica.

5. Temporalización

El proyecto se desarrollará desde marzo hasta septiembre, distribuyendo las tareas de la siguiente manera:

1. Marzo – Abril
 - Revisión teórica y bibliográfica sobre caos, péndulo doble y modelos climáticos.
 - Primeros ensayos en Excel de la función logística y familiarización con Python para la simulación.
2. Mayo
 - Construcción del péndulo doble.
 - Diseño y pruebas del sistema de seguimiento con la cámara del portátil.
 - Comienzo de las simulaciones en Python y Algodoo.
3. Junio
 - Toma de datos experimental del péndulo doble y comparación con simulaciones.
 - Profundización en la función logística: iteraciones, bifurcaciones y mapa del caos.
 - Entrevistas preliminares con meteorólogos y/o físicos de la AEMET.
4. Julio
 - Análisis de datos obtenidos (péndulo doble y función logística).
 - Recopilación de información de las entrevistas y elaboración de conclusiones parciales.
 - Integración de conceptos teóricos y resultados experimentales.

5. Agosto

- Redacción inicial de la memoria en \LaTeX (LyX). Revisión y ampliación de resultados, gráficos y conclusiones. Septiembre
- Correcciones finales de la memoria. Presentación del proyecto de investigación completo. Preparación de la defensa o exposición oral si fuera requerida.

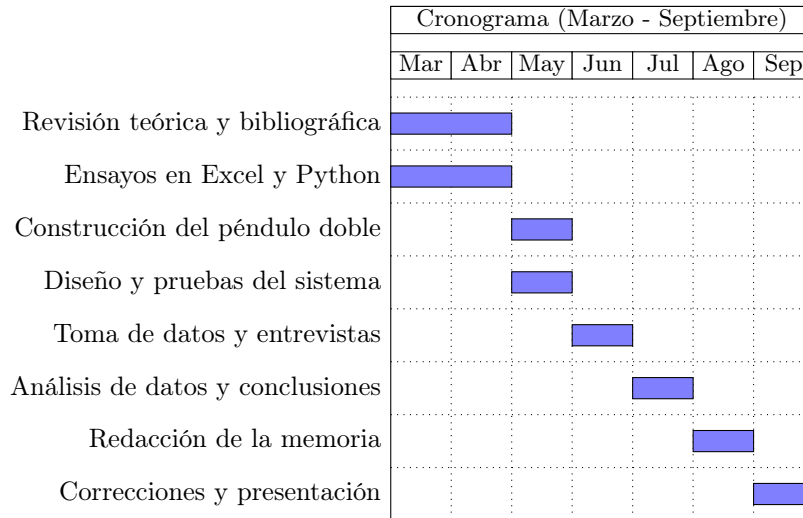


Figura 1: Cronograma

Referencias

- [1] Algodoo. <https://www.algodoo.com/>.
- [2] The logistic map: Attractors, bifurcation, and chaos. https://www.youtube.com/watch?v=_z-e7N99-rI.
- [3] Lyx the document processor. <https://www.lyx.org/>.
- [4] Open computer vision. <https://opencv.org/>.
- [5] Met Office Learn about weather. Chaos theory. <https://www.youtube.com/watch?v=Wps2vtzi1TU>.
- [6] Chriss Bud. Chaos: From celestial mechanics to climate. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2877 012086.
- [7] Josh Kastorf. Weather and chaos: The work of edward n. lorenz. <https://www.youtube.com/watch?v=Gf7rOMhtJBU>.
- [8] PBS. Chaos theory. <https://www.youtube.com/watch?v=oo7Bhythhtw>.
- [9] BBC World Service. A simple guide to chaos theory. https://www.youtube.com/watch?v=r_ahZ0gPTsk.
- [10] Veritasium. Chaos: The science of the butterfly effect. <https://www.youtube.com/watch?v=fDek6cYijxI>.
- [11] Veritasium. This equation will change how you see the world (the logistic map). <https://www.youtube.com/watch?v=ovJcsL7vyrk>.