

ANÁLISIS NO LINEAL DE LAS SERIES TEMPORALES DE MEDIDAS DE LA SST DEL SISTEMA ENSO

Núria CASTELL BALAGUER y Alejandro BODAS SALCEDO
Dpt. de Termodinàmica. Universitat de València

RESUMEN

En una disciplina como la Climatología nos vemos obligados a tratar con sistemas disipativos altamente no lineales. En este trabajo analizamos la dinámica del sistema ENSO (acrónimo de *El Niño-Southern Oscillation*) mediante técnicas no lineales. Para ello, estudiaremos las series temporales de la temperatura superficial del mar (SST).

Palabras clave: El Niño, temperatura superficial del mar, exponentes Lyapunov, dimensión fractal.

ABSTRACT

In Climatology we have to work with nonlinear systems. This paper introduces the main concepts in nonlinear dynamics. Starting with a sequence of measurements -a time series- we want to see what the actual data tells us about the system dynamics. In our work the time series is the SST of ENSO system.

Key words: El Niño, sea surface temperature, Lyapunov exponents, fractal dimension.

1. INTRODUCCIÓN

El progreso de las ciencias ha ido casi siempre ligado al progreso económico y social. La elaboración de grandes modelos de predicción iban sobre todo dirigidos a latitudes medias. Pero estos modelos no se podían aplicar a zonas de estudio con condiciones distintas, como la zona tropical. En el caso de la Oscilación del Sur los primeros estudios se remontan a los años veinte, estudios protagonizados por sir Gilbert Walker y Bliss mientras intentaban encontrar un sistema para predecir la fecha de comienzo y la intensidad del monzón hindú de verano. Pero no se produce un verdadero interés sobre la cuestión hasta que aparece el episodio más intenso observado desde que se tienen referencias, el año 1982-83. Hoy en día, los modelos acoplados océano-atmósfera de circulación general son los que más frutos han dado en la predicción del fenómeno (PHILANDER, 1996).

1.1 Una aproximación al fenómeno ENSO

Resulta interesante analizar temporalmente el sistema ENSO porque constituye una fuente inagotable de investigación. El Niño (episodio cálido) y la Niña (episodio frío) son dos fases de la Oscilación del Sur que vienen definidas por diversas anomalías atmosféricas y oceánicas en el Pacífico Ecuatorial. Pero es poco todavía lo que conocemos sobre la historia y orígenes de El Niño.

El Pacífico tropical es una región donde los vientos atmosféricos son altamente responsables de la distribución de la temperatura superficial del mar. Ésta, influye notablemente en la distribución de la precipitación y la circulación atmosférica de los trópicos. Los vientos húmedos tienden a soplar hacia presiones bajas en donde el aire converge, dando como resultado fuertes lluvias. Durante El Niño, el aumento resultante en las temperaturas del mar provoca su calentamiento y un aumento en la humedad relativa de la capa de aire. Así, la convección se rompe y las zonas de convergencia y lluvias asociadas se desplazan a un nuevo lugar, dando como resultado un cambio en la circulación atmosférica.

Los cambios relacionados con ENSO producen grandes variaciones en el tiempo y clima alrededor del mundo año tras año, y muchas veces tienen impactos profundos en la sociedad a causa de las sequías, inundaciones, olas de calor y otros cambios que pueden desorganizar gravemente la agricultura, la pesca, el medio ambiente, la salud, la demanda de energía y la calidad del aire. De esta forma, las adecuadas predicciones climáticas de temperaturas y de lluvias tienen inmensos beneficios potenciales para la sociedad.

Estudios recientes apuntan que un aumento del efecto invernadero puede producir una mayor intensidad en futuros episodios de El Niño, con todas las repercusiones económicas que esto desencadenaría (TIMMERMANN, 1999).

2. METODOLOGÍA, DESARROLLO Y RESULTADOS

Partimos de los datos suministrados por el Sistema de Observación TOGA (*Tropical Ocean Global Atmosphere*) en el Pacífico tropical. El primer paso es la discriminación de los datos que no sean válidos, desechando aquellos que pudieran ser fuente de error. El segundo paso consiste en analizar los datos, sobre la temperatura superficial del mar, mediante técnicas de análisis no lineal, técnicas tales como el cálculo de la dimensión fractal o de los exponentes de Lyapunov.

Para un primer análisis se ha utilizado un *software* comercial (SPROTT, 1992).

Las series temporales analizadas corresponden a medidas puntuales de la temperatura del mar en superficie, para diferentes longitudes y latitudes, desde el año 1980 hasta el 1999, incluyendo las fases cálidas de 1986-1987, 1991-1992-1993-1994, el evento frío de 1987-1988, y El Niño que se desarrolló en 1997-1998.

En la Figura 1 se ha representado la serie temporal correspondiente al periodo comprendido entre el año 1982 y 1999 en una de las zonas estudiadas. Como se aprecia, su comportamiento es complejo y no está determinada su dinámica. El interés del presente trabajo se centrará en ver si estas irregularidades en la serie introducen características propias de la dinámica de fenómenos caóticos, y qué consideraciones hay que tomar para el análisis de series temporales de datos experimentales.

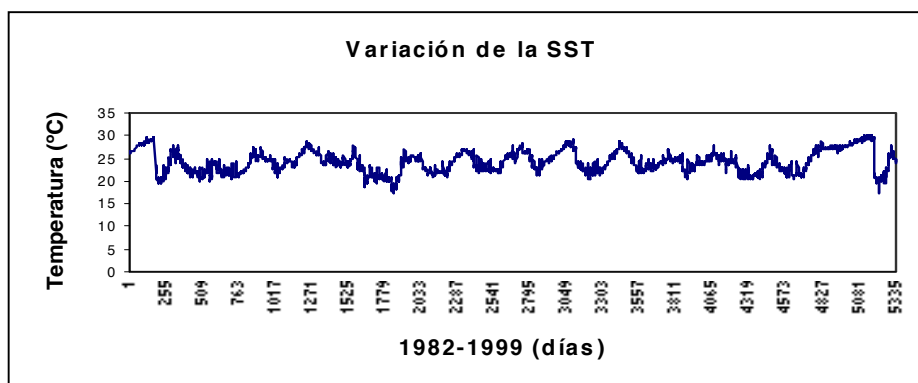


Figura 1. Variación de la temperatura superficial del mar entre los años 1982 y 1999.

Sabemos que la variabilidad climática resulta de interacciones complejas de variaciones libres y forzadas, ya que el sistema climático es un sistema disipativo altamente no lineal, lo cual no implica necesariamente que se trate de un sistema caótico, con muchas fuentes de inestabilidades. Todo ello, junto con los mecanismos de retroalimentación, hace que sea muy difícil obtener una interpretación directa en términos de causa-efecto.

El análisis de los datos no es trivial. La teoría del caos es una rama joven en la que no existe ningún postulado de clasificación que seguir al pie de la letra. Repasemos brevemente las propiedades fundamentales que presenta un sistema caótico: determinismo, aperiodicidad y alta sensibilidad a las condiciones iniciales.

La aperiodicidad significa que nunca se repetirá el mismo estado. Por determinista entenderemos que, conociendo las condiciones iniciales, podemos predecir el futuro del sistema, ahora bien, el problema radica precisamente en la precisión con que se conocen dichas condiciones. La sensibilidad a las condiciones iniciales, característica fuertemente acusada en los sistemas caóticos, significa que podemos ser capaces de hacer una predicción para tiempos cortos, pero nunca para tiempos demasiado largos, puesto que no conocemos con certeza el valor exacto de las condiciones iniciales en ningún sistema real.

Todas estas propiedades pueden estudiarse mediante diferentes técnicas. El problema cuando se trabaja con series de datos experimentales es encontrar un método que diferencie el ruido de dichas series de lo que caracteriza a una dinámica caótica.

Una caracterización preliminar antes de pasar a técnicas de análisis más complejas es el cálculo del *espectro de frecuencias*. De esta manera, representando la transformada de Fourier de la serie temporal, podremos reconocer si la señal es periódica, multi-periódica, cuasi-periódica o no periódica. Un espectro caótico se caracterizará porque una frecuencia principal, si la hay, aparecerá acompañada de un continuo de frecuencias (ADDISON,1997).

Pero este análisis es insuficiente porque necesitamos técnicas que distingan la aleatoriedad de lo que realmente confiere al sistema una dinámica caótica. Esto podremos hacerlo, bien midiendo la divergencia exponencial de trayectorias cercanas, o bien investigando su estructura fractal. En el primer caso, los *exponentes de Lyapunov* proporcionan una medida precisa de cualidades topológicas correspondientes a conceptos tales como impredecibilidad. Es pues un método para medir los efectos de estirar, contraer y plegar, en el espacio de fases de un atractor. En resumen, establecen la rapidez con que el sistema diverge al evolucionar desde unas condiciones iniciales próximas.

Tras un tiempo t , las trayectorias divergen exponencialmente siendo entonces su separación, ϵ_t :

$$\epsilon_t = \epsilon_0 e^{\lambda t}$$

donde λ es el exponente de Lyapunov (WOLF,1985).

Existirá divergencia en algunas direcciones y convergencia en otras. El número de exponentes de Lyapunov necesarios para definir el atractor es igual a la dimensión de su espacio de fases (ADDISON, 1997).

Un exponente positivo equivaldría a estirar el atractor en el espacio de fases, es decir, los puntos próximos se separarían. Uno menor que cero, equivaldría a contraer. Por otro lado, el atractor de una señal periódica tendrá solo exponentes de Lyapunov cero y negativos.

Un *atractor extraño* habrá de tener, como mínimo, un exponente mayor que cero. Si existe al menos un exponente positivo, el mayor de ellos predominará sobre los demás y el sistema será altamente sensible a las condiciones iniciales. Así, los exponentes de Lyapunov proporcionan una herramienta poderosa para poder categorizar un atractor caótico.

El segundo método para estudiar la dinámica caótica se refería a la *dimensión fractal o dimensión del atractor*. Esta dimensión es una medida de sus propiedades geométricas. Existen diferentes definiciones de la dimensión fractal, nosotros utilizaremos la dimensión de correlación, una de las más empleadas, que nos dará una cota superior al valor real de la dimensión fractal del atractor.

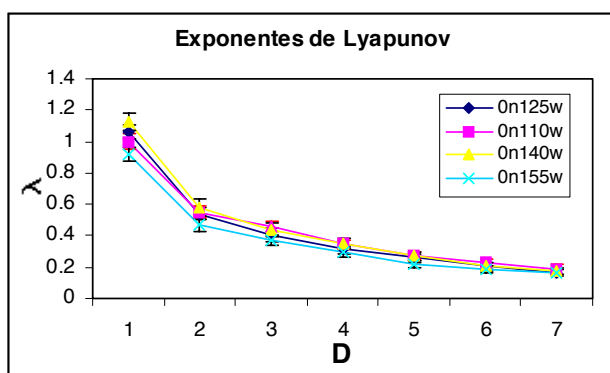


Figura 2. Exponentes de Lyapunov para distintas localizaciones.

En general, una buena estimación de la dimensión de correlación necesita una serie temporal larga (ADDISON,1997). Para nuestro análisis hemos utilizado series entre 5000 y 3000 puntos. Algunos autores coinciden en afirmar que si la serie temporal no es lo suficientemente larga, los resultados para estimar la dimensión del atractor podrían no ser tan fiables (ECKMANN,1992).

A medida que la *dimensión de embebido* aumenta, la *dimensión de correlación* también aumentará hasta saturar, es decir, hasta conseguir un *plateau* en el valor correcto. El *software* utiliza-

do calcula la dimensión de embebido entre 1 y 10. Se considera que una dimensión mayor que seis implica esencialmente una aleatoriedad en los datos.

Recordemos que la dimensión fractal representa el medio de ponderar cualidades como la discontinuidad o la irregularidad de un sistema y, en definitiva, su complejidad.

En nuestro caso, el cálculo de la dimensión de correlación nos da un valor entre 3 y 4, y tenemos como mínimo un exponente de Lyapunov positivo para las series analizadas.

En la Figura 2 hemos representado el valor más alto del exponente de Lyapunov en función de la dimensión de embebido, para las distintas series analizadas. La dimensión de embebido corresponde a la mínima dimensión del espacio de fases en que el atractor de nuestro sistema puede estar inmerso.

Otro punto interesante es la reconstrucción del atractor, pero hay que ser muy cuidadoso cuando se trata de sistemas dinámicos experimentales, porque generalmente estos tendrán muchos grados de libertad y contendrán ruido. Para la reconstrucción del atractor hemos empleado el método del *retraso temporal*. En este método se confina el atractor en un espacio m-dimensional, donde las coordenadas del vector X_i del atractor las construimos a partir de los datos originales:

$$X_i = (x_i, x_{i+k}, x_{i+2k}, x_{i+3k}, \dots, x_{i+(m-1)k})$$

donde k representa el retraso temporal.

La elección de k no es trivial porque normalmente no disponemos de series temporales muy largas y de gran calidad. Para el cálculo de k hemos comparado el criterio de mínima información mutua y el de la función de autocorrelación (ABARBANEL, 1996), obteniéndose resultados comparables. Una proyección bidimensional de este atractor se representa en la Figura 3.

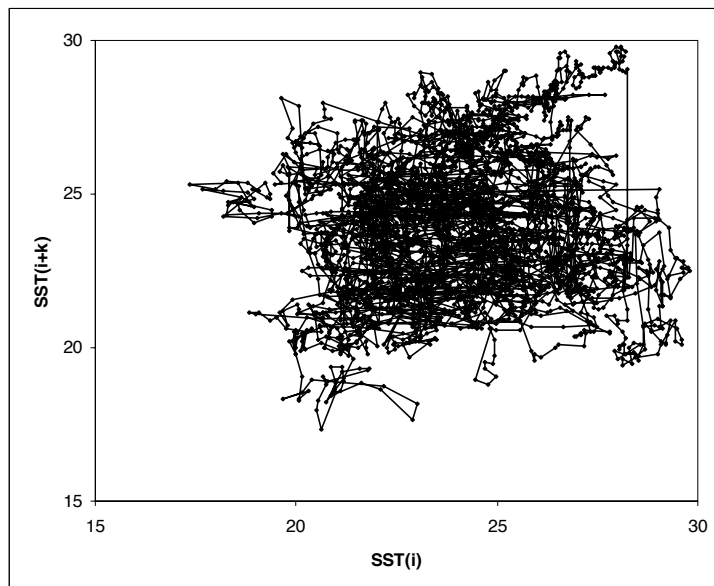


Figura 3. Proyección bidimensional del atractor.

3. CONCLUSIONES

Cuando analizamos un sistema mediante la teoría del caos, no buscamos un modelo a priori que describa la dinámica del sistema, sino estudiar dicha dinámica directamente a partir de los datos. En este trabajo hemos intentado abordar el estudio de El Niño desde esa perspectiva.

En cuanto al atractor, parece pertenecer a aquellos calificados como atractores extraños. En el espacio de fases cercano a un atractor extraño, dos trayectorias que partan de condiciones prácticamente idénticas divergirán a corto plazo y acabarán por ser muy diferentes a la larga.

La existencia de exponentes de Lyapunov positivos, nos indica un comportamiento caótico, con la consecuencia de una alta sensibilidad a las condiciones iniciales.

Los datos con que hemos trabajado son datos experimentales, de forma que no están exentos de ruido. Este ruido puede causar problemas cuando calculemos los exponentes de Lyapunov del atractor. Las trayectorias estarán menos definidas debido a las fluctuaciones aleatorias causadas por el ruido (BRYANT,1990)

Un filtro de pasa-baja podría ayudarnos a reducir el ruido, pero algunos autores opinan que podría ocasionar problemas en la medida de la dimensión y los exponentes de Lyapunov del sistema (MITSCHKE,1988; CHENNAOUI,1990; BROOMHEAD,1992).

La utilización de técnicas no lineales en el tratamiento de datos experimentales es relativamente reciente, su aplicación abarca desde circuitos eléctricos hasta encefalogramas. En nuestro caso, trabajamos con el clima, un sistema físico compuesto por una gran cantidad de subsistemas que interactúan entre ellos, y que hacen que su tratamiento sea complejo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARBANEL, H.D. (1996): *Analysis of Observed Chaotic Data*, New York, Springer-Verlag, 269pp.
- ABARBANEL, H.D., *et al.* (1990): "Prediction in Chaotic Nonlinear Systems: Methods for time series with broadband Fourier spectra". *Physical Review A*, **41**, 1782-1807.
- ADDISON, P.S. (1997): *Fractals and chaos*, Bristol, IOP, 253 pp.
- BROOMHEAD, D.S., *et al.* (1992): "Extracting qualitative dynamics from experimental data". *Physica D*, **20**, 217-236.
- BRYANT, P. *et al.* (1990): "Lyapunov exponents from observed time series". *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 1523-1526.
- CHENNAOUI, A., *et al.* (1990): "Attractor reconstruction from filtered chaotic signals". *Phys. Rev. A*, **41**, 4151-4159.
- ECKMANN, J.P., *et al.* (1992): "Fundamental limitations for estimating dimensions and Lyapunov exponents in dynamical systems". *Physica D*, **56**.
- MITSCHKE, F., *et al.* (1988): "Measuring filtered chaotic signals". *Phys. Rev. A*, **37**, 4518-4521.

- PHILANDER, G. (1996): "El Niño y La Niña". *Revista Española de Física*, **10**, 9-16.
- SPROTT (1992): *Chaos data analyzer. Physics Academic Software*. University of Wisconsin.
- TIMMERMANN, A. *et al.* (1999): "Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming". *Nature*, **398**, 694-696.
- WOLF, A., *et al.* (1985): "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series". *Physica D*, **16**, 285-317.

AGRADECIMIENTOS

Los datos utilizados en este trabajo han sido proporcionados por la red de estaciones del Océano Atmósfera Tropical (OAT- TAO), y puede accederse a ellos vía internet: <http://www.pmel.noaa.gov/toga-tao/realtime.html>.

Los autores agradecen también la ayuda y los comentarios recibidos de David Moriano.

