

# CAOS DETERMINISTA EN LA DINÁMICA HIDROLÓGICA DEL RÍO PARANÁ DURANTE EL ÚLTIMO SIGLO

Federico Giri<sup>1,2</sup>, Melina Devercelli<sup>1</sup>  
[fedegiri@gmail.com](mailto:fedegiri@gmail.com). Federico Giri

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Limnología, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (INALI, CONICET-UNL)

<sup>2</sup> Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad Nacional del Litoral (FHUC, UNL)

**KEYWORDS:** ríos de llanura aluvial, sistemas caóticos, máximo exponente de Lyapunov, complejidad, dimensión de correlación

Los ríos de las llanuras aluviales se encuentran entre los sistemas de agua dulce más complejos (Thorp, Thoms y DeLong, 2006; Amoros y Bornette, 2002). Configuran una red de ambientes integrados por fluctuaciones hidrológicas en un sistema único, donde el cauce principal y múltiples cuerpos de agua de la llanura aluvial interactúan por intercambios laterales de agua (Bayley, 1995). Se considera que el régimen hidrológico es el factor que rige el funcionamiento del sistema y que mantiene su integridad ecológica (Power, 1995; Ward & Stanford, 1995; Bellmore, Baxter, Martens & Connolly, 2013).

Los modelos lineales y no lineales son aproximaciones alternativas para capturar la variabilidad que resulta de la multiplicidad de factores involucrados en el comportamiento hidrológico (Sivakumar, 2016). En términos generales, los sistemas caóticos deterministas se caracterizan principalmente por una alta sensibilidad a las condiciones iniciales (Wilks, 1991), inestabilidad, no linealidad y simetría fractal, entre otros. Son sistemas en constante cambio, con patrones que nunca se repiten de la misma manera pero que se desarrollan dentro de ciertos límites (atractor) y periodicidad (Rosenstein, Collins & De Luca, 1993; Lewin, 1999). Los sistemas caóticos se diferencian de los sistemas estocásticos porque son susceptibles de modelización y predecibles a corto plazo, ya que surgen de sistemas deterministas.

El río Paraná es el segundo río más caudaloso de Sudamérica y el quinto del mundo. El hidrograma es característicamente variable con fluctuaciones permanentes que conducen a situaciones de aguas bajas y altas de diferente magnitud y duración (Neiff, Mendiondo & Depetris, 1990; Depetris, 2007).

Según nuestro conocimiento, la hidrología del río Paraná no fue estudiada bajo modelos que consideren un comportamiento caótico. Presumimos que el sistema fluvial del Paraná presenta una dinámica caótica debido a la multiplicidad de factores que actúan en diferentes escalas espaciales y temporales sobre el régimen hidrológico. Esto evidenciaría un sistema no lineal al borde del caos (sensu Kauffman, 1993). En este marco, el objetivo de nuestro trabajo fue analizar el comportamiento hidrológico del río Paraná durante el último siglo y dilucidar en qué medida prevalece la dinámica caótica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las series de tiempo estudiadas se basaron en observaciones diarias del nivel hidrométrico (HL) en tres estaciones ubicadas a lo largo del cauce principal del río Paraná. La Estación Itatí se encuentra en el tramo alto mientras que la Estación Corrientes y la Estación Subfluvial Túnel

se encuentran en el tramo medio del río. Los análisis se realizaron con una frecuencia de 7 y 15 días. El estudio abarcó un período de 111 años, de 1910 a 2015 para la Estación Itatí, de 1904 a 1990 para la Estación Corrientes y de 1904 a 2015 para la Estación Túnel. Las series de datos se obtuvieron de la base de datos integrada de COHIFE. (<http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/>).

### Data analysis

First, we performed linear (power spectrum and autocorrelation function) and non-linear analyses (surrogate test) to evaluate the dynamic of the three hydrological time series using the package ‘*nonlinearTseries*’, version 0.2.11 (García & Sawitzki, 2021) under the software environment R (R Core Team 2021). We reconstructed the phase space of each one of the three-time series using the Takens’ theorem to obtain the geometric structure of the multidimensional dynamic or attractor. Chaotic deterministic and random processes are differentiated by the **correlation** dimension because, in the former, it varies linearly with an increasing  $m$  and saturates after a certain value; whereas, in the latter, it varies linearly without reaching a saturation value. The **sample** entropy (hq) or Kolmogorov-Sinai entropy was assessed to measure the unpredictability of the time series using the  $D^2$  sum (Grassberger & Procaccia, 1983b). The **recurrence** quantification analysis was performed to quantify the number and duration of the recurrences in the phase space and to graphically identify, with the recurrence plot, if the dynamic of the system’s behaviour is periodic, random, or chaotic. Also, the **recurrence** plot was used to extract qualitative characteristics of a dynamical system (Eckmann, Kamborst & Ruelle, 1987). The **maximal** Lyapunov exponent ( $\lambda$ ) was performed as a measure of the strength of chaos. It quantifies the exponential rate by which two typical nearby trajectories diverge in time (Kantz & Schreiber, 2004). Finally, the **Hurst** exponent (H) which measures the intensity of long-range dependence in a time series (Hurst, 1951) was performed by using the modification proposed by Weron (2002).

### RESULTS

The Paraná River exhibited a fluctuating hydrological regime at the three gauging stations (Fig. 1), with periods of high and low waters that alternated with peaks of extreme values of water level that represent extraordinary floods and droughts (Fig. 2a). Mean water level was approximately 3.3 m at Corrientes and Itatí stations, and it slightly decreased down river, at Túnel Station. The **power** spectrum indicates a non-stationary time series. Similarly, the **autocorrelation** function accounted for a slow autocorrelation decay in the three-time series and, hence, these were considered non-stationary. **Surrogate** data analyses reject the null hypothesis that data come from linear stochastic processes, and non-linearity was assumed for the time series of the three hydrological gauging stations. According to those results, the parameter reconstructions of the time series were adequately performed by using methods for non-linear systems. **Noise** in time series was found to be almost imperceptible in the three data sets. According to the shape of the **attractor**, that the system is low dimensional chaos.

The **correlation** dimension ( $D^2$ ) values suggested a chaotic deterministic behaviour of the water level time series at the three river stations. Thus, according to the  $D^2$  values, the hydrological regime of the Paraná River was characterised as having different dimensional chaoticity. The **sample** entropy revealed that the water levels at the three river stations had positive values providing evidence about the unpredictability with a threshold of the system. The **recurrence** quantification analysis showed that the time series of Túnel has a higher

recurrence value (REC = 0.128828) than the time series of Corrientes (REC = 0.05294243) and Itatí (REC = 0.04802505). Comparing and interpreting the **recurrence** plots of the three time series, we observed that they present similar patterns corresponding to a superposition of patterns II (periodic or quasi-periodic) and III (non-stationary systems). The maximal **Lyapunov** exponent presented positive values ( $\lambda > 0.03$ ) for the three-time series. This means an exponential divergence of nearby trajectories that is interpreted as low-dimensional chaos. According to the **Hurst** exponent, the time series revealed a persistent behaviour ( $H > 0.5$ ), indicating that the system has a trend according to their state.

## **DISCUSIÓN**

Según nuestra hipótesis, las fluctuaciones hidrológicas del río Paraná presentan un comportamiento al borde del caos. En una visión general, toda la evidencia obtenida indica un caos dimensional bajo a alto. Así, la evidencia estaría indicando que el nivel hidrométrico del río Paraná presenta una dinámica caótica determinista, sensible a las condiciones iniciales, e influenciado, probablemente, por procesos geomorfológicos, ecológicos, entre otros, que mantienen al sistema dentro de ciertos límites. Las propiedades de la dinámica encontrada en el río Paraná evidencian un avance respecto de los enfoques tradicionales estacionarios y lineales utilizados en hidrología como ya lo señalaron otros autores (e.g., Sivakumar, 2016; Poff, Tharme & Arthington, 2017), asentando la posibilidad de implementar un universo diferente de análisis para comprender adecuadamente la naturaleza del sistema.