

# UN ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA DE LA LLUVIA EN CALIFORNIA PARA EXAMINAR EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Carlos E. Puente, Mahesh L. Maskey y Bellie Sivakumar

Department of Land, Air and Water Resources, Universidad de California, Davis, Estados Unidos.  
E-mail: cepuente@ucdavis.edu, mlmaskey@ucdavis.edu, s.bellie@unsw.edu.au

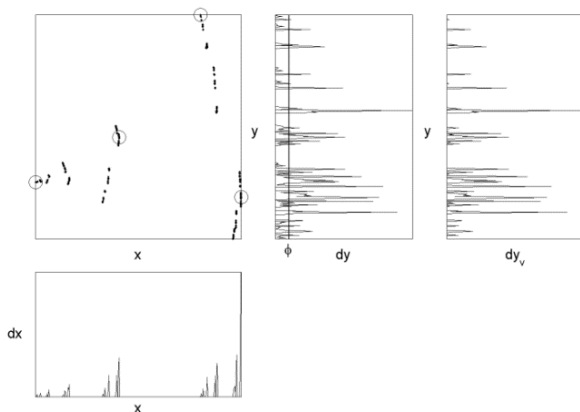
## Introducción

Este trabajo presenta un estudio de la geometría de la lluvia en California, cual observada en cuatro estaciones, de sur a norte, Cherry Valley, Merced, Sacramento y Shasta, las cuales contienen, respectivamente, 59, 116, 115 y 72 años de información diaria hasta el año 2015. Intentando discernir efectos de cambio climático, dicha información fue codificada, de año en año, empleando una adaptación del procedimiento Fractal-Multifractal, FM, introducido por Puente (1996, 2004), de modo que la evolución de los parámetros geométricos FM de cada año (9 en total) representen la dinámica de la lluvia y permitan investigar la complejidad de la misma en el tiempo, y por comparación entre estaciones, en el espacio.

## Métodos

El método empleado para codificar la información de lluvia diaria observada en un año dado es una adaptación del procedimiento Fractal-Multifractal FM (Puente et al., 2018). Como lo ilustra la Figura 1, una medida *multifractal*,  $dx$  sobre  $x$ , le sirve de *entrada* a un *sistema* dado por un objeto *fractal* disperso (Cantoriano), que opera desde  $x$  hasta  $y$ , y él produce como *salida*, transfiriendo  $dx$  por el sistema, una distribución *derivada*,  $dy$  sobre  $y$ . Al restringir dicha salida por encima de un *umbral*  $\phi$ , se obtiene un conjunto  $dy_v$  sobre  $y$ , que, al interpretarse la coordenada  $y$  como el tiempo, posee periodos de inactividad y una intermitencia similar a la de la lluvia (normalizada a una unidad), a la escala requerida por el estudio.

Los objetos  $dx$  y  $dy$  son *histogramas* estables de puntos  $(x, y)$ , sobre  $x$  y  $y$ , compuestos por 365(366) valores y hallados iterando funciones sencillas con componentes lineales del plano al plano, las cuales contraen el espacio y definen la geometría de un *atrayente* único—el objeto *fractal* (Barnsley, 1988)—que pasa por ciertos puntos, cual indicado en la Figura 1 por circunferencias. La construcción empleada aquí requiere de dos tales funciones y un total de 9 parámetros, los cuales corresponden a las localizaciones de los puntos, parámetros que escalan la coordenada y en ambas funciones, el sesgo de una moneda usada para iterar las funciones y el valor del umbral.

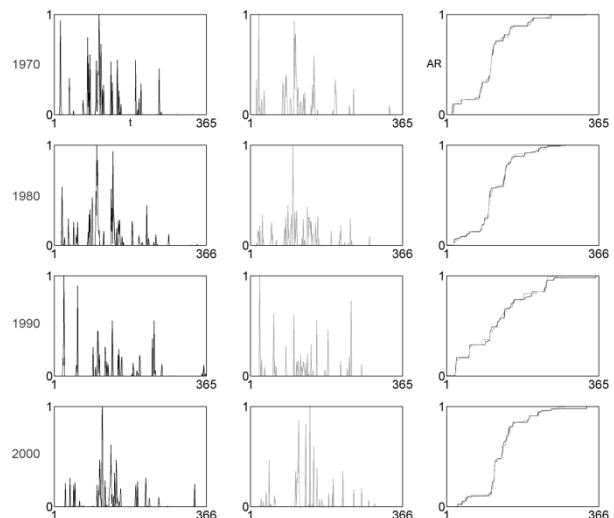


**Figura 1.-** Una adaptación del método FM: de una medida Cantoriana  $dx$ , a una medida derivada  $dy$ , mediante un objeto fractal disperso de  $x$  a  $y$ . El conjunto  $dy_v$ , se halla restringiendo  $dy$  arriba de un umbral  $\phi$ .

Para codificar datos de lluvia—normalizados a una unidad—se usó, conjuntamente con el método FM, un algoritmo de optimización basado en un *enjambre de partículas* con miembros dinámicos (Fernández-Martínez et al., 2010; Huang et al., 2012; Maskey et al., 2015) y empleando como función objetivo el error cuadrático medio de la lluvia acumulada durante el año en cuestión, i.e. su *curva de masa*, sumando los errores tanto a nivel diario, como también cada tres y siete días. Los resultados mostrados a continuación corresponden a los mejores parámetros hallados, típicamente luego de un día de CPU por año de datos, los cuales, dada la dimensión del espacio de búsqueda, no siempre corresponden a “óptimos globales”.

## Resultados

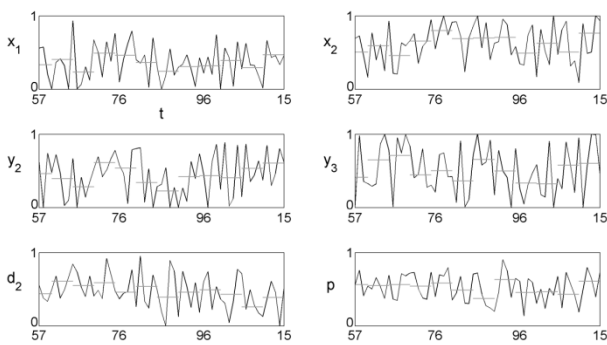
La Figura 2 muestra ejemplos típicos de codificaciones FM de lluvias encontradas para diversos años (del 1 de octubre al 30 de septiembre) en la estación situada más al sur, Cherry Valley. Tal y como se observa, aunque los conjuntos de lluvia no son idénticos, sus curvas de masa se ajustan fielmente, y sus errores, cuadráticos medio y máximos, a nivel diario son solamente  $1.6\% \pm 0.2$  y  $7.1\% \pm 1.5$ , sobre los 59 años disponibles. Como en las otras estaciones se hallaron resultados similares, se concluye que los ajustes son suficientemente fiables para intentar estudiar la dinámica de la lluvia empleando la evolución de los 9 parámetros que permiten describir, de una forma determinista, los datos observados, año tras año.



**Figura 2.-** Algunas codificaciones de la lluvia en Cherry Valley. De izquierda a derecha: observado, ajuste FM y acumuladas.

En dicho espíritu, la Figura 3 muestra la evolución de seis de los nueve parámetros FM “óptimos” encontrados para Cherry Valley, conjuntamente con promedios calculados cada cinco años que permiten visualizar la variabilidad encontrada. Como se observa, ningún parámetro (y tampoco los otros tres) exhibe tendencia alguna y más bien ellos muestran una amplia variación durante la duración de los registros. Lo mismo sucede cuando se consideran otras “soluciones equi-finales” cercanas a

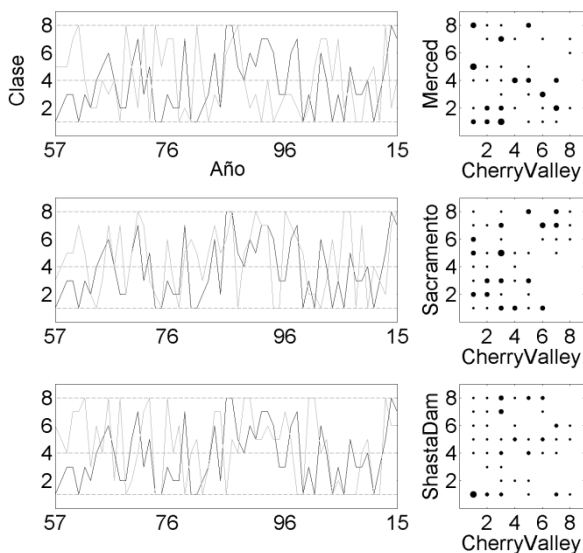
la mejor: no se encuentran evoluciones de parámetros que muestren una tendencia definida en función del tiempo.



**Figura 3.-** Evolución de seis de los nueve parámetros geométricos FM y sus promedios cada cinco años para la lluvia en Cherry Valley.

Dado que las otras estaciones en el estudio también dieron lugar a comportamientos variables y carentes de tendencias en sus parámetros FM, se argumenta que, acaso contrario a lo esperado pues los caudales pico en la segunda mitad del siglo veinte se adelantan en la primavera con respecto a la primera mitad del siglo (Pathak et al. 2018), el *cambio climático* no se refleja de una manera obvia en la geometría de la lluvia en California.

Empleando técnicas de agrupamiento (e.g. k-means clustering), los parámetros FM para cada año permiten clasificar, en clases geométricas, lo observado en cada una de las estaciones, para así también comparar las diferentes localizaciones y dilucidar su complejidad relativa. La Figura 4 muestra dicho análisis clasificando los registros en 8 clases y contrastando la estación Cherry Valley con las demás durante sus años concurrentes.



**Figura 4.-** Comparación concurrente por clases de todas las estaciones de lluvia con la estación en Cherry Valley.

Como se observa, las variaciones en el tiempo nuevamente no reflejan tendencias notorias sino, más bien, una variabilidad evidente y los diagramas comparativos, de estación a estación, evidencian también una carencia de correlación espacial de la lluvia por clases.

Los valores de los parámetros geométricos FM pueden ser modelados, uno por uno, como series de tiempo y también de la manera en que se estila en estudios de dinámica no-lineal. Así, se encuentra que todos ellos, y para las cuatro estaciones estudiadas en California, en efecto son tan variables que tienen

funciones de auto-correlación que decrecen rápidamente a valores estadísticamente indistinguibles de cero y sus diagramas de fase (graficando parejas o ternas de parámetros sucesivos y empleando también diversas distancias entre ellos) exhiben, a su vez, gran variabilidad y la carencia de atrayentes obvios.

Al final, el estudio corrobora la bondad del procedimiento geométrico FM, el cual posee una interpretación física (Cortis et al., 2013), como un lenguaje propicio para describir de una manera determinista información errática como la lluvia (Puente, 2004). Los resultados ratifican, a su vez, la “complejidad” de la lluvia (así pueda ser determinista) tanto en el tiempo como en el espacio, pues no es posible distinguir geoméricamente, ni mediante técnicas clásicas ni empleando el método FM, datos de una estación de lluvia con respecto a otra. La carencia de tendencias ciertamente limita la posibilidad de encontrar predicciones fieles de lluvia con un año de antelación y esto resulta ser así independientemente del *cambio climático*.

## Referencias bibliográficas

- Barnsley, M.F. (1988). *Fractals Everywhere*, Academic Press, San Diego.
- Cortis, A., C.E. Puente, H.H. Huang, M.L. Maskey, B. Sivakumar & N. Obregón (2013). “A physical interpretation of the deterministic fractal-multifractal method as a realization of a generalized multiplicative cascade”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Vol. 28, No. 6, pp. 421–429.
- Fernández-Martínez, J.L., E. García Gonzalo, J.P. Fernández Álvarez, H.A. Kuzma & C.O. Menéndez Pérez (2010). “PSO: A powerful algorithm to solve geophysical inverse problems Application to a 1D-DC resistivity case”. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 71, No. 1, pp. 13–25.
- Huang, H.H., C.E. Puente & A. Cortis (2012). “Geometric harnessing of precipitation records: reexamining four storms from Iowa City”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 4, pp. 955–968.
- Maskey, M.L., C.E. Puente, B. Sivakumar & A. Cortis (2015). “Encoding daily rainfall records via adaptations of the fractal multifractal method”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 30, doi 10.1007/s00477-015-1201-7.
- Pathak, T.B., M.L. Maskey, J.A. Dahlberg, F. Kearns, K.M. Bali & D. Zaccaria (2018). “Climate change trends and impacts on California Agriculture: A detailed review”. *Agronomy*, Vol. 8, No. 3, p. 27.
- Puente, C.E. (1996). “A new approach to hydrologic modelling: derived distribution revisited”. *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 65–80.
- Puente, C.E. (2004). “A universe of projections: may Plato be right?”. *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 19, No. 2, pp. 241–253.
- Puente, C.E., M.L. Maskey & B. Sivakumar (2018). “Studying the Complexity of Rainfall within California via a Fractal Geometric Method”. En *Advances in Nonlinear Geosciences*, Ed. A.A. Tsonis, Springer, pp. 519–542.