



La geometría fractal del EEG

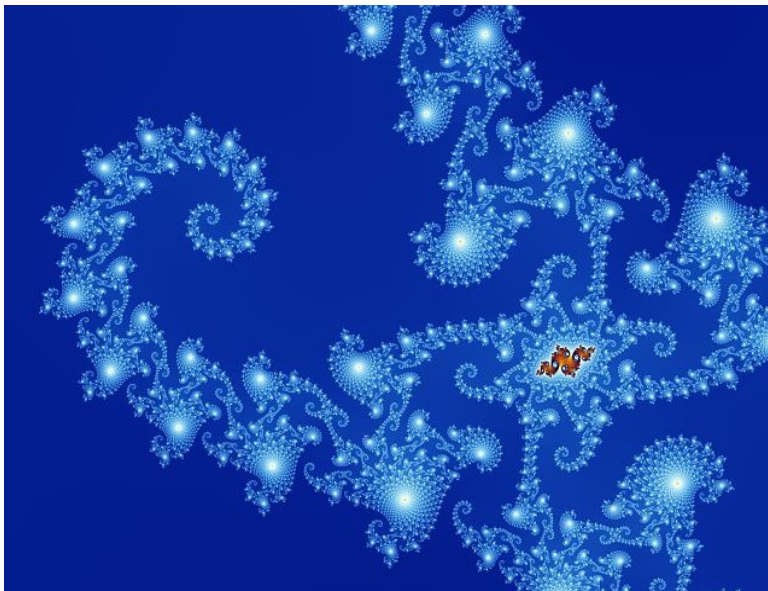
Antonio Ibáñez-Molina y Sergio Iglesias-Parro
Dept. de Psicología, Universidad de Jaén, España

Tipo de artículo: Actualidad.

Disciplinas: Psicología, Neurociencia.

Etiquetas: fractales, EEG, sistemas no lineales, cerebro.

El cerebro en acción es un sistema no lineal en el que no existe una relación evidente entre las causas y las consecuencias de un estado determinado: cambios sutiles en un estímulo pueden generar patrones corticales radicalmente distintos. Si las distintas funciones cognitivas surgen de este sistema complejo, es fundamental la introducción de métodos no lineales en el estudio de la relación mente-cerebro. En este artículo hacemos hincapié en la naturaleza fractal del electroencefalograma (EEG) y repasamos la relación entre la dimensión fractal del EEG y distintos estados mentales.



(cc) Wolfgang Beyer.

Cuando Lewis F. Richardson descubrió que la frontera entre España y Portugal no medía la misma longitud según los mapas de cada país, no fue porque ambos reclamaran una región como propia. En realidad, cada país había estimado la longitud con una escala diferente. En general, una escala de medir cuyas unidades sean muy grandes dará lugar a una frontera con un trazado suave o menos plegado que una escala cuyas unidades sean mucho más pequeñas. Si se midiera una frontera con una escala mínima en la que se tuviera en cuenta cada riachuelo y recodo de camino que separa dos países ¿no sería extremadamente larga debido a sus innumerables plegamientos? Pues bien,

los objetos que presentan esta propiedad, es decir, plegamientos o cambios repetitivos en su estructura que son evidentes a distintas escalas, son los denominados fractales. Una de sus características principales es la

autosimilitud. Este concepto indica que la forma del objeto se preserva independientemente de la escala a la que se explore (Mandelbrot, 1977). Sería como mirar un objeto con una serie de lentes de distintos aumentos y ver siempre el mismo tipo de patrón en su morfología (véase la Figura 1).

¿Pero qué tiene que ver la mente con las fronteras y la autosimilitud? Algunos neurocientíficos se han dado cuenta de que el trazado del electroencefalograma (EEG) se correspondía con un fractal. Además, algunos trazados del EEG son más sinuosos y enmarañados que otros. Cabe preguntarse entonces si el plegamiento de esta curva se relaciona con alguna función particular del cerebro. Para responder a esta pregunta se ha recurrido a la cuantificación del nivel de rugosidad de la curva del EEG a través de la estimación de su dimensión fractal. Podemos entender este concepto con un ejemplo: imaginemos un hilo extendido cuidadosamente en línea recta sobre una mesa. Si no tenemos en cuenta su grosor, podemos decir que se trata de un objeto con una sola dimensión (longitud). Si el hilo se teje en forma de rectángulo, el objeto tendrá ahora dos dimensiones (longitud y altura). ¿Qué ocurriría si el hilo se dispone en forma de ondas sobre la mesa? Su dimensión se considerará como intermedia, entre 1 y 2. Así, si el hilo se repliega muy poco, su dimensión estará más cerca de 1, pero si se hace en mayor grado se aproximará a 2. A esta cuantificación se la denomina dimensión fractal y caracteriza el grado de complejidad estructural de la curva. Las señales EEG se sitúan por lo general en un punto intermedio entre una señal simple y una señal cuya estructura está compuesta de cambios aleatorios (Figura 2).

La dimensión fractal (complejidad) del EEG se ha relacionado con distintas funciones o patologías del cerebro. Por ejemplo, la complejidad del EEG durante un ataque epiléptico es más baja que cuando el

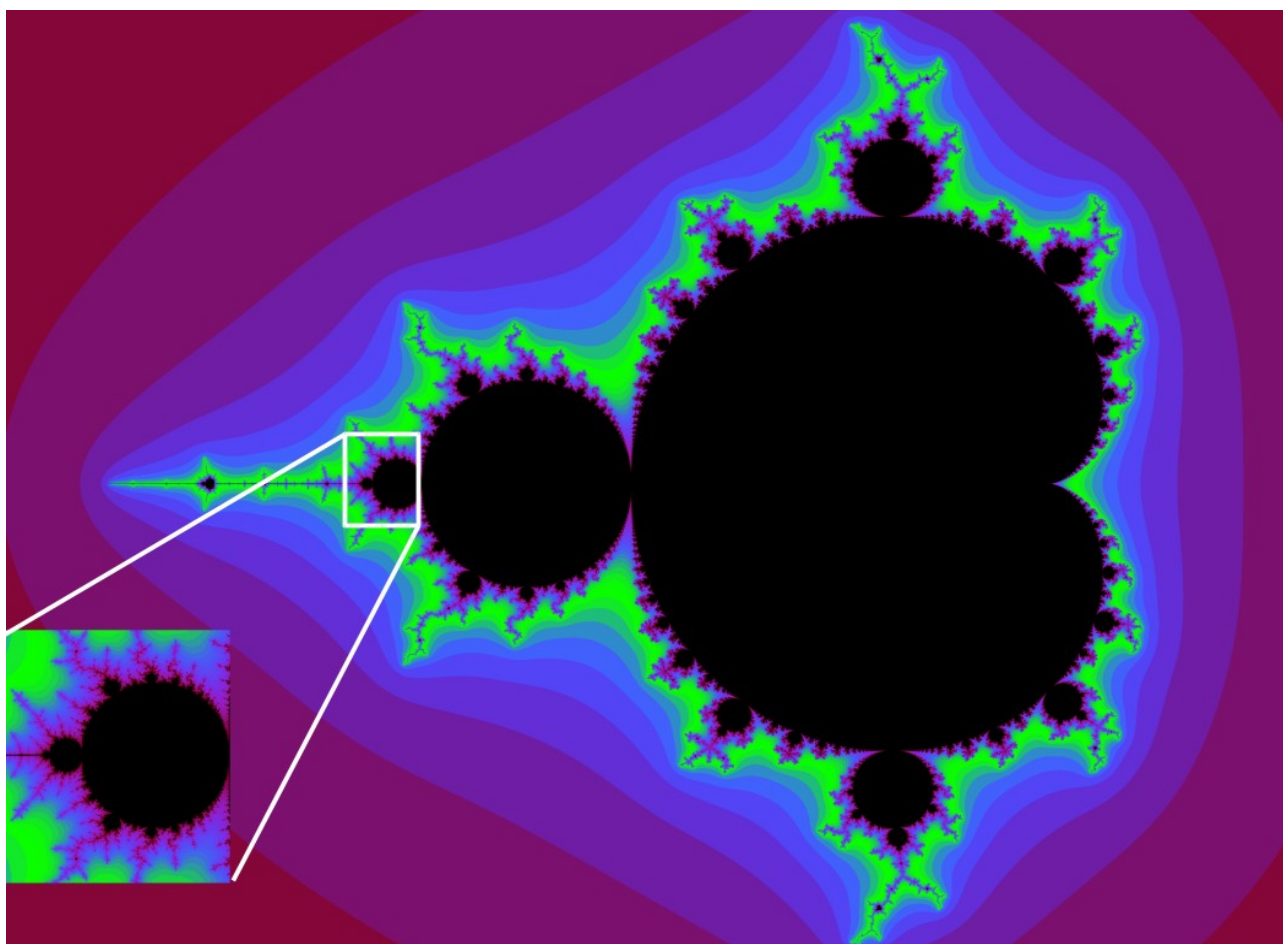


Figura 1.- Fractal perteneciente a la familia de los denominados conjuntos de Julia. Si observamos el borde del objeto e imaginamos que descendemos sobre una parte de él, es fácil darse cuenta de que su forma se irá preservando a lo largo del descenso. La estructura del fractal es una copia de sí misma a lo largo de cualquier escala. (cc) Wolfgang Beyer, modificada por Julio Santiago).

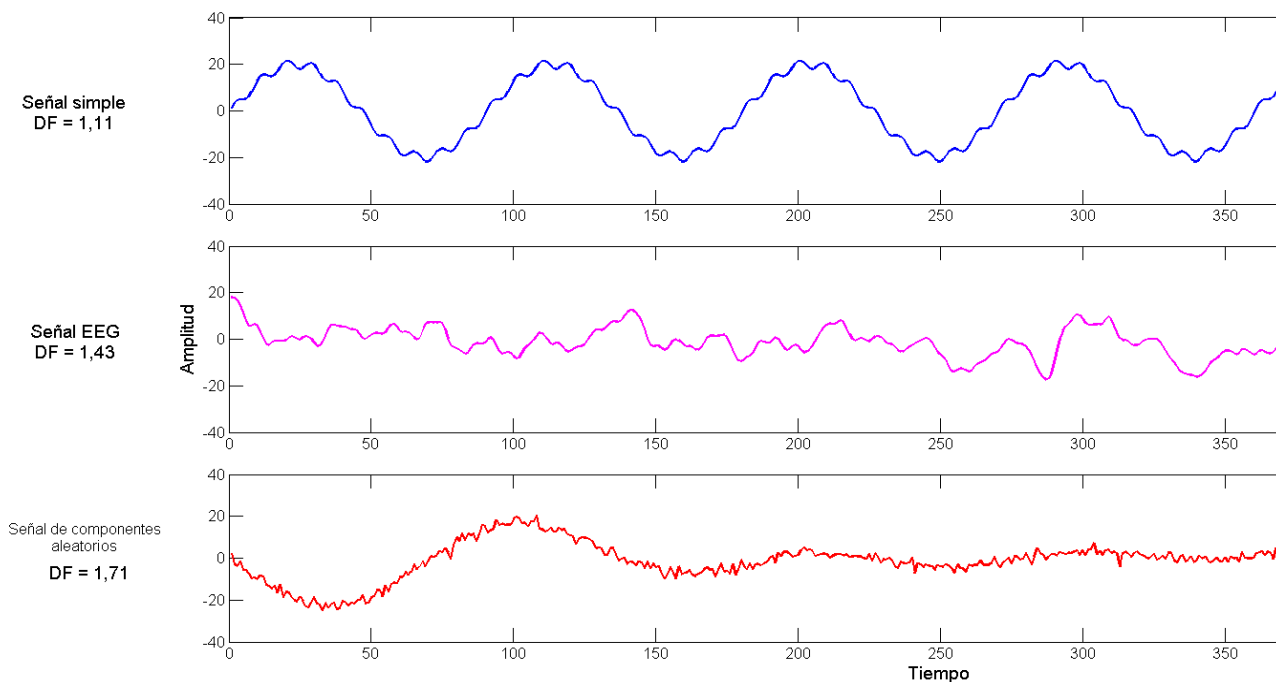


Figura 2.- Tres señales con distinta dimensión fractal. La señal del panel superior ha sido construida como la suma de dos ondas sinusoidales, y presenta una baja dimensión fractal. La señal central se corresponde con un EEG en estado de reposo y su complejidad se sitúa en un punto intermedio entre 1 y 2. La señal representada en el panel inferior ha sido construida con dos componentes aleatorios y presenta una dimensión fractal cercana a 2. El cerebro pues, genera ondas cuya complejidad gira entre la simplicidad y el desorden.

paciente no lo tiene (Stam, 2005). La complejidad del EEG asociado a trastornos como la esquizofrenia tiende a ser mayor que en personas sanas (Fernández y cols., 2013). La complejidad del EEG asociada a distintos tipos de procesamiento cognitivo no ha sido muy explorada. Un trabajo de referencia, realizado por Mölle y sus colaboradores (1999), mostró que el pensamiento divergente (asociación libre de ideas) se relaciona con una dimensión fractal mayor que el pensamiento convergente (focalizado en un objetivo).

Siguiendo a Mölle, hemos investigado (Ibáñez-Molina e Iglesias-Parro, 2014) la diferencia entre la complejidad del EEG en situaciones en las que atendemos a estímulos externos (una película) con aquellas en las que estamos atendiendo a nuestros propios pensamientos (mind-wandering). Los resultados indicaron que la dimensión fractal del EEG era mayor cuando los participantes se distraían de la película que cuando estaban atentos a ella. Además, nuestro procedimiento experimental nos permitió comparar la complejidad del EEG asociada a experiencias perceptivas auditivas y visuales. Lo que encontramos fue que, cuando los participantes atendían a la información auditiva de la película encontramos un patrón de complejidad distinto a cuando estaban prestando atención a la información visual: la complejidad aumentaba en algunas áreas y disminuía en otras.

Por tanto, existe una relación entre la dimensión fractal del EEG y la cognición humana, pero ¿qué significa esta relación? Necesitamos establecer un nexo entre la complejidad del EEG y el funcionamiento del cerebro para ayudarnos a entender el binomio mente-dimensión fractal. Sobre esta cuestión hay pocos estudios. En uno de ellos, Lutzenberger (1995) encontró indicios de que la complejidad refleja el número de regiones corticales que funcionalmente contribuyen a producir el trazado del EEG. Esta propuesta es coherente con los datos obtenidos con pacientes y personas sanas. Como la esquizofrenia se relaciona con una disminución en la conectividad entre diferentes áreas cerebrales (muchas áreas funcionales independientes) y los ataques epilépticos se producen cuando las neuronas de amplias regiones de la corteza cerebral disparan en sincronía (pocas regiones funcionales), podemos relacionar complejidad con número de áreas de la corteza

que independientemente contribuyen al EEG. Además, esta explicación encaja con los resultados de Mölle y con los nuestros, ya que el pensamiento más difuso o divergente estaría más cercano a la esquizofrenia (alta complejidad), mientras que el convergente y centrado en pocos elementos podría asemejarse a ciertos estados epilépticos.

La complejidad del EEG parece reflejar propiedades de conectividad del cerebro que dan lugar a diversos estados mentales. Todavía no sabemos la sensibilidad de esta medida para discernir entre diferentes procesos cognitivos, pero nuestros datos sugieren que podría mejorar los análisis lineales clásicos.

Referencias

- Fernández, A. Gómez, C., Hornero, R. y López-Ibor, J. J. (2013). Complexity and Schizophrenia. *Progress in Neuro-pharmacology and Biological Psychiatry*, 45, 267-276.
- Ibáñez-Molina, A. J. y Iglesias-Parro, S. (2014). Fractal dimension of internally and externally generated conscious percepts. *Brain and Cognition*, 87, 69-75.
- Lutzenberger, W., Preissl, H. y Pulvermüller, F. (1995). Fractal dimension of electroencephalographic time series and underlying brain processes. *Biological Cybernetics*, 73, 477-482.
- Mandelbrot, B. B. (1977). *The fractal geometry of nature*. New York: W. H. Freeman.
- Mölle, M., Marshall, L., Wolf, B., Fehm, H. L., y Born, J. (1999). EEG complexity and performance measures of creative thinking. *Psychophysiology*, 36, 95-104.
- Stam, J. (2005). Nonlinear analysis of EEG and MEG: A review of an emerging field. *Clinical Neurophysiology*, 116, 2266-2301.

Manuscrito recibido el 12 de septiembre de 2014.

Aceptado el 13 de noviembre de 2014.