

Análisis fractal de las fallas y el parámetro b de la Cordillera Bética

J. Henares Romero¹, C. López Casado¹, F. Martínez López², J.A. Peláez Montilla³ y J. Delgado⁴

1 Dpto. de Física Teórica y del Cosmos, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva s/n, 18071-Granada. neehman@hotmail.com, clcasado@ugr.es

2 Dpto. de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva s/n, 18071-Granada. franmar@ujaen.es

3 Dpto. de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Jaén, C/ Virgen de la Cabeza, 2, 23071-Jaén. japelaez@ujaen.es

4 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Alicante, Ap. de Correos 99, 03080 Alicante. Jose.delgado@ua.es

ABSTRACT

Several phenomena in the nature present a self organized critically character, that is to say, they are maintained near a critical point (Bak et al., 1988). In the critical state there is no longer a natural length scale so that statistics are applicable. Among them they are the active faults and the earthquakes. In this work, a fractal study of the Betic Cordillera seismotectonic is presented. We consider the fractal characteristics of faults and seismicity. Using the box-counting approach, the D_0 dimension of faults in the Betic Cordillera is evaluated. Using the least squares method the b parameter is also calculated. In function of the obtained values of the fractal dimension of faults and of the b parameter of the earthquakes and keeping in mind the known seismotectonic characteristics we have been defined several regions inside the Betic Cordillera with specific fractal characteristics. Then, the relation between these parameters is analyzed by the typical D_0 - b plots for the new defined regions. It is notice negative and positive fits associated with the large and small faults, respectively. Negative correlation implies an increase in the probability of large earthquakes. Regions with positive correlation imply a greater faults fragmentation.

Key words: Fractal dimension, Betic Cordillera, faults, b parameter, earthquakes.

INTRODUCCIÓN

El método del *box-counting* ha sido utilizado por diferentes autores para estudiar las fallas de una región (Hirata, 1989; Pérez López *et al.*, 2000; Öncel *et al.*, 2001). Con él se obtiene la dimensión fractal de capacidad D_0 , cuyo valor oscila entre 1 y 2. En el análisis, es necesario tener en cuenta unos límites entre los que es válido el ajuste. Algunos autores han encontrado transiciones en la dimensión fractal de las fallas (Wilson 1999; Lei y Kusunosc, 1999; Öncel *et al.*, 2001), es decir, aparecen diferentes dimensiones dependiendo del intervalo (rango de escala) con el que se trabaja.

La ley de Gutenberg-Richter da la relación entre el número de terremotos con magnitud mayor o igual a una dada

$$\log N = bm + \log a \quad (1)$$

Esta magnitud se relaciona con la energía liberada según

$$\log E = 1,44m + 5,24 \quad (2)$$

Los esfuerzos que se relajan durante un terremoto están directamente relacionados con el momento sísmico del terremoto M

$$M = \mu A \delta \quad (3)$$

y el momento está relacionado con la magnitud por la relación

$$\log M = cm + d \quad (4)$$

donde c y d son constantes. Kanamori y Anderson (1975) establecen por bases teóricas que $c = 1,5$. Estos mismos autores obtienen una aproximación que relaciona el momento de un terremoto con el área de ruptura de la falla A

$$M = \alpha A^{3/2} \quad (5)$$

donde α es una constante. Combinando las ecuaciones anteriores obtenemos

$$N = \beta A^{-3b/2c} \quad (6)$$

En una región el número de terremotos por unidad de tiempo con área de ruptura mayor que A sigue una ley de potencias que depende del área. Si comparamos con la definición de dimensión fractal, teniendo en cuenta que $A \sim r^2$, obtenemos $D = 3b/c$ y tomando $c = 1,5$ se llega a

$$D = 2b \quad (7)$$

siendo b el calculado para la magnitud M_s y D el grado de recubrimiento del plano por parte de las trazas en superficie de las fallas (longitud del área de ruptura de los terremotos). Se obtiene así que la dimensión fractal es dos veces el parámetro b para cualquier parte del mundo (Aki, 1981). La relación empírica de Gutenberg-Richter es equivalente a una distribución fractal (Aki, 1981). Esta expresión sólo puede aplicarse a terremotos intermedios, en los cuales $c = 1,5$. Para terremotos

pequeños $c = 1$ y para terremotos grandes las leyes no son similares (Legrand, 2002). Así, este autor, propone para terremotos pequeños $D = 3b$ y para terremotos grandes $D = b$.

A la vista de esta tres últimas ecuaciones, y teniendo en cuenta que D es el grado de recubrimiento de espacio, los pequeños terremotos (fallas pequeñas) se asocian a volúmenes, los terremotos grandes (fallas grandes) a líneas, es decir, a lo largo de las trazas de las fallas, y los terremotos intermedios se asocian a superficies, sobre el área de ruptura de las fallas (Legrand, 2002).

En la mayor isla de Japón, Öncel *et al.* (2001) realizan un estudio de correlación entre la D_0 de las fallas activas y el parámetro b , obteniendo ajustes, tanto positivos como negativos entre ambos. Ellos sugieren que una correlación negativa es en general esperada por un decrecimiento de b , que a su vez está asociado a un incremento en la probabilidad de que ocurran grandes terremotos, mientras que un incremento de la dimensión fractal de las fallas indica un incremento en la longitud de las mismas. Esto puede sugerir la posibilidad de que los esfuerzos se relajen con la ruptura de fallas de gran longitud. Los mismos autores sugieren que, si los terremotos históricos ocurridos en una zona son de magnitud pequeña, puede incrementarse la probabilidad de que ocurra un terremoto grande en esa área. Para las correlaciones positivas, los esfuerzos se relajen con fallas pequeñas o zonas de fallas más fragmentadas.

En este trabajo, para las fallas y los terremotos de la Cordillera Bética, calculamos la dimensión D_0 y el parámetro b , buscando posteriormente correlaciones entre estos valores.

DATOS

Utilizamos el catálogo del Instituto Geográfico Nacional actualizado hasta septiembre de 2002. Se consideran sólo los terremotos superficiales ($h \leq 30$ km) ocurridos en la Cordillera Bética. En el cálculo del parámetro b se utiliza un catálogo completo. Aplicando unas ciertas condiciones restrictivas para la eliminación de las replicas (consideramos que los terremotos con $m_b = 3,0$ están relacionados con otros que ocurren en un intervalo de 3 días y a menos de 3 km de distancia, y terremotos con $m_b = 6,0$ están relacionados con otros de menor magnitud ocurridos en un intervalo de 125 días a menos de 100 km), el catálogo es completo a partir de 1980 para $m_b \geq 3,0$ (Tabla 1). Las fallas digitalizadas utilizadas en este estudio son las de la base de datos del IGN (1992).

METODOLOGÍA

Con un rectángulo de 70 x 64 km (coincide con la superficie de la Cuenca de Granada) y con pasos de 20 km, se ha cubierto toda la Cordillera Bética. En cada rectángulo se ha calculado la dimensión D_0 para las fallas y el parámetro b para los terremotos que en él se localizan. El parámetro b lo obtenemos con el método de mínimos cuadrados ya que en nuestro estudio se toman clases de magnitud de tamaño igual al error de la magnitud del catálogo (0.5 unidades) (Fig. 1). En el cálculo de la

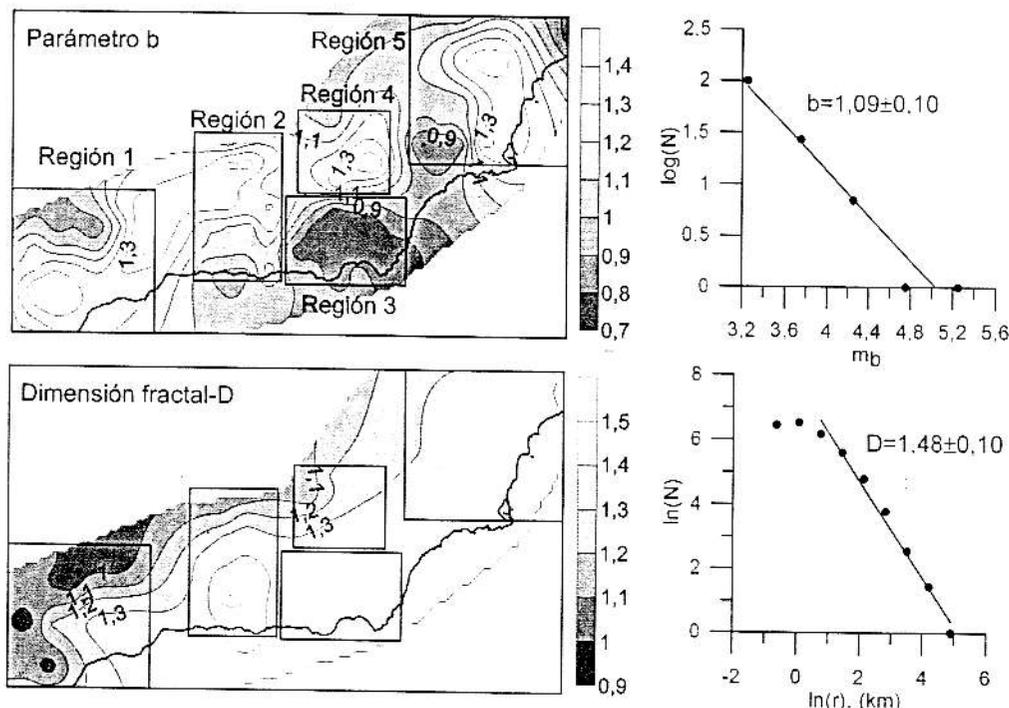


FIGURA 1. Resultados para D_0 y para el parámetro b . En los mapas se aprecian las regiones consideradas en los ajustes. A la derecha podemos ver un ejemplo de cálculo de la dimensión fractal y del parámetro b , según el método de box-counting y el de mínimos cuadrados para la cuadrícula de la cuenca de Granada.

dimensión fractal se ha utilizado el método de *box-counting*. En éste se cubre la región de estudio con una malla y se va cambiando el tamaño de las celdas que la componen. Para cada tamaño se cuenta el número de celdas que contienen datos. La dimensión de las cajas (r) y el número de cajas (N) que se necesitan para cubrir la región cumple una ley de potencias

$$N = Cr^{D_0} \quad (8)$$

Al representar los datos en un gráfico *log-log*, se puede obtener fácilmente el valor de la pendiente (dimensión D_0) (Fig. 1) ajustando a los puntos que definen una línea recta, limitada por el tamaño del fractal (límite superior) y por el tamaño de los elementos del fractal (límite inferior).

En total se han obtenido 285 puntos. Estos datos se han depurado, de manera que sólo nos hemos quedado con los que poseen un error inferior a 0,2 unidades en el parámetro b . Estos puntos presentan, para la dimensión fractal D_0 , errores inferiores a 0,13. La dimensión fractal, al estar trabajando en el plano, debe estar comprendida entre 1 y 2. El parámetro b oscila, en nuestro caso, entre 0,7 y 1,5. El total de puntos que queda finalmente es de 96.

RESULTADOS

En la figura 2 podemos ver los resultados de los diferentes ajustes. Para las regiones 1 y 4 se obtienen ajustes positivos. Estas son regiones con menor actividad sísmica que las regiones 2 y 3, en donde se encuentran los terremotos más energéticos de la Cordillera Bética. El ajuste para la región 5 es negativo, aunque su significación es pequeña ya que el coeficiente de correlación es el más bajo de todos los encontrados. De cualquier forma otros autores también trabajan con coeficientes de correlación bajos (Öncel *et al.*, 2001). En la región 5 encontramos terremotos más energéticos que en las regiones 1 y 4 (aunque la actividad sísmica es similar), pero no tanto como los de las regiones 2 y 3. Debido a esto, posiblemente su pendiente no sea tan pronunciada.

CONCLUSIONES

En función de los valores del parámetro b , de D_0 y de la correlación entre ambos, las regiones 2 y 3 la actividad

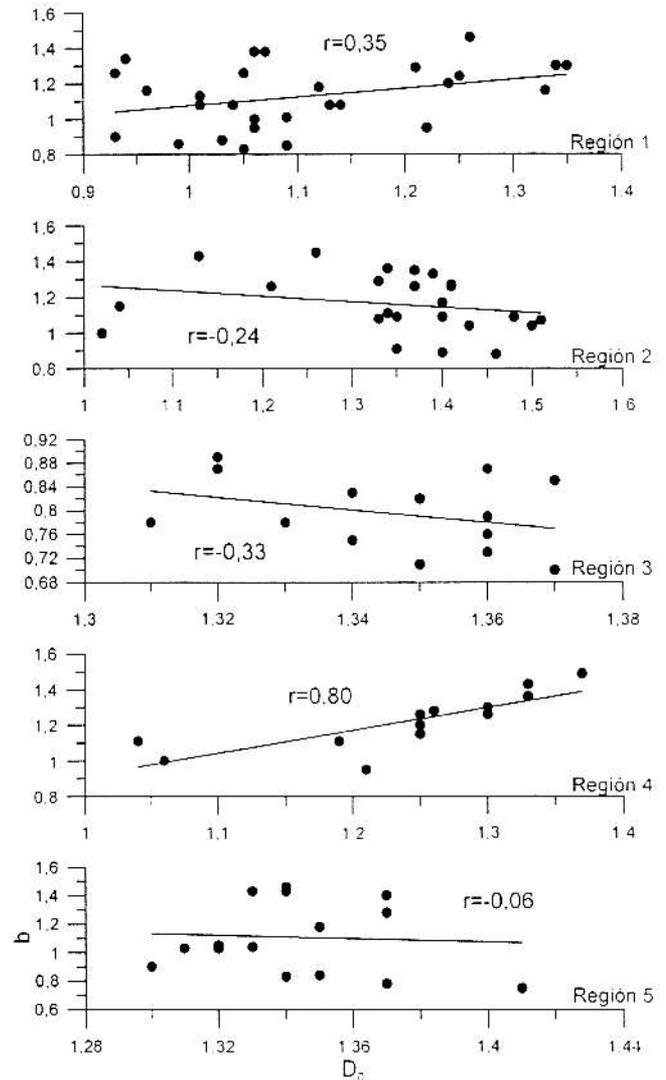


FIGURA 2. Gráficos D_0 - b y ajustes para las diferentes regiones consideradas en la Cordillera Bética.

sísmica es más energética, sobre todo en la última. En ellas los esfuerzos se relajan en fallas de gran longitud, sobre todo en la región 2. En las regiones 1 y 4 la sismicidad, que es menos energética, se relaja en fallas más pequeñas. Para la región 5 no observamos una pendiente netamente definida. Ésta presenta valores de D_0 mayores que los de la región 3. Además, históricamente ha sido sometida a terremotos grandes, por tanto, puede que el conjunto de eventos con el que trabajamos no sea totalmente completo en esta región.

TABLA I. Conjunto de datos utilizado.

mb	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5
1980; mb \geq 3,0	479	113	28	3	4

REFERENCIAS

- Aki, K. (1981): A probabilistic synthesis of precursory phenomena. En: *Earthquake Prediction: An International Review, Maurice Ewing Series 4* (D. W. Simpson y P.G. Richards, Eds.), American Geophysical Union, Washington, D.C., 566-574.
- Bak, P., Tang, C., y Wiesenfeld, K. (1988): Self-organized criticality. *Physical Review A*, 38: 364-374.
- Hirata, T. (1989): Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales. *Pure and Applied Geophysics*, 131: 158-170.
- IGN (1992): *Análisis sismotectónico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias*. Publicación Técnica, 26, Ed. IGN.
- Kanamori, H. y Anderson, L. (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65: 1073-1095.
- Legrand, D. (2002): Fractal dimensions of small, intermediate and large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92: 3318-3320.
- Lei, X. y Kusunosc, K. (1999): The fractal structures and characteristic scale of earthquakes, active faults, rivers and topographic relief of Japan. *Geophysical Journal International*, 139: 754-762
- Öncel, A.O., Wilson, T.H. y Nishizawa, O. (2001): Size scaling relationships in the active fault networks of Japan and their correlation with Gutenberg-Richter b values. *Journal of Geophysical Research*, 106: 21827-21841.
- Pérez López, R., Muñoz Martín, A., Paredes, C., De Vicente, G. y Elorza, F.J. (2000): Dimensión fractal de la distribución espacial de fracturas en el área granítica de El Berrocal (Sistema Central): Relación con el tensor de esfuerzos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (3-4): 487-503.
- Wilson, T.H. (1999): Non-fractal size-scaling attributes of fracture trace and active fault networks with examples from the central Appalachians and Japan. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 31: A112.