

Geometría fractal de los sistemas filonianos en la Península Hurd, Isla Livingston, Antártida Occidental

Fractal geometry of veins in Hurd Peninsula, Livingston Island, Western Antarctica

P. Gumiel (*), J. M. González-Casado ², J. L. Giner-Robles (**), J. López-Martínez (***) y J.J. Durán (**)

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid

(**) Dpto. de Q.A., Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid

ABSTRACT

One-dimensional analysis of vein systems has been carried out in eleven traverses along the coastal area on Hurd Peninsula, Livingston Island (Western Antarctica) to characterise vein geometry using fractal analysis techniques. Vein thicknesses generally conform to a power law distribution of the form $N_t \propto t^{-D}$, where N_t is the number of veins with a thickness $> t$. D-values are in the range of 0.56 to 0.90, less than 1.0, corresponding to well connected vein systems, which indicates systems of veins capable of supporting high fluid flux. The extension direction obtained from the opening directions of these veins (mean N84.5°E) together with the stress axes orientation deduced from geometrical analysis of vein orientations is consistent with an older strike-slip fracture regime, probably associated with an oblique convergent movement between the Drake and the Antarctic plates during the Upper Cretaceous. The vein system appears not to be related with the plutonic intrusions that outcrop in this area, and can be concluded that quartz veining in the whole area was probably related to the mentioned old fracturing event.

Key words: fractal geometry, hydrothermal veins, stress tensor, South Shetland Islands, Antarctica

Geogaceta, 27 (1999), 75-78

ISSN: 0213683X

Introducción

La Península Hurd, (Fig. 1a), pertenece a un arco magmático asociado con un borde de placa convergente que fue activo hasta hace pocos millones de años y que permitió la convergencia entre las placas Antártica y Drake (Fig. 1b), entre otras.

El arco de las Islas Shetland del Sur está formado por un complejo magmático que intruye en un basamento más antiguo. Este basamento está a su vez constituido principalmente, por turbiditas de probable edad Triásica (Formación Miers Bluff), y por depósitos submarinos de edad jurásica (Grupo Byers). El complejo magmático es muy variado y dentro del mismo se agrupan diferentes tipos de rocas volcánicas, subvolcánicas y plutónicas, que atraviesan e intruyen el basamento, de manera que en muchas islas éste no aflora. La actividad magmática se produjo entre los 130 y los 20 Ma (Willan y Kelley, 1999). Por último, y muy recientemente, entre los 8 Ma y la actualidad tuvo lugar otro

periodo de actividad magmática, en este caso relacionado con la apertura del Estrecho de Bransfield, una cuenca de retroarco situada inmediatamente al sur (Figs. 1a y 1b).

La Península Hurd, donde se realiza este trabajo, se caracteriza por los relativamente extensos afloramientos de la Fm. Miers Bluff, que están intruidos por numerosos haces de diques. Dentro de éstos se pueden diferenciar dos grandes grupos: los diques máficos, y las venas y filones rellenos de cuarzo; estos últimos cortan los pliegues que afectan a la Fm. Miers Bluff y son cortados, a su vez, por los diferentes tipos de diques máficos, que son claramente posteriores. El interés del conjunto de diques radica en que registran los diferentes episodios magmáticos acaecidos a lo largo de los casi 90 Ma de historia de este arco magmático. El análisis de las orientaciones de los diques en este tipo de contextos geotectónicos, permite, entre otras cosas, establecer el régimen existente durante su formación, y la existencia de procesos tectónicos distintos a los mera-

mente asociados con la subducción (ej.: Wharton *et al.*, 1995; Scarrow *et al.*, 1997).

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos de la aplicación de técnicas de análisis fractal al estudio de los sistemas de venas de cuarzo de la Península Hurd, lo que permite establecer, entre otras cosas, el grado de conectividad entre las venas y la capacidad de percolación de las mismas. Además, se ha calculado la extensión asociada con la formación de las venas en una serie de puntos (transversales), así como la orientación de los tensores de esfuerzo en cada una de estas estaciones. Dado que estas venas hidrotermales se formaron durante el Cretácico medio (Willan y Kelley, 1999) las orientaciones calculadas para los ejes de esfuerzos deben asociarse con la situación geotectónica existente durante este periodo.

Debido al intenso recubrimiento de hielo existente en esta región (Fig. 1c), los datos se pudieron tomar sólo en secciones cercanas a la costa. En total se realizaron 11

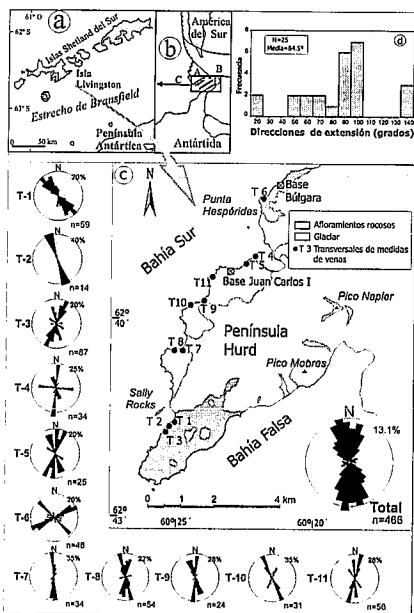


Figura 1.- a: Situación geográfica del área de estudio. b: Esquema tectónico regional. A = Placa Drake, B = Placa Sándwich, C = Placa Antártica, D = Cuenca de Bransfield. c: Diagramas de orientaciones de venas en las transversales estudiadas. d: Histograma de frecuencias de la componente horizontal de las direcciones de extensión de las venas.

Figure 1.- a: Location map of the studied area. b: Regional tectonic framework. A = Drake Plate, B = Sandwich Plate, C = Antarctic Plate, D = Bransfield Basin. c: Rose diagrams of vein orientations along the studied traverses. d: Frequency histograms of the horizontal component of extension directions related with the veins.

Cálculo de la extensión y tensores de esfuerzo

Más recientemente, Santanach *et al.* (1992) propusieron que las venas estaban relacionadas con fallas en dirección, formadas hace 40 Ma, durante una compresión NO-SE. Willan (1994), basándose en las paragénesis, texturas y control estructural, concluye que las venas son epitermales y de origen hidráulico, de edad cretácica. Más recientemente, Willan y Kelley (1999) proponen una edad de 108 Ma para estas venas y sugieren que su emplazamiento fue coetáneo con el desarrollo del arco volcánico calcoalcálico y la convergencia de las placas Drake y Antártica.

Generalmente, las venas de cuarzo, encajan en la Fm. Miers Bluff, y afloran principalmente en una zona de 2 km de ancho por 10 km de largo, subparalela a la costa occidental de la Península Hurd, disminuyendo su densidad o desapareciendo casi por completo en los afloramientos situados más hacia el interior de la península.

transversales (Fig. 1c), con un total de 186 m de sección y 466 venas registradas (Tab. I).

El método de análisis fractal utilizado permite establecer si un objeto muestra similares características a diferentes escalas, y por consiguiente si es invariante al cambio de escala. Una consecuencia importante de esa propiedad es que se puede obtener información a una determinada escala que sea de interés para otra. Generalmente, tales propiedades siguen distribuciones hiperbólicas, donde la propiedad (*P*) está relacionada con el tamaño (*t*) mediante la ecuación (1): $PC \propto t^{-D}$, donde el exponente *D*, es frecuentemente la dimensión fractal del sistema. La dimensión fractal (*D*), en sentido genérico, es un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico, o de un objeto u objetos naturales.

La dirección predominante de las venas es Norte-Sur (Fig. 1c), aunque a escala local las orientaciones pueden variar entre NNE-SSO a NNO-SSE, siendo de menor importancia las orientaciones NE-SO y NO-SE y E-O. Las venas son generalmente subverticales, presentando un buzamiento medio de 75°. Frecuentemente, muestran pequeños engrosamientos que corresponden a pequeñas estructuras de tipo *pull-apart*. El análisis cinemático de estas estructuras permite establecer que las que se asocian con venas de orientaciones NO-SE implican movimientos dextrorsos, mientras que las relacionadas con venas orientadas NE-SO corresponden a movimientos sinistrorsos. Estos sentidos de desplazamiento confirman que el sistema conjugado de venas NO-SE y NE-SO se ha movido según una dirección de compresión NNE-SSO y extensión aproximada ESE-ONO.

La dirección de extensión asociada con la formación de las venas también se puede establecer a partir de la medida de las orientaciones cristalográficas de los minerales que rellenan las venas. La dirección de extensión establecida se dispone casi siempre subhorizontal y con dos direcciones predominantes situadas alrededor de N045°E y N105°E, con una media en torno a N84,5°E (Fig. 1d).

La cantidad de extensión se ha calculado a partir de la potencia (*t*) y del espaciado (*s*) de las venas intersectadas en cada transversal, mediante la siguiente ecuación (2):

El valor de la extensión varía entre el 0,013 % y 0,554 %. Parece que hay una mayor extensión en la parte central y hacia el Sur (Sally Rocks) que hacia el norte (Punta Hespérides -Tabla 1-).

Se ha calculado la orientación de un tensor de esfuerzo para cada transversal (Fig. 2a) a partir de las orientaciones de éstas, y considerando que las venas son fracturas modo I y II (según Pollard y Segal, 1987) o una combinación de ambas. Para el cálculo se ha utilizado el programa Joints (Rincón y Jurado, 1998), así como un programa para el cálculo de diagramas E/K' (De Vicente, 1988). Los resultados muestran que los tensores asociados con el emplazamiento de las venas corresponden a orientaciones de ejes de esfuerzos de tipo desgarre (σ_1 y σ_3 subhorizontales). La orientación media del tensor de esfuerzos calculado ($\sigma_1=00^\circ/358^\circ$, $\sigma_2=90^\circ/088^\circ$ y $\sigma_3=00^\circ/088^\circ$ - Fig. 2 b-), explica la mayor parte de las venas medidas (411) y es congruente con la dirección de extensión media obtenida por los dos métodos descritos en los párrafos anteriores.

Las orientaciones de los ejes de esfuerzo obtenidas, coinciden con las orien-

Transv.	Número de venas	Longitud de transv. L, (m)	Orientación de la transv.	Rango de potencias (mm)	Potencia Total t, (mm)	Densidad (Nº de venas/L)	Potencia Media (mm)	Potencia /Long. (t)/L	% de venas	Cantidad de extensión (%)
T-1	59	22.00	N80°E	1-32mm	388.50	2.682	6.58	17.66	1.77	0.018
T-2	14	1.00	N90°E	4-45mm	225.00	14.000	16.07	225.00	22.50	0.290
T-3	87	29.00	N82°E	1-80mm	579.00	3.000	6.66	19.97	2.00	0.020
T-4	34	15.00	N85°E	1-110mm	788.00	2.267	23.18	52.53	5.25	0.055
T-5	25	13.00	N80°E	1-37mm	248.00	1.923	9.92	19.08	1.91	0.019
T-6	48	18.00	N170°E	1-40mm	234.50	2.667	4.89	13.03	1.30	0.013
T-7	34	10.00	N80°E	5-900mm	3564.00	3.400	104.82	356.40	35.64	0.554
T-8	54	17.00	N85°E	1-100mm	314.00	3.176	5.81	18.47	1.85	0.019
T-9	24	15.00	N95°E	1-50mm	276.50	1.600	11.52	18.43	1.84	0.019
T-10	31	13.00	N60°E	4-240mm	1212.00	2.385	39.10	93.23	9.32	0.103
T-11	56	33.00	N105°E	1-430mm	2834.00	1.697	50.61	85.88	8.59	0.094

Tabla 1.- Datos básicos de los grupos de venas estudiados (potencias de las venas y cantidad de extensión por transversales). La situación de las transversales está indicada en la Fig. 1c.

Table 1.- Basic data of vein thicknesses, and amount of extension for individual traverses. The location of the traverses are indicated on Fig. 1c.

taciones calculadas para algunos de los episodios de fracturación más antiguos definidos para la zona (e.g. Sàbat *et al.*, 1992; Santanach *et al.*, 1992, 1996; González-Casado *et al.*, 1997). Dada la edad propuesta para estas venas (108 Ma) estos tensores son claramente anteriores al episodio extensional más moderno, que tiene una dirección de extensión horizontal NO-SE y que se relacionan con la apertura del Estrecho de Bransfield. Este episodio antiguo de fracturación, en régimen de desgarre, debería estar relacionado con el movimiento convergente entre las placas Drake y Antártica, que tiene lugar durante este periodo (e.g. González-Casado *et al.*, 1999). No obstante, como la dirección de acortamiento obtenida no es exactamente normal al límite entre placas, podría deducirse una convergencia altamente oblicua entre ambas placas (Willan y Kelley, 1999). Si tomamos en consideración las direcciones de fracturación dominantes en este archipiélago y que probablemente ya existían durante este periodo (fallas NE-SO y NO-SE, Santanach *et al.*, 1992; González-Casado *et al.*, 1997 y 1999), direcciones que se encuentran también en la Placa Drake, ya que la dirección NE-SO es paralela a los límites de la dorsal y de la zona de subducción, y la dirección NO-SE es paralela a las fallas transformantes, las fallas de la familia NE-SO actuarían como desgarres sinistrorsos y las de la familia NO-SE como dextrorsos.

Distribución de potencias de venas

Se han medido sistemáticamente las potencias de todas las venas intersectadas en cada transversal, que tenían una potencia mínima mayor o igual a 1 mm, así como su orientación y la longitud del espaciado entre las venas. Además, se ha tenido en cuenta cualquier otra característica geológica (e.g. litología, cinemática, etc.) que pudiera ser útil en el estudio geométrico. La potencia es una dimensión lineal que se puede medir fácil y directamente, y refleja el gradiente de apertura de las fracturas (cantidad de extensión), que han sido utilizadas por los fluidos para dar lugar a las venas.

Los gráficos de frecuencia acumulada de las potencias de venas siguen distribuciones hiperbólicas del tipo (3): $N_i \propto C t^{-D}$, donde N_i es el número de venas con espesor $\geq t$, C representa la frecuencia de venas $\geq a$ la potencia unidad, y el exponente D es la dimensión fractal de la distribución y se obtiene de la ecuación anterior utilizando logaritmos. La mayoría de los datos de potencias de venas estudiadas en la Península Hurd siguen distribuciones

de tipo hiperbólico (fractal) según la ecuación (3), en un rango que comprende tres órdenes de magnitud (Fig. 3a). La dimensión de distribución de potencias (D) varía entre 0,56 en la transversal T-7 hasta 0,90 en la T-8, que son propias de sistemas de fracturas bien conectadas, capaces de soportar un alto flujo de fluidos. Los datos obtenidos son del mismo orden de magnitud que los de otros sistemas filonianos bien conectados, situados en otros contextos geotectónicos (e.g. Gumiel *et al.*, 1992, 1995, 1996; Gumiel y Sanderson, 1994; Sanderson *et al.*, 1994; Roberts *et al.*, 1999).

Discusión y conclusiones

Las venas de cuarzo hidrotermal que afloran fundamentalmente en la costa occidental de la Península Hurd tienen una orientación predominantemente N-S, apreciándose dos sistemas conjugados: NO-SE y NE-SO (Fig. 1). Algunos criterios cinemáticos son congruentes con el movimiento simultáneo de estos dos sis-

temas de venas, bajo una compresión N-S y una extensión E-O. Las orientaciones de los ejes de esfuerzo relacionados con el emplazamiento de estos diques, calculadas mediante dos métodos distintos al anterior, arrojan resultados similares; ($\sigma_1=00^\circ/358^\circ$, $\sigma_2=90^\circ/088^\circ$ y $\sigma_3=00^\circ/088^\circ$, Fig. 2b), la cual implica un régimen de tipo direccional. En función de las edades propuestas por Willan y Kelley (1999) para estas venas, la citada situación tuvo que tener lugar durante el Cretácico superior, cuando se producía un movimiento convergente entre las placas Drake y Antártica, y como el límite entre estas placas tenía una orientación aproximada NE-SO, la convergencia debió ser muy oblicua. Bajo esta orientación de los ejes de esfuerzos, las fallas existentes en ese momento, probablemente orientadas según dos familias (NE-SO y NO-SE, Santanach *et al.*, 1992; González-Casado *et al.*, 1997 y 1999) debieron actuar también como fallas direccionales.

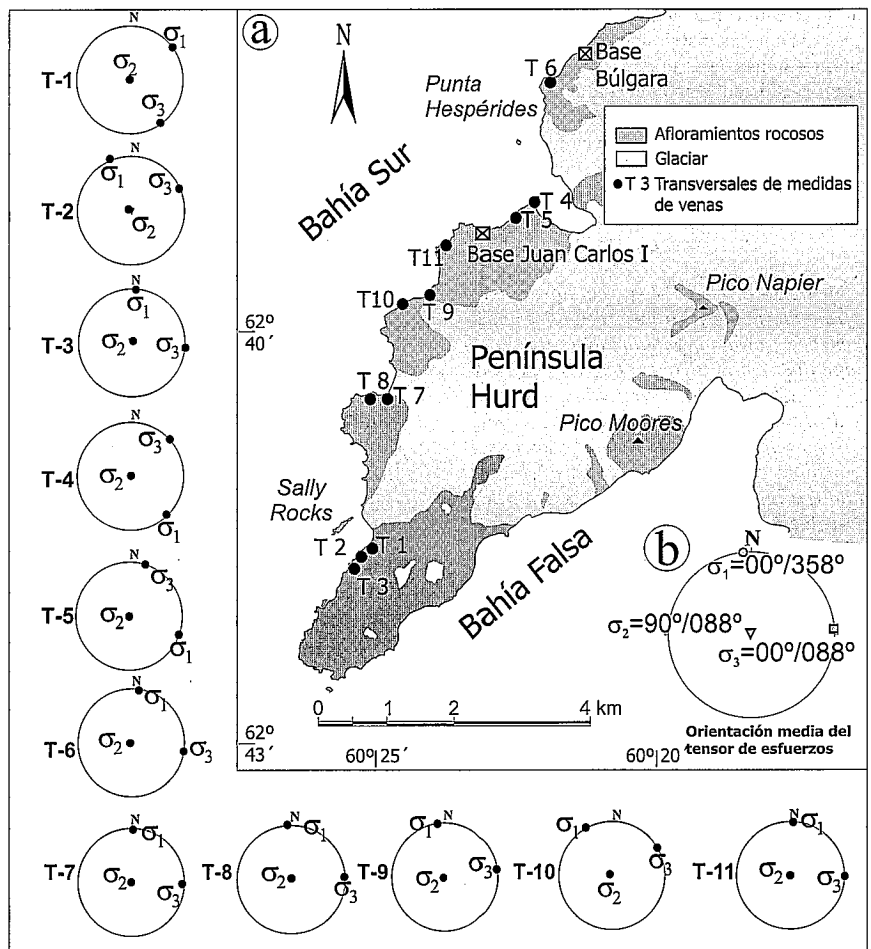


Figura 2.- a: Tensores de esfuerzos estimados, a partir de las venas medidas en las transversales estudiadas. b: Orientación media del tensor de esfuerzos principal, que explica la mayor parte de las venas medidas (411).

Figure 2.- a: Estimated stresses tensors from veins in the studied traverses. b: Mean orientation of the principal stresses tensor which explains most of the measured veins (411).

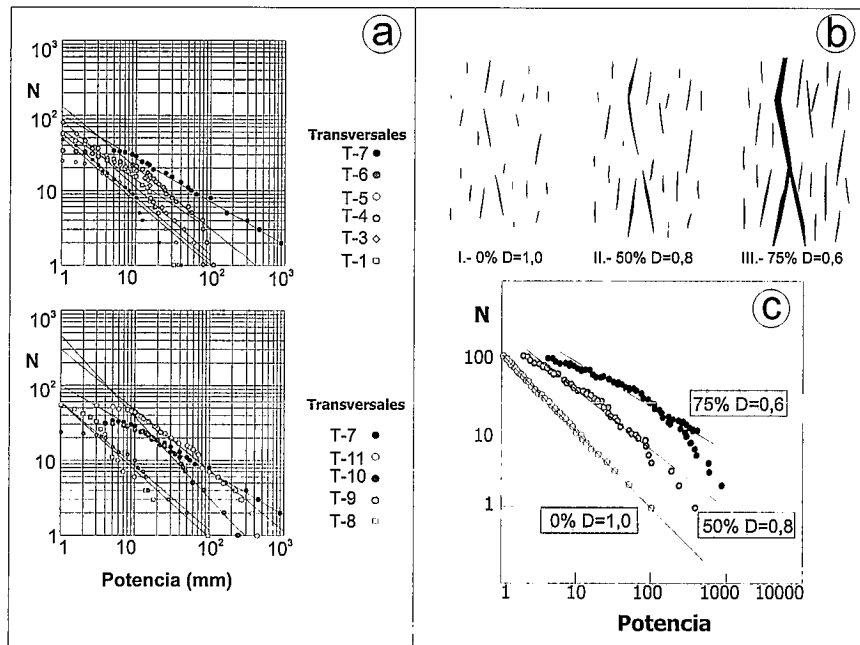


Figura 3.- a: Diagramas log (N)-log (potencia de venas) de las transversales estudiadas. b: Modelo conceptual de evolución de un sistema de venas y su grado de conectividad. c: Diagramas log(N)-log(potencia de venas) con las distribuciones correspondientes a las tres etapas de la Figura 3b. I: fracturas aisladas no conectadas, II: el 50% de las fracturas están conectadas, y III: el 75% de las fracturas están conectadas. Obsérvese como el valor de D decrece, a medida que aumenta el grado de conectividad, desde $D = 1,0$, hasta $D = 0,6$ (según Roberts et al., 1998).

Figure 3.- a: Log(N)-log(vein thickness) from the studied transverses. b: Conceptual model of grow and evolution of a vein system and their connectivity. c: Log(N)-log(vein thickness) with the vein thickness distributions corresponding to the three stages of figure 3b. I: isolated fractures unconnected, II: linking of 50% of cracks, and III: linking of 75% of cracks. Note that D-value decreases as connectivity increases from $D=1,0$ to $D=0,6$ (after Roberts et al., 1998).

El significado físico de la dimensión fractal de la distribución de potencias de venas, ha sido puesto de manifiesto. Estos autores proponen un modelo evolutivo de formación de un sistema de venas como un proceso de percolación. En una etapa inicial (Fig. 3b I), un conjunto de pequeñas fracturas aisladas distribuidas de forma aleatoria (distribución hiperbólica de longitudes y potencias, $D=1,0$), crecen y se van conectando de forma local. Cada par se conecta sumando longitudes y potencias. El proceso se

repite hasta que un determinado porcentaje de fracturas están conectadas (Fig. 3b II y III). Las distribuciones resultantes de conectar el 50% y el 75% de las fracturas pueden verse en la Figura 3c, mostrando menores valores de D y desviaciones de la distribución ideal, a medida que aumenta el grado de conectividad de las fracturas. La red de venas conectadas llegará a formar un "grupo de percolación", a una determinada densidad de fractura que puede caracterizarse por su dimensión fractal. A través de este grupo de fracturas interconectadas se favorece el flujo de fluidos y se localiza la deformación.

Los patrones de distribución de potencias de las venas y los valores de sus dimensiones fractales, ponen de manifiesto que en la mayoría de los casos se trata de sistemas de venas bien conectados. Las venas de la transversal T-7 (Figs. 1c y 3a) probablemente representan el grupo con mayor grado de conectividad y percolación.

Los mayores valores de extensión (Tabla I), así como el grado de conectividad entre las venas, no muestran un patrón de aumento gradual hacia el Norte o el Sur de la Península Hurd, o hacia Bahía Falsa, donde existen intrusiones plutónicas, lo que quizá se puede interpretar como que ambos procesos no están relacionados, siendo otro dato más que apoya la hipótesis de Willan y Kelley (1999) sobre su carácter previo a las intrusiones plutónicas que afloran hoy en la región.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ANT98-0225 de la CICYT.

Referencias

González-Casado, J.M., López-Martínez, J., Durán, J.J. y Bergamín, J.F. (1997): Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat., 93: 181-188.
 González-Casado, J.M., López-Martínez, J. y Durán, J.J. (1999): Antarctic Science, 11(3): 323-331.
 Gumiel, P., Sanderson, D.J., Roberts, S. y Campos, R. (1992): Geogaceta, 12: 3-7.
 Gumiel, P. y Sanderson, D.J. (1994): Bol. Geol. Min., 105-3: 263-271.
 Gumiel, P., Campos, R., Sanderson, D.J. y Roberts, S. (1995): Bol. Geol. Min., 106-4: 16-37.
 Gumiel, P., Campos, R., Hernández, J.R. y Paredes, C. (1996): Geogaceta, 20 (6): 1397-1404.
 Pollard, D.D. y Segall, P. (1987): In Atkinson B.K. (Ed.) Fracture Mechanics of rock. Academic Press: 277-349.
 Pride, D., Moody, S. y Rosen, M. (1981): Antarctic Jour. of the U. S., 16: 13-14.
 Rincón, P. y Jurado, J.L. (1998): Programa Joints (vs I.10). Inédito.
 Roberts, S., Sanderson, D.J. y Gumiel, P. (1998): Econ. Geol., 93- 3: 360-365.
 Roberts, S., Sanderson, D.J. y Gumiel, P. (1999): In Fractures, Fluid Flow and Mineralization. Geol. Soc. London, Spec. Pub., 155: 7-16.
 Sàbat, F., Serrat, D. y Villaplana, J.M. (1992): Rev. de la Soc. Geol. de España, 5: 159-166.
 Sanderson, D.J., Roberts, S. y Gumiel, P. (1994): Econ. Geol., 89: 168-173.
 Santanach, P., Pallàs, R., Sàbat, F. y Muñoz, J.A..(1992): Simposios T-III. Salamanca. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología: 141-151.
 Santanach, P., Pallàs, R., Sàbat, F. y Muñoz, J.A.. (1996): Jour. Geol. Soc. (London), 153: 1011-1020.
 Scarrow, J.H., Vaughan, A.P.M. y Leat, P.T. (1997): Terra Nova, 9: 255-259.
 Smellie, S.L., Pankhurst, R.S., Thomson, M.R.A. y Davies, R.E.S. (1984): British Antarctic Survey Scientific Reports, 85 : 85 pp.
 Tanner, P.W.G., Pankhurst, R.J. y Hyden, G. (1982): Jour. Geol. Soc.(London), 139: 683-690.
 Willan, R.C.R. (1994): Geolog. Magaz., 131: 465-483.
 Willan, R.C.R. y Kelley, P. (1999). Jour. Geophy. Research. in press.
 Wharton, M.R., Hathway, B. y Colley, H. (1995): In Volcanism Associated with Extension at Consuming Plate Margins. Geol. Soc. Lond. Spec. Pub. SPC81: 95-114.