

Distribución espacial y zonificación tectónica de los morfolineamientos en la Isla Decepción (Shetland del Sur, Antártida).

Spatial distribution of morpholineaments and tectonic zoning in the Deception Island (South Shetland, Antarctica).

C. Paredes⁽¹⁾, R. Pérez-López⁽²⁾, J.L. Giner-Robles⁽¹⁾, R. de la Vega⁽³⁾, A. García-García⁽⁴⁾ y P. Gumiel⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos. E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Ríos Rosas 21, 28003 Madrid. cparedes@dmami.upm.es

⁽²⁾ Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales. Facultad de Farmacia. Universidad San Pablo CEU. Ctra. Boadilla del Monte km 5,300, 28668 Madrid. rperez.fcex@ceu.es

⁽³⁾ Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Ríos Rosas 21, 28003 Madrid. rogelio.delavega@upm.es

⁽⁴⁾ Departamento de Volcanología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. aliciag@mncn.csic.es

⁽⁵⁾ Dirección de Recursos Minerales, Riesgos Geológicos y Geoambiente. Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. p.gumiel@igme.es.

ABSTRACT

Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica) is one of the most active volcanoes in Antarctica, having recently erupted in 1967, 1969 and 1970. It is also seismically very active, as 1992 seismic crisis was noted. The island has attracted the attention of many geoscientists to study seismo-volcanic events and how they are related with the regional and local tectonic regimes. If so, fractures and faults are involved in most of the geologic and geomorphologic dynamical processes over the island. There is no any unified quality fracture map to study such a surface and subsurface media. Therefore, this work presents a fault traces map interpreted from satellite and aerial photographs, digital elevation model, and bibliographic data. The distribution of trace lengths and orientation takes in account the whole field geological and geophysical observations. The final map has been used to define a tectonic zoning in the Deception Island based on trace scaling properties. Fractal characteristic, as a probabilistic fractal dimension D , has been computed by means of a Levy-Lee flight model. Three different behaviours ($D < 1.5$, $D \approx 1.5$ and $D > 1.5$), which mean six different areas over the island, have been detected and associated with the fracture pattern and volcanic processes.

Key words: fault map, fractal, tectonic zoning, volcano, Deception Island, Antarctica.

Geogaceta, 39 (2006), 75-78
ISSN: 0213683X

Introducción

El complejo volcánico de Decepción (Smellie *et al.*, 2002) en la Isla Decepción (Shetland del Sur, Antártida) constituye una de las islas más jóvenes del Estrecho de Bransfield (Fig. 1). Esta isla emerge a partir de un edificio volcánico poligenético, emplazado durante la etapa de convergencia entre la Placa Antártica y la antigua Placa Phoenix (Gonzalez-Casado *et al.*, 2000). Los estudios microtectónicos, llevados a cabo en el entorno de la isla, indican una dirección NE-SW para la compresión máxima horizontal s_{Hmax} (González-Casado *et al.*, 2000).

Las labores de investigación geológica y geofísica para la caracterización tectono-volcánica de la Isla Decepción, han sido llevadas hasta la fecha sobre la superficie de la isla y sus áreas marinas limítrofes (una síntesis de las mismas hasta 2002 puede encontrarse en López-Martínez *et al.*, 2002, Smellie *et al.*, 2002). Estos trabajos han proporcionado al unísono que las direcciones de fallas más ac-

tivas en la ocurrencia de erupciones volcánicas son principalmente NE-SO (1967 y 1970) y SSE-NNO (en 1969 y 1970). Por el contrario, no se ha unificado la geometría que siguen las trazas de las fallas activas. Como igualmente ocurre con otras fracturas que, sin ser activas pero por intersecar con las que si son, pueden resultar significativas para la evaluación de la ocurrencia sísmo-volcánica.

En este trabajo se analizan los resultados que, en una serie de publicaciones, ponen de manifiesto las direcciones encontradas en la fracturación, y presentan algún mapa de trazas de fracturas y/o fallas. Al encontrar diferencias geométricas entre ellos se ha hecho preciso preparar un mapa de morfolineamientos unificado sobre la Isla Decepción. La realización de este mapa síntesis de las trazas de fallas ha seguido una serie de criterios que han permitido obtener un resultado final no excesivamente complicado, representativo a la escala de la isla y de utilidad manifiesta para estudios geológicos y geofísicos ulteriores. Los estudios

microtectónicos de detalle (p. e. en Gonzalez-Casado *et al.*, 1999) muestran que, según su localización, hay diferencias entre las estructuras reconocidas en campo. Así pues, a continuación se analiza si dichas diferencias pueden ser reconocidas sobre el mapa síntesis de trazas obtenido.



Fig. 1.- Localización de la Isla Decepción en el Archipiélago de las Shetland del Sur.

Fig. 1.- Geographical sketch of the Deception Island location in the South Shetland Islands.

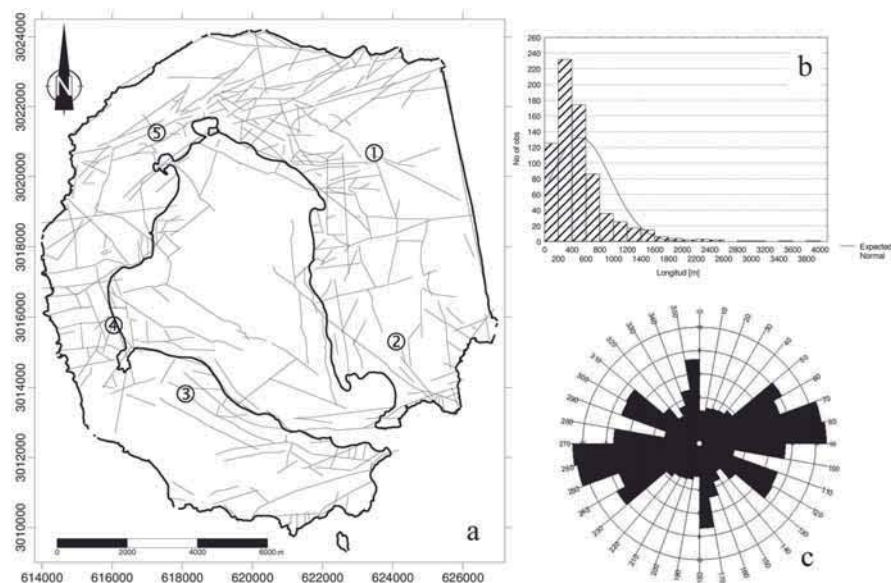


Fig. 2.- (a) Mapa de morfolineamientos sobre Isla Decepción, resultado final. Los puntos 1, 2, 3, 4, y 5, son utilizados en el texto. (b) Histograma de la distribución frecuencial (absoluta) de tamaños de trazas en metros (cada 200 m). (c) Rosa de direcciones ponderada con el tamaño de las trazas.

Fig. 2.- (a) Final synthesis of the trace map of the Deception Island. Points 1, 2, 3, 4, and 5, are used in the text. (b) Absolute frequency distribution of the trace lengths for 200 m used class size. (c) Rose diagram weighted with the length of traces.

Criterios de diseño del mapa de morfolineamientos

La labor para definir el mapa de morfolineamientos sigue un proceso secuencial mediante el cual se va incorporando constructivamente la información procedente de cada fuente analizada. El origen de estas fuentes se agrupa atendiendo a una serie de criterios.

El primer criterio aplicado, el bibliográfico, comprende la recopilación de las cartografías geológicas existentes sobre la isla en las que se representen las trazas de posibles fracturas u otras discontinuidades morfoestructónicas. En el conjunto de referencias revisadas (Tabla I) la información tratada para la confección de los respectivos mapas procede de dos fuentes: las observaciones geológicas, y las interpretaciones y testificaciones geofísicas.

El segundo criterio, se basa en el análisis morfométrico del modelo digital de elevaciones (MDE) de la isla, con un tamaño de píxel de 15 m. Para ello se determinan aquellas formaciones lineales que representan escalones topográficos relevantes, alineaciones morfológicas, y con posibles evidencias de movimiento y/o deformación estructural relativa. La detección de estas estructuras de ha hecho mediante una serie de sombreados analíticos del relieve y analizando las derivadas primeras (identificando continuidad de pendientes) y segundas (perfilando mínimos alineados) del MDE. Así ha sido posible trazar un conjunto de 628 lineamientos cuyas carac-

terísticas geométricas están recogidas en la tabla I. Las trazas dibujadas presentan relaciones de corte entre unas y otras. Así, aquellas con dirección N-S son las más antiguas, las E-O las más modernas, y las NO-SE surgirían en una fase intermedia.

El tercer criterio, el fotográfico, ha supuesto estudiar sobre los vuelos fotogramétricos (ingleses de 1956 y de 1979, argentino de

1968, y chileno de 1986) y sobre una imagen del satélite QuickBird (Digital Globe, 2003), que hay de la Isla Decepción, las estructuras que, sobre el análisis morfométrico del MDT, resultaban poco evidentes. En particular, en aquellas zonas en las que el relieve ha cambiado tras las erupciones. La calidad de la imagen satélite ha permitido detallar 407 lineamientos de hasta 11 m y con las mismas modas, excepto la N30E, que los obtenidos con el MDT (Tabla I), y con evidencias de movimiento en estas zonas de interés.

En el último criterio aplicado es aquél que considera los lineamientos morfológicos producidos por la actividad volcánica reciente. De esta forma, a partir de la información litológica y geocronológica descrita en el mapa geológico (Smellie, 2002) y de la geomorfología volcánica (López-Martínez y Serrano, 2002), es posible describir con 12 lineaciones tres grandes direcciones principales: la SE-NO, la NE-SO, y la N-S que aunque es la menos significativa en cuanto a su longitud (erupciones de 1967 de Caleta Péndulo a Bahía Balleneros), la morfología de la isla tiene una marcada representación activa en su margen más oriental: la Costa Recta (Paredes et al., 2005, Pérez-López et al., 2005; Fernández-Ibáñez et al., 2005).

A partir de la información recogida y geográficamente trazada, tras la aplicación de los cuatro criterios anteriores, se han diseñado dos mapas de trazas de morfoestructuras tectónicas. El primero esta formado por las discontinuidades de gran longitud, que discurren atravesando la isla de extremo a extremo y que poseen evidencias geológicas y geofísicas de su existen-

Referencia de origen	Fuente de datos	Nº trazas	Modas direccionales (°)		Longitud media (m)
			Principal	Secundarias	
Mazzuoli et al. (1987)	CGC	25	N30E (N10,N70)	N160E (N150, N190)	2089 (798,4189)
Marti et al. (1989)	CGC y CPS	20	N50E (N40,N70)	N110E (N90,N120), N180E (N170,N210)	3971 (1815,10688)
Viramonte et al. (1989)	CPM	2	N80E (N80,N90)		3110 (2324,3896)
Rey et al. (1989)	CGC y CPS	34	N50E (N20,N80)	N110E (N100,N130), N180E (N150,N190)	3858 (560,13889)
Vila et al. (1992)	CGC, CPS y TAM	21	N70E (N30,N80)	N110E (N100,N130), N190E (N170,N200)	4938 (855,13060)
Rey et al. (1995)	CPS y CPGQ	8	N50E (N40,N70)	N170E (N170,N180)	9504 (8045,13683)
Birkenmajer (1995)	CGC	31	N80E (N70,N100)	N190E (N140,N210), N110E (N110,N120)	448 (187,1106)
Baraldo et al. (2000)	CGC y CPGQ	56	N50E (N20,N70)	N110E (N90,N140), N170E (N150,N190)	1262 (295,4788)
BAS (2003)	CS	31	N60E (N50,N80)	N170E (N160,N190)	451 (40,3129)
Somoza et al. (2004)	CPGQ y CPS	22	N50E (N30,N70)	N170E (N160,N180)	3800 (1190,10750)
Muñoz et al. (2008)	CPM y CPG	8	N50E (N50,N60)	N140E (N130,N190)	3187 (2172,4573)
Volcanismo	CGC	12	N110E (N110,N120)	N50E (N30,N60), N160E (N150,N170)	2040 (410,5262)
Modelo digital terreno	TAM	628	N80E (N50,N100)	N120E (N110,N140), N170E (N150,N180), N30E (N10,N40)	468 (46,3149)
Satélite QuickBird	TAM	407	N80E (N20,N100)	N120E (N100,N140), N170E (N150,N180)	154 (11,9424)
Síntesis grandes estructuras	CS	23	N50E (N40,N70)	N160E (N150,N180), N120E (N110,N140)	6234 (1057,13683)
Síntesis morfolineamientos	CS	706	N80E (N50,N100)	N120E (N110,N140), N170E (N150,N180), N20E (N10,N40)	517 (32,3896)

Tabla I.- Sumario bibliográfico de los mapas de y características más significativas de las trazas. Los valores entre paréntesis indican el rango abarcado para cada moda (según direcciones o longitudes). CGC: caracterización geológica, geomorfológica y campañas de campo; CPS: Campañas de prospección sísmica; CPM: Campañas de prospección magnetométrica; CPG: Campañas de prospección gravimétrica; TAM: Técnicas de análisis morfométrico en teledetección; CPGQ: Campañas de prospección geoquímica; CS: trabajos de compendio y síntesis.

Table I.- Bibliographic summary of trace maps published and their main characteristics. The range is the values in parenthesis (according to azimuths or lengths). CGC: geologic, geomorphologic characterization and field works; CPS: seismic prospecting activities; CPM: magnetometric prospecting activities; CPG: gravimetric prospecting activities; TAM: morphometric analysis techniques used in teledetection; CPGQ: geochemical prospecting activities; CS: synthesis and summary works.

cia. También se han incluido en este grupo aquellos lineamientos sobre los que, siendo de longitud menor que los primeros, se han constatado evidentes procesos eruptivos. Estas grandes discontinuidades constituyen planos de debilidad cortical o fallas orientadas N50E (Tabla I), con un marcado carácter extensivo.

El segundo mapa (Fig. 2a) ha sido delimitado con mayor detalle. El rango de longitudes abarcado (Tabla I) es menor que el de grandes estructuras (histograma de tamaños en Fig. 2b). Se ha diseñado con un nivel de referencia y trazado a una escala, según la base 1:25000, acorde con el tamaño de la isla. Sobre el área en la que se encuentran las trazas, direccionalmente y geoméricamente éstas presentan estructuras claramente diferentes. La distribución de direcciones (Fig. 2c) integra las parcialmente reflejadas en cada referencia bibliográfica y sus modas direccionales (Tabla 1), así como las encontradas en los estudios micro tectónicos que se han publicado hasta la fecha sobre la Isla Decepción (p.e. González-Casado *et al.*, 1999; Gonzalez-Casado *et al.*, 2000; Fernández-Ibáñez *et al.*, 2005; entre otros).

Definición de la zonación tectónica

Las observaciones realizadas durante las campañas de campo de 2004, 2005 en la Isla Decepción (Paredes *et al.*, 2005), las publicadas como resultados de otras expediciones científicas (Tabla I) y el mapa presentado (Fig. 2a), corroboran que el patrón de fracturación de Isla Decepción muestra una zonación en la deformación. Las diferencias morfológicas entre áreas se descubren en las modas direccionales y en la densidad e intensidad de la red de trazas de falla. Por ello se propone establecer una zonificación o definición de áreas sobre las cuales este patrón se mantenga homogéneo respecto a un conjunto de parámetros representativos de su distribución geométrica.

La liberación de los esfuerzos acumulados sobre los planos de falla se produce según las propiedades mecánicas de los materiales, de su orientación relativa respecto al tensor de esfuerzos y la existencia de fracturas próximas con una disposición particular que redistribuye esta energía (Keilis-Borok *et al.*, 2003). Estos esfuerzos pueden incorporar una componente debida a la ascensión de material procedente de una cámara magmática. Si es así, allí donde se favorezca liberación de energía por la disposición espacial de los planos de debilidad, por las características litológicas, y la presencia de fluidos, puede también venir acompañada de una actividad volcánica.

La caracterización cuantificada de la geometría de procesos estocásticos de fibras (Stoyan *et al.*, 1994), es decir segmentos

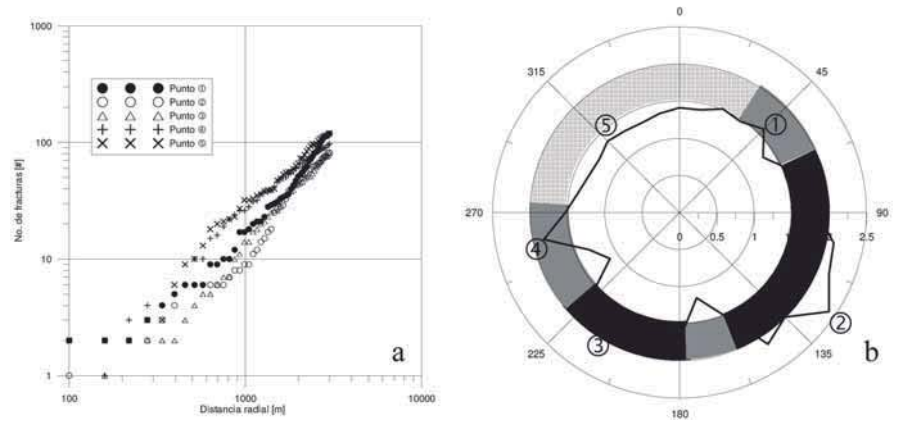


Fig. 3.- (a) Gráfico bilogarítmico de los resultados del cálculo de $N(r)$ en cada uno de los puntos (1, 2, 3, 4, y 5) indicados en la Fig. 2a. (b) Diagrama polar de la distribución angular discreta del exponente D ajustado. Sobre este gráfico, división sectorial en los diferentes comportamientos descritos para D .

Fig. 3.- (a) Bilogarithmic plot of the computed results of $N(r)$ in the marked points 1, 2, 3, 4, and 5 from Fig. 2a. (b) Polar plot of the discrete azimuthal distribution of the fitted D exponent. In the same plot, sector partition of different behaviors detected in D .

geométricos que se distribuyen en el espacio no al azar sino con una aleatoriedad estructurada (mapa de la Fig. 2a), se ha realizado mediante un análisis fractal de Levy-Lee (Mandelbrot, 1985). La hipótesis que permite la aplicación de este análisis es que las fracturas se ubican en posiciones tales que las distancias L entre unas de otras siguen una ley de potencia o hiperbólica de Pareto: $\Pr[L > x] \propto x^{-D}$. El comportamiento del proceso espacial se rige por el valor del exponente D , dimensión fractal de distribución, que caracteriza la distribución de probabilidad. Para $D=0$, la distribución de distancias entre trazas es uniforme, no hay heterogeneidad ni agrupaciones de trazas. A medida que aumenta el valor de D , la probabilidad de que L tenga valores elevados disminuye potencialmente, con lo que las trazas tienden a concentrarse formando agrupaciones.

Para la estimación del exponente D mediante esta técnica se calcula cómo varía el número de fracturas $N(r)$ dentro de un círculo en función de su radio r , localizado éste en un punto centro constante. Si este cambio sigue la relación en potencia: $N(r) \propto r^D$, entonces es posible afirmar que su comportamiento es invariante al cambio de escala con exponente D .

La definición geográfica de la zonificación precisa de la ubicación de los límites entre las áreas que la forman. Por ello, se ha estudiado cómo cambia el valor D , exponente del modelo de Levy-Lee, sobre la superficie de la isla. Experimentalmente se han tomado 33 centros de circunferencias ubicados sobre un anillo entre la costa interna y la externa de la isla (cinco de estos centros: 1, 2, 3, 4, y 5, se ubican en el mapa de la Fig. 2a). Sobre cada centro, se calcula numéricamente la varia-

ción de $N(r)$ vs. r utilizando 50 radios de valores equiespaciados entre los 500 m y 3000 m (Fig. 3a).

El ajuste sobre la gráfica de $N(r)$ vs. r del modelo de Pareto, permite determinar el exponente D para los 33 puntos. Gracias a la localización de cada centro es posible describir la distribución direccional del valor calibrado para D . Su representación polar (Fig. 3b) permite diferenciar tres tipos de comportamiento radial. El tipo 1, para el que D posee valores inferiores a 1.5. El tipo 2, para el que D muestra oscilaciones poco regulares asociadas a una transición al tipo 3, en el que D toma valores superiores a 1.5.

La proyección de los sectores establecidos en el gráfico polar de D sobre el mapa de trazas permite establecer una zonificación en sectores de la Isla Decepción (Fig. 4). Así, se designa como zona Tipo 1 la que se encuentra sobre la franja norte de la isla: las fracturas (alrededores del punto 5 en la Fig. 2a) se distribuyen más uniformemente u homogéneamente (D es pequeño, con valores próximos a 1) que en el resto de la Isla, sin formar grandes agrupaciones.

Por el contrario, en las dos zonas Tipo 3 (Fig. 4), en donde hay trazas, éstas se encuentran más agrupadas que en la Tipo 1. Esta formación de núcleos de lineamientos puede estar representada por las agrupaciones que se encuentran próximas a los puntos 2 y 3 (Fig. 2a).

En las tres zonas Tipo 2 (Fig. 4), las características al cambio de escala del patrón de fracturación (alrededores del punto 1 o 4 de la Fig. 2a) son composición las de Tipo 1 y de Tipo 2, ya que en estas zonas gozan de las propiedades de ambos tipos. El hecho de que se encuentran tanto agrupaciones de trazas como

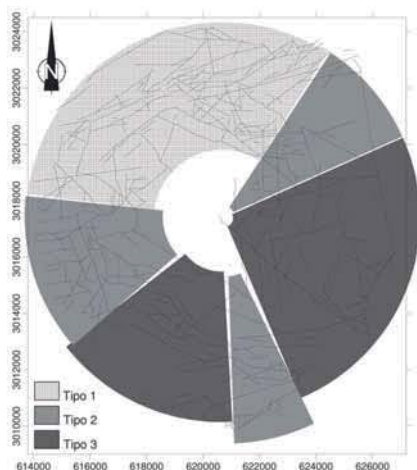


Fig. 4.- Zonación morfo-tectónica preliminar resultante proyectada sobre las trazas cartografiadas en la Isla Decepción.

Fig. 4.- Preliminary morpho-tectonic zoning projected over the trace map in the Deception Island.

distribuciones homogéneas produce las oscilaciones encontradas en los resultados del método de análisis aplicado.

Discusión y conclusiones

Tal y como ha sido presentado el proceso de zonificación, éste utiliza la información contenida en la localización geográfica de cada traza y como se correlaciona ésta con las que tiene a su alrededor. Como esta correspondencia se traduce en una distribución de tipo ley de potencia, según modelo de Pareto, y para un amplio rango de distancias, entonces la fracturación organiza geométricamente según un fractal de Levy-Lee. El análisis practicado sobre la organización de las trazas de falla permite afirmar que no hay una uniformidad en su estructura y por lo tanto tampoco lo hay en la liberación de la energía tectónica y geotérmica (dado que se trata de una isla sísmica y volcánicamente activa).

Estos morfolineamientos, a su vez, se circunscriben en un contexto tectónico regional condicionado por el carácter extensivo del Estrecho de Bransfield. Este marco reactiva grandes fallas normales de afinidad cortical. Estas grandes fallas corticales limitan en su interior bloques de deformación cuyos comportamientos son distintos. La comparación de estos bloques con la zonificación propuesta, confirma el hecho de que los sectores definidos están limitados por grandes fallas.

En cuanto a la ubicación de los procesos volcánicos, la zona Tipo 1 se caracteriza por ser donde ha tenido lugar la actividad volcánica más reciente con oleadas piroclásticas formando conos cineríticos monogenéticos y, en menor grado, de tipo explosivo

freatomagmático. También las zonas de Tipo 3 presentan erupciones recientes (Bahía Balleneros) y no tan próximas en el tiempo (laderas del Monte Kirkwood) pero su tipología es muy diferente al ser de tipo fisural, con maar y con procesos de tipo lahar asociados. Finalmente y atendiendo a los estos criterios, las zonas Tipo 2 se caracterizan por asentar una fuerte actividad fumarólica.

Agradecimientos

Este trabajo presenta parte de los resultados obtenidos en el proyecto VISHNU (REN2002-00578/ANT) financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Agradecemos igualmente la labor logística realizada por la Armada Española y el Ejército de Tierra, tripulación en el BIO Las Palmas y dotación en la BAE Gabriel de Castilla, respectivamente, para la realización de las campañas antárticas 2003-04 y 2004-05 en la Isla Decepción.

Referencias

- Birkenmajer, K. (1995). *Terra Antarctica*, 2, 33-40.
- Blanco, I. (1997). *Análisis e interpretación de las anomalías magnéticas de tres calderas volcánicas: Decepción (Shetland del Sur, Antártida), Furnas (San Miguel, Azores) y Las Cañadas del Teide (Tenerife, Canarias)*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid y CSIC. 185 p.
- Digital Globe © QuickBird (2003). Distributed by Eurimage, Italia.
- Fernández-Ibañez, F., Pérez-López, R., Martínez-Díaz, J. J., Paredes, C., Giner-Robles, J. L., Caselli, A. T. e Ibañez, J. M. (2005). *Antarctic Science*, 17, 418-426.
- Gonzalez-Casado, J. M., Giner-Robles, J. L. y López-Martínez, J. (2000). *Geology*, 28, 1043-1046.
- Gonzalez-Casado, J. M., López-Martínez, J., Giner, J. L., Durán, J. J., y Gumiel, P. (1999). *Geogaceta*, 26, 27-30.
- Keilis-Borok, V. I. y Soloviev, A. A. (2003). *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction*. Springer, 337 p.
- López-Martínez, J. y Durán, J. J. (2002) *Ciencia española en la Antártida: análisis de la producción bibliográfica (edición bilingüe español-ingles)*. Ministerio de Ciencia y Tecnología, 180 p.
- López-Martínez, J. y Serrano, E. (2002). En : *Geology and Geomorphology of Deception Island. Sheets 6-A and 6-B, 1:25000. BAS Geomaps Series* (J. L. Smellie, J. López-Martínez, J. W. Thomson y M. R. A. Thomson, Eds.). Cambridge; British Antarctic Survey, 31-39.
- Mandelbrot, B. B. (1985). *Physica Scripta*, 32, 257-260.
- Martí, J., Varaldo, A. y Rey, J. (1989). En: *III Simposium de Estudios Antárticos*. Comunicaciones, 187-191.
- Mazzuoli, R., Omarini, R. H., Ortiz, R., Viramonte, J. G. y De Rosa, R. (1989). *Asociación Geológica Argentina, Revista*, XLIV, 259-269.
- Muñoz-Martín, A., Catalán, M., Martín-Dávila, J. y Carbó, A. (2005). *Antarctic Science*, 17, 213-224.
- Paredes, C., Pérez-López, R., Giner-Robles, J. L., Martínez-Díaz, J. J., de la Vega, R., de Vicente, S., Queral, C. y González-Casado, J. M. (2005). *Terra Antarctica*, 12, (in press).
- Pérez-López, R., Martínez-Díaz, J. J., Paredes, C., Giner-Robles, J. L. y de la Vega, R. (2005). En: *VI International Conference on Geomorphology*. Comunicaciones.
- Rey, J., De Andrés, J. R. y Fernández-López, J. M. (1989). En: *III Simposium de Estudios Antárticos*. Comunicaciones, 258-270.
- Rey, J., Somoza, L. y Hernández-Molina, F. J. (1992). En: *Geología de la Antártida Occidental. III Congreso Geológico de España* (J. López-Martínez, Ed.). Comunicaciones, 163-172.
- Rey, J., Somoza, L. y Martínez-Frías, J. (1995). *Geo-Marine Letters*, 15, 1-8.
- Rey, J., Somoza, L. y Martínez-Frías, J. (1996). En: *V Simposio de Estudios Antárticos*. Comunicaciones, 209-221.
- Smellie, J. L. (2002). En : *Geology and Geomorphology of Deception Island. Sheets 6-A and 6-B, 1:25000. BAS Geomaps Series* (J. L. Smellie, J. López-Martínez, J. W. Thomson y M. R. A. Thomson, Eds.). Cambridge, British Antarctic Survey, 11-30.
- Smellie, J. L., López-Martínez, J., Headland, R. K., Hernández-Cifuentes, F., Maestro, A., Millar, I. L., Rey, J., Serrano, E., Somoza, L. y Thomson, J. W. (2002). *Geology and Geomorphology of Deception Island. Sheets 6-A and 6-B, 1:25000. BAS Geomaps Series* (J. L. Smellie, J. López-Martínez, J. W. Thomson y M. R. A. Thomson, Eds.). Cambridge, British Antarctic Survey, 77 p.
- Somoza, L., Martínez-Frías, J., Smellie, J. L., Rey, J. y Maestro, A. (2004). *Marine Geology*, 203, 119-140.
- Stoyan D. y Stoyan, H. (1994). *Fractals, random shapes and point fields. Methods of geometrical statistics*. John Wiley y Sons, 389 p.
- Vila, J., Martí, J., Ortiz, R., García, A. y Correig, A. (1992). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 89-102.
- Viramonte, J. G., Ramos, M., García, A., Suazo, C. y Díez-Gil, J. L. (1989). En: *III Simposium de Estudios Antárticos*. Comunicaciones, 250-253.