

Análisis geométrico y cinemático de la Falla del Río Maro: sus implicaciones en la génesis de cavidades kársticas del tipo Cueva de Nerja (Málaga, España)

Geometric and kinematics analysis of the Rio Maro fault: their implications in the genesis of karstic cavities of Cueva de Nerja type (Malaga, Spain)

P. Gumiel^(1,2), J.L. Giner-Robles⁽³⁾ y J.M. González-Casado⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto Geológico y Minero de España, IGME, Ríos Rosas 23, 28003, Madrid (Spain).

⁽²⁾Departamento de Geología, Universidad de Alcalá.

⁽³⁾Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid., 28049 Madrid.

ABSTRACT

A detailed geological map of 118 fault traces that form the Rio Maro Fault Zone (Malaga, Spain) has been carried out, emphasizing their geometric and kinematics characteristics. Several fault population analysis methods have been applied among them the right dihedral method, and the slip model have been utilized to establish the stress axes orientations (stress tensors) and to calculate the orientations of the maximum horizontal shortening and extension directions. Data have been analyzed to the whole population and discriminating the faults by orientations. Modelling of this fault population shows a dextral pull-apart in which specific fault orientations can influence the genesis of karstic cavities of Cueva de Nerja type.

Key words: fault population, geometry, kinematics, stress tensor, karstic cavities, Nerja, Maro

Geogaceta, 31 (2002), 201-204
ISSN:0213683X

Caracteres geológicos del entorno de la Cueva de Nerja

Los relieves calcáreos que constituyen la Sierra Alpujárride pertenecen al Complejo Alpujárride de la Cordillera Bética, concretamente al manto del mismo nombre (Sanz de Galdeano, 1986, 1989 y 1990) considerado Alpujárride Intermedio por Martín-Algarra (1987). Elorza y García-Dueñas (1980), englobaron los mármoles donde se encuentra la Cueva en la denominada por ellos "Unidad de Las Alberquillas" y ésta, a su vez, en el manto de Herradura. Al sur de los relieves carbonatados, en la franja costera, afloran los esquistos alpujárrides y, discordantes sobre ellos, los materiales plio-cuaternarios (Fourniguet, 1975; Guerra y Serrano, 1993).

En la región de Nerja la serie estratigráfica alpujárride está constituida por un conjunto inferior de metapelitas y otro superior de mármoles (Sanz de Galdeano, 1986, 1989, 1990; Andreo *et al.*, 1993). Las metapelitas pueden alcanzar hasta 1000 m de espesor y son principalmente, esquistos oscuros en la base y claros hacia techo, que se atribuyen al Paleozoico y al Triás inferior, respectivamente. Esta secuencia pasa gradualmente

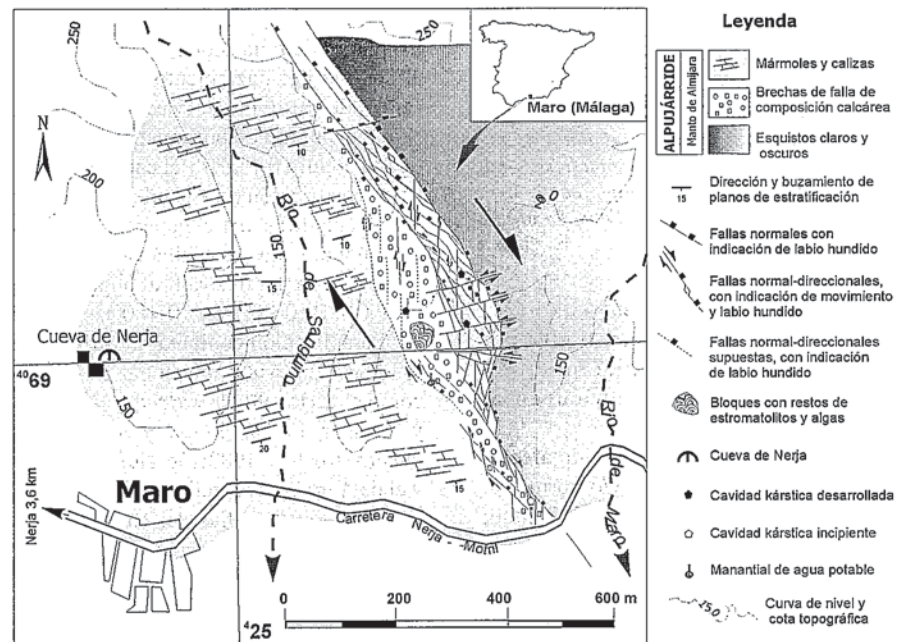


Fig. 1.- Esquema geológico y distribución de las trazas de fallas que constituyen la Zona de Falla del Río Maro.

Fig. 1.- Geological scheme and distribution of fault traces of the Rio Maro Fault Zone.

hacia techo, a través de unos niveles de transición (calcoesquistos, cuarcitas, mármoles y esquistos) a una potente serie marmórea. Los mármoles de la base, en los que se desarrolla la Cueva, pueden lle-

gar a tener unos 400 m de espesor, son de naturaleza dolomítica, de color blanco o gris, muy diaclasados, a menudo de aspecto sacaroideo y su edad es Triásico medio. Por encima de ellos aparece un

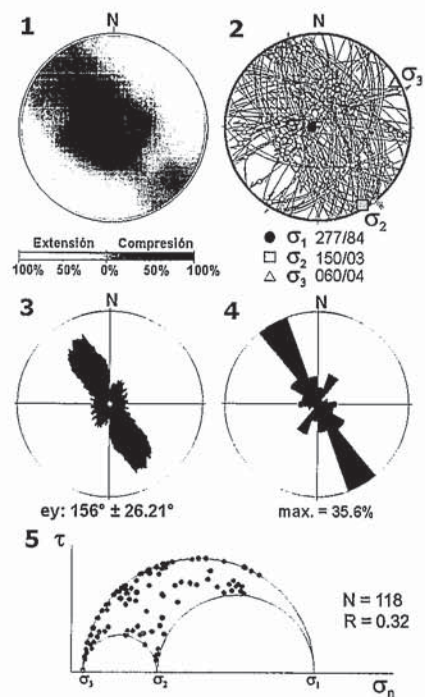


Fig. 2.- Análisis de la población total de fallas (n = 118). 1.- Diagrama de diedros rectos. 2.- Planos de fallas, estrías y tensores de esfuerzo (σ_1 , σ_2 , σ_3 ; ejes de esfuerzos máximo, intermedio y mínimo respectivamente; diagrama de Angelier). 3.- Dirección de máximo acortamiento horizontal (e_y) (Modelo de Deslizamiento). 4.- Diagrama en rosa de orientaciones de fallas. 5.- Diagrama de Mohr.

Fig. 2.- Fault population analysis (n = 118). 1.- Right dihedral plot. 2.- Fault planes, slickensides, and stress tensor (σ_1 , σ_2 , σ_3 ; maximum, intermediate and minimum stress axes; Angelier plot). 3.- Maximum horizontal shortening direction (e_y) (Slip Model). 4.- Rose diagram of fault orientations. 5.- Mohr diagram.

nuevo tramo, cuya potencia en el área varía entre 30 y 100 m, constituido por mármoles con intercalaciones de calcoesquistos, que se atribuyen al Triásico superior.

Todos los materiales han sido afectados por fallas de desgarre y/o normales, de dirección NO-SE (Sanz de Galdeano, 1993, Galindo-Zaldívar *et al.*, 2000), como las que limitan Sierra Almirara al oeste y al sur, jalonando el contacto entre los esquistos y los mármoles, que han provocado movimientos verticales durante el Plioceno. Estas fallas y los sistemas de diaclasas asociados, según esta orientación y su conjugada (NNE-SSO), han desempeñado un importante papel en la karstificación del macizo (Sanz de Galdeano, 1993). En los materiales pliocuaternarios también se han dejado notar los efectos de la neotectónica, como lo demuestra el basculamiento del con-

junto inferior Plioceno, o la existencia de materiales lacustres inclinados en el conjunto Pleistoceno. La propia acumulación de brechas y conglomerados en los abanicos aluviales del sector costero, indica que el borde sur de la Sierra Almirara se ha estado levantando hasta el Pleistoceno medio-superior de acuerdo con las dataciones absolutas existentes (Durán *et al.*, 1993).

Trabajos realizados (metodología)

Se ha realizado una cartografía estructural de detalle de 118 trazas de fallas reconocidas en la zona de Falla del Río Maro, a partir de la identificación y medida de las orientaciones de dichas fallas, y del registro de los criterios geométricos y cinemáticos (e.g. recristalizaciones fibrosas de calcita, "pull-aparts", marcas de arrastre, juntas estilolíticas, facetas pulidas y rugosas, fracturas de segundo orden-riedel, sintéticas, antitéticas- etc.) del conjunto de segmentos que caracterizan dicha zona de falla (Fig. 1). Esta cartografía ha puesto de manifiesto que esta falla es un accidente tectónico mayor, con buenas exposiciones de planos de fallas estriados que afectan a esquistos, brechas, mármoles y calizas pertenecientes al Manto de Almirara del Complejo Alpujarride.

Con respecto a las orientaciones de los planos de falla, siempre se ha medido el sentido del buzamiento del plano de falla (su valor puede variar entre 0 y 360°), el ángulo de buzamiento del plano de falla (entre 0 y 90°) y el cabeceo de las estrías de fricción (que pueden ser de alto y bajo ángulo) sobre el plano de falla. De este modo, cada par "falla-estría" queda representado por tres valores angulares D (0-360°), B (0-90°) y C (0-180°).

La aplicación conjunta de varios métodos de análisis poblacional de fallas, como el de los *Diedros Rectos* (Angelier y Mechler, 1977), el *Modelo de Deslizamiento* (Reches, 1983; De Vicente, 1988) y el de *Angelier* (Angelier, 1984, 1989), a la población de fallas del Río Maro ha proporcionado buenos resultados, tanto para el conjunto total de datos, como para las subdivisiones por sectores. La simetría ortorrómbica implícita en el Modelo de Deslizamiento resulta perfectamente compatible con la localización gráfica de los ejes P (compresión) y T (extensión) en los diedros rectos obtenidos sectorialmente, y con los ejes de esfuerzos determinados a partir del método de Angelier. Al aplicar el Modelo de Deslizamiento al total de segmentos medidos en la falla (118) se observa una aparente dispersión de los datos, aunque la mayoría de las fa-

llas (84 fallas, 71,1 %) pertenecen al campo normal-direccional. Un primer análisis muestra que la población de fallas se distribuye según dos modas, una con buzamientos y cabeceos altos, y otra con buzamientos medios y cabeceos bajos.

El diagrama de diedros rectos muestra un patrón típicamente normal-direccional (Fig. 2,1), con un máximo de compresión subvertical, y un máximo de extensión subhorizontal que se sitúa según una dirección NE. Este diagrama coincide con el de Angelier, del que se ha obtenido la orientación de los ejes de esfuerzos (Fig. 2, 2). El eje de esfuerzo máximo es casi vertical, y el intermedio y el mínimo son prácticamente horizontales (máximo σ_1 : 277/84, intermedio σ_2 : 150/03, mínimo σ_3 : 060/04; factor de forma del elipsoide de esfuerzos de 0,32 ($R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$). La dirección media del máximo acortamiento horizontal (e_y) está bien definida según $N156^\circ \pm 26.2^\circ$ (Modelo de Deslizamiento) (Fig. 2, 3).

El conjunto de fallas que constituye la Falla del Río Maro se ha subdividido para determinar con mayor aproximación las posibles variaciones en la orientación del máximo acortamiento horizontal (e_y). Se han discriminado los siguientes grupos de fallas en función de sus orientaciones (Fig. 2, 4):

1.- Fallas normal-direccionales de orientación NO-SE (representan un 35,6% del total).

2.- Fallas normal-direccionales de orientación NE-SO.

3.- Fallas normal-direccionales de orientación ONO-ESE.

4.- Fallas normal-direccionales y desgarres de orientación ENE-OSO (fundamentalmente de carácter antitético).

Los resultados que se han obtenido al segmentar la falla demuestran que es posible establecer una buena caracterización de los movimientos por sectores. Igualmente, se ha podido comprobar que hay una transición, desde fallas normales a fallas normal-direccionales, direccionales-normales y desgarres más puros hacia el extremo sureste de la falla.

El estudio se ha completado con un análisis mecánico de las fallas, mediante la utilización del criterio mecánico de neoformación/reactivación para una población determinada de fallas en el diagrama de Mohr (Fig. 2, 5). Se ha comprobado que gran parte de las fallas de segundo orden que se asocian a la Falla del Río Maro son reactivadas, aunque también hay algunas neoformadas. Sectorialmente, las fallas normal-direccionales de orientación NO-SE y las NE-SO que son conjugadas, presentan una mar-

cada simetría ortorrómbica y principalmente se consideran neoformadas. La mayoría de las fallas de orientación ONO-ESE y muchas de las NO-SE sufren también reactivaciones. Por su parte, las fallas antitéticas de orientación ENE-OSO son en su mayoría fallas neoformadas.

Modelo propuesto para la Falla del Río Maro y sus implicaciones en la génesis de cavidades kársticas: discusión y conclusiones.

En función de los resultados obtenidos, se ha propuesto un modelo evolutivo de la Falla del Río Maro que explica la distribución de las fallas de segundo orden asociadas, y que puede tener implicaciones de cara a la localización de cavidades kársticas, confirmándose el control estructural de las mismas. La distribución de fallas de segundo orden asociadas a la Falla del Río Maro es coherente con el desarrollo de un "pull-apart", originado como consecuencia del movimiento en dirección de una zona de fallas normal-direccionales, con un sentido de movimiento dextrorro (Fig. 3 A y B). Las orientaciones de estas fallas, que en su mayoría son normales y normal-direccionales, NO-SE y NE-SO (conjugadas), ONO-ESE, ENE-OSO y N-S, coinciden con la red de fracturas de segundo orden que predicen los modelos teóricos de estructuras frágiles asociadas al desarrollo de pull-aparts (e.g., Connolly y Cosgrove, 1999). El desarrollo de un grupo u otro de fracturas con movimientos predominantes normales o direccionales, depende principalmente de la situación relativa de los tensores de paleoesfuerzos y de las relaciones entre el solape de las fallas principales y la separación de las mismas. En esta falla, el solape (o) y la separación (s) de los segmentos principales de la falla (fallas A y B de los extremos NO y SE que definen el pull-apart, Fig.3,A), es del mismo orden de magnitud, unos 250 metros, y la red de fallas de segundo orden está constituida principalmente por fallas extensionales, normal-direccionales y en menor medida desgarres, de acuerdo con el tipo de rotura característico de estas estructuras, y cuya distribución depende del sector considerado y de la situación puntual de los tensores de paleoesfuerzos (Fig. 4).

En la zona exterior del pull-apart se observa una disposición periférica de fallas extensionales en abanico (Figs. 3,B y 4), que inicialmente se orientan a unos 40°-45° con las fallas principales (segmentos A y B, Fig. 3,A) y que van rotando, en sentido horario, a medida que

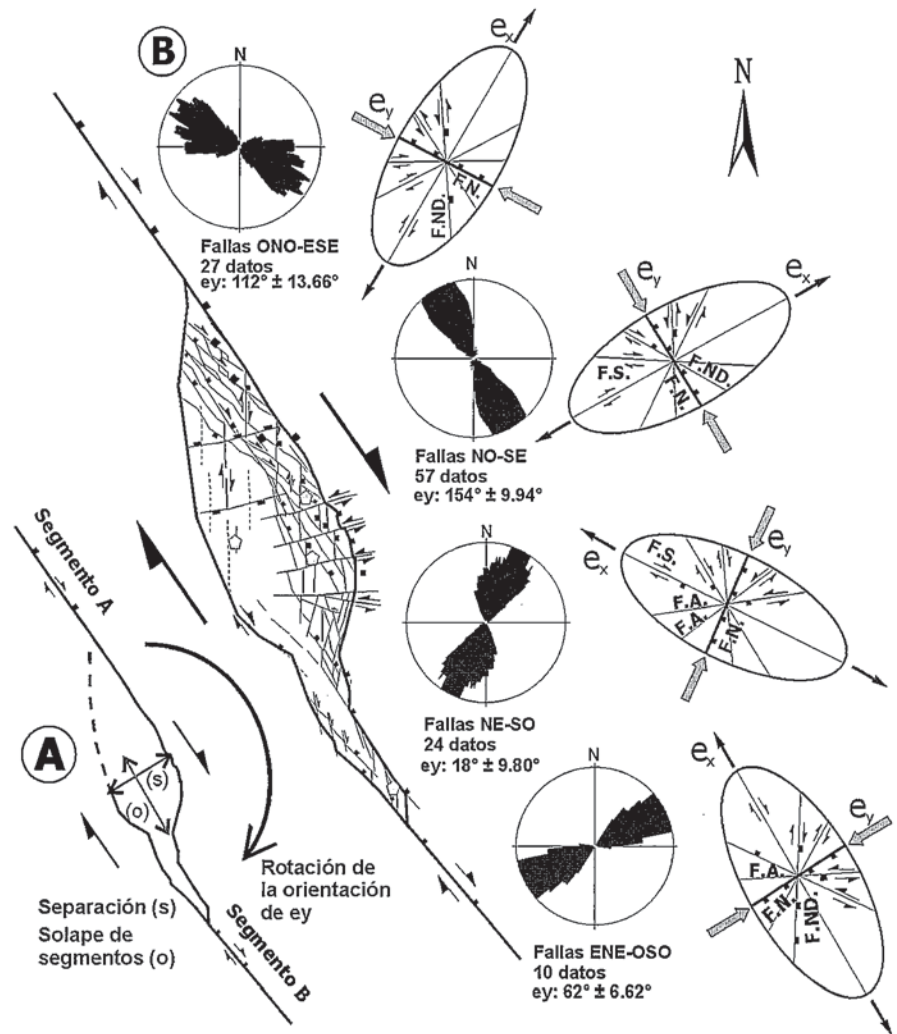


Fig. 3.- Modelo de distribución de segmentos de falla asociados al "pull-apart" dextrorro de la Falla del Río Maro. A) Relaciones entre el solape (o) y la separación (s) de las fallas principales, fallas A (extremo NW) y B (extremo SE) que definen el pull-apart. B) Rotación en sentido horario de las estructuras y de las orientaciones e_x , e_y , a medida que progresa la deformación debida a la componente de desgarr de sentido dextrorro (e_y : dirección de máximo acortamiento horizontal, e_x : dirección de máxima extensión horizontal, F.N.: Fallas Normales, F.N.D.: Fallas Normal-direccionales, F.S.: Fallas Sintéticas y F.A.: Fallas Antitéticas).

Fig. 3.- Model of fault segments distribution related to the dextral pull-apart of the Rio Maro fault. A) Relationships between overlap (o) and separation (s) of the main faults, faults A (NW) and B (SE) that form the pull-apart. B) Clockwise rotation of the structures, and the e_x , e_y orientations related to the right-lateral strike-slip movement (e_y : maximum horizontal shortening direction, e_x : maximum horizontal extension direction, F.N.: Normal faults, F.N.D.: Normal-directional faults, F.S.: Synthetic faults and F.A.: Antithetic faults).

progresa la deformación, debida a la componente de desgarr (Fig. 3,B). En la zona interior del pull-apart el esfuerzo diferencial es menor y disminuye el número de fracturas de segundo orden, tal y como sucede en la Falla del Río Maro. El esfuerzo diferencial aumenta rápidamente hacia los bordes y se generan fallas con movimientos predominantes en dirección (desgarrs), también orientadas a bajo ángulo (sintéticas), unos 40°-50° con respecto a las principales (segmentos A y B, Fig. 3-A). Otras se disponen a alto ángulo (antitéticas), a unos 80°-100° con respecto a las principales. La red de fracturas en

el interior del pull-apart se forma como resultado de roturas, predominantemente de desgarr, que aparecen rodeadas por estrechas zonas en donde la rotura es principalmente extensional (puente extensional), lo que también coincide con los modelos teóricos de distribución de fracturas asociadas a estructuras pull-apart (e.g. Connolly y Cosgrove, op.cit.).

En conclusión, la aparición de fallas con unas orientaciones y movimientos determinados (extensionales, normal-direccionales o desgarrs) depende de las direcciones del máximo acortamiento horizontal (e_y) y de la máxima extensión

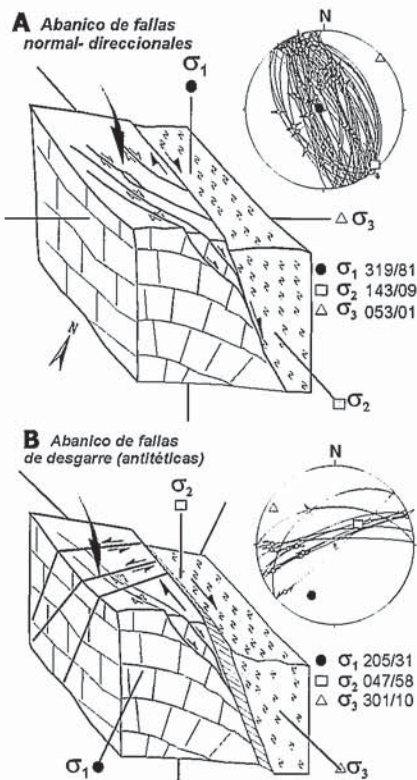


Fig. 4.- Orientación de los tensores de esfuerzos. A) Movimiento predominante extensional (tensor de esfuerzos de tipo normal). B) Movimiento predominante direccional (tensor de esfuerzos de tipo desgarre); σ_1 , σ_2 , σ_3 : ejes de esfuerzos máximo, intermedio y mínimo respectivamente

Fig. 4.- Orientation of stress tensors. A) Predominantly extensional movement (stress tensor of normal type). B) Predominantly wrench movement (stress tensor of strike-slip type); σ_1 , σ_2 , σ_3 ; maximum, intermediate and minimum stress axes.

horizontal (e_x) (Fig. 3,B). Las reactivaciones de determinados planos de falla van a ejercer un control estructural en la formación de cavidades kársticas. Se han encontrado varias cavidades con distinto grado de karstificación, siempre a favor de determinadas fallas (Fig. 1). En concreto, las fallas normal-direc-

cionales de orientación NO-SE y N-S que tienen movimientos sintéticos, y las ENE-OSO que tienen movimientos anti-téticos son las que parecen ejercer un mayor control en el desarrollo de cavidades kársticas. La razón de porqué son estas fallas las que van a favorecer predominantemente el desarrollo kárstico, debe estar relacionada con la orientación de la máxima extensión (e_x) cuando los paleoesfuerzos generaron estas estructuras. Estas orientaciones sin duda van a favorecer el flujo hidráulico a través de determinados planos de falla (e.g., la existencia del manantial de Maro), y consiguientemente van a influir en el desarrollo inicial del proceso kárstico. Este hecho viene corroborado por la tendencia lineal de las cuevas de la zona, tal es el caso de la Cueva de Nerja, cuya génesis, probablemente relacionada con una estructura de tipo pull-apart extensional, similar a la de la Falla del Río Maro, ya ha sido sugerida anteriormente (Gumiel *et al.*, 1999).

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto: *relación entre la deformación frágil y la karstificación en el entorno de la cueva de Nerja*, realizado bajo contrato de colaboración entre el Patronato de la Cueva de Nerja y el Departamento de Geología de la Universidad de Alcalá de Henares (Referencia U.A.H. 57/2000) y financiado por el Patronato de la Cueva de Nerja.

Referencias

Andreo, B., Carrasco, F., y Sanz de Galdeano, C. (1993): In Carrasco F. (ed.), *Geología de la Cueva de Nerja: Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3, 25-50.
 Angelier, J. (1984): *J. Geophys. Res.*, 89(7), 5835-5848.
 Angelier, J. (1989): *Journal of Structural Geology*, 11 (1/2), 37-50.
 Angelier, J. y Mechler, P. (1977): *Bull.*

Soc. Géol. France, 7, 1309-1318.
 Connolly, P. y Cosgrove, J. (1999): In: McCaffrey, K.J.W., Lonergan, L. & Wilkinson, J.J.(eds.) *Fractures, Fluid Flow and Mineralization*. Geol. Soc. London, Special Public., 155, 105-121.
 De Vicente, G. (1988): *Tesis Universidad Complutense. Madrid*. 331 pp.
 Durán, J.J., Grün, R. y Ford, D. (1993):. In Carrasco F. (ed.), *Geología de la Cueva de Nerja: Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3, 233-248.
 Elorza, J.J. y García-Dueñas, V. (1980): Mapa geológico a escala 1:50.000, Hoja nº1054 (Vélez-Málaga), I.G.M.E. Memoria explicativa, 59 p.
 Fourniguet, J. (1975): *Thèse 3^{er} cycle. Université d'Orleans*, 234 p.
 Galindo-Zaldívar, J. Ruano, P., Jabaloy, A. y López-Chicano, M. (2000): *C.R.Acad.Sci.Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, 331, 811-816.
 Guerra, A. y Serrano, F. (1993): In: Carrasco, F. (Ed.) *Geología de la Cueva de Nerja: Trabajos sobre la Cueva de Nerja* 3, 55-90.
 Gumiel, P., Durán, J.J., López-Martínez, J., González-Casado, J.M., Andreo, B. y Carrasco, F. (1999): In *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico* (B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán Eds.), 47-56.
 Lhénaff, R. (1981): *Thèse de 3^{er} cycle, Université de Lille*, 713 p.
 Martín-Algarra, A. (1987): *Tesis doctoral. Univ. Granada*, 1368 p.
 Reches, Z. (1983): *Tectonophysics*, 95, 133-156.
 Sanz de Galdeano, C. (1986): *Estudios Geológicos*, 42, 281-289.
 Sanz de Galdeano, C. (1989): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 2, 77-84.
 Sanz de Galdeano, C. (1990): *Estudios Geológicos*, 46, 123-134.
 Sanz de Galdeano, C. (1993): In: Carrasco F. (ed.), *Geología de la Cueva de Nerja: Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3, 95-114.