

RELACION DE LAS DIRECCIONES DE KARSTIFICACION Y DEL TERMALISMO CON LA FRACTURACION EN LAS CORDILLERAS BÉTICAS

J. Benavente Herrera (*) y C. Sanz de Galdeano (**)

RESUMEN

Se analizan las direcciones de las principales familias de fracturas registradas en diferentes sistemas kársticos de las Cordilleras Béticas, a partir de estudios fotogeológicos (escalas 1/10.000-1/35.000). La edad de los materiales analizados comprende desde el Triás medio al Plioceno; su litología predominante es carbonática, aunque también se han considerado materiales evaporíticos (celestina y yeso). Además de su frecuencia direccional, las metodologías empleadas permiten estimar relaciones de longitud entre sistemas de fracturas.

Los resultados obtenidos, contrastados con observaciones de campo, señalan el predominio de los sistemas de dirección N 130-160 E y N 5-35 E, caracterizado el primero por la mayor longitud relativa de sus fracturas y, el segundo, por presentar carácter bimodal en su frecuencia direccional. Ambos sistemas se corresponden con importantes accidentes que, a escala regional, han funcionado como fallas de salto en dirección y como fallas normales. Menores evidencias de karstificación presenta el sistema N 70-100 E, de gran significado tectónico y paleogeográfico (contacto zonas Internas-Externas, accidente de Cádiz-Alicante). La intersección entre estos sistemas (principalmente los N 70-100 E y N 130-160 E) condiciona, además de la intensa sismicidad del área, la localización de las principales surgencias termales.

Desde el punto de vista metodológico, los resultados obtenidos cubren un nivel de escala del que se carecía de información y confirman hipótesis previas —establecidas en base a la interpretación de imágenes de satélite, así como a partir del análisis microtectónico— relativas a cambios en la orientación del máximo esfuerzo compresivo. Las direcciones de karstificación aquí señaladas coinciden con las obtenidas en estudios análogos en el Algarve portugués, lo que sugiere una evolución común en todos los sistemas kársticos meso-cenozoicos del sur de la Península.

PALABRAS CLAVE: Tectónica de fractura, karstificación, Meso-Cenozoico, Cordilleras Béticas.

ABSTRACT

Based on the interpretation of aerial photographs (scales between 1:10,000 and 1:35,000) an analysis is made of the various karstic fracture systems within the Betic Cordilleras of Southern Spain. The age of the fractured materials is comprised between the Middle Triassic to the Pliocene, with lithologies that, though predominantly carbonatic, also include celestite, and gypsum-bearing evaporites. Besides their directional frequency, the methodologies employed also allowed an estimate of the length relationships among fracture systems.

The results so obtained, tested against field observations, indicate that two fracture systems (N 130-160 E and N 5-35 E) are predominant, characterized respectively by a relatively greater length of its component fractures and by having a bimodal directional frequency. On a regional scale both systems correlate well with important structural lineaments that appear to have been active either as strike-slip or normal faults. Another fracture system striking roughly N 70-100 E presents comparatively less evidence of karstification, in spite of its considerable tectonic and paleogeographic significance (i. e., it parallels the boundary between internal and external realms of the cordilleras, the so-called Cádiz-Alicante fracture system). The intersection of these systems (especially those striking N 70-100 E and N 130-160 E) appears to be a major control of the location of the main thermal springs, as well as of the intense seismic activity of the area.

From a methodological standpoint, the results obtained in this study cover a scale level about which no information was previously available, and confirm existing hypotheses —based on satellite imagery and microtectonic analysis— concerning the occurrence of changes

(*) Departamento de Hidrogeología. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.
(**) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

in the orientation of the maximum vector of compressive stress. The strike of the karstification lineaments here signaled coincide with those obtained in analogous studies in the portuguese Algarve region, on the other hand, which suggests that the mesozoic and cainozoic karst systems in the south of the Iberian Peninsula may have had a common evolution.

Key words: Faulting Tectonic, karstification, Meso-Cenozoic, Betic Cordilleras.

Introducción

En este trabajo hemos recopilado, y reinterpretado en algunos casos, los resultados de diferentes estudios relativos al análisis fotogeológico de fracturas en diferentes macizos kársticos de las Cordilleras Béticas. El objetivo que se pretende es identificar las familias de fracturas que muestran mayores evidencias de karstificación y analizar su relación con los sistemas principales obtenidos del estudio a escala, tanto de carácter regional como de detalle en afloramiento. También incluimos en esta síntesis otros datos, karstológicos e hidrogeológicos, que, aunque sin traducción estadística, contribuyen a ilustrar el modelo geométrico propuesto.

Existe ya un elevado número de trabajos que tratan el tema de la fracturación reciente (a partir del Tortonense) en las Cordilleras Béticas, tanto a escala microtectónica como regional (Groupe de Recherche Néotectonique..., 1977, Estévez y Sanz de Galdeano, 1983, Pernía *et al.*, 1983, Sanz de Galdeano *et al.*, 1984). En la figura 1 representamos algunos de los principales accidentes que Sanz de Galdeano (1983) distingue en las Cordilleras Béticas.

Parte del interés de este estudio se basa en que en Hidrogeología kárstica (en especial desde los trabajos de Kiraly, 1969, 1975) la tectónica de fractura juega un papel determinante en la distribución de las permeabilidades dentro de un sistema de flujo subterráneo. Ello es válido tanto en régimen "natural" de descarga, como en el caso de flujos inducidos hacia captaciones (Drogue y Grillot, 1976). Como consecuencia metodológica, el establecimiento de la cronología relativa de las fracturas y de su evolución tectónica, se revela como herramienta de suma utilidad para obtener una aproximación geométrica de la anisotropía hidráulica que caracteriza a este tipo de acuíferos (Drogue *et al.*, 1979). A este respecto, además de la necesaria interpretación de datos estructurales sobre el terreno y la eventual inclusión de datos espeleológicos (Grillot y Drogue, 1977), la técnica más utilizada es el análisis fotogeológico de campos de fracturas (Grillot, 1979), que cubre, además, una escala intermedia entre los datos regionales y microtectónicos.

También se pretende, en este trabajo, mostrar la relación que existe entre la situación de las principales surgencias termales de las Cordilleras Béticas y la fracturación reciente, aspecto que complementa de algún modo las ideas anteriores.

Datos de base

En la figura 1 se representa la localización de los ejemplos considerados, en los cuales se dispone de datos relativos al análisis estadístico de la fracturación en macizos kársticos. En la tabla I incluimos los correspondientes toponímicos y referencias.

Conviene señalar que, salvo en contadas ocasiones, resulta difícil establecer la naturaleza tectónica precisa (fallas o diaclasas) de los alineamientos analizados, por lo que empleamos el término general de "fracturas" para designarlos. Este es el caso de los ejemplos números 1 a 7. A excepción de este último, del que no se dispone de datos al respecto, el resto de los ejemplos tratan con números de fracturas suficientemente elevados (densidades superiores, por lo general, a 50 fracturas por km²). En el ejemplo número 4 no puede precisarse el número de fracturas, al haberse realizado el análisis en función de la longitud acumulada de las mismas, de manera automática, en el "Banco de Óptica" (Drogue *et al.*, 1975).

En algunos casos, la propia naturaleza de los materiales carbonáticos (mármoles brechificados, también denominados "kakiritas" para el caso del Trías alpujarride) dificulta la identificación de las fracturas en fotografía aérea y los afloramientos muestran una red de drenaje de elevada densidad (Díaz Hernández y Fernández-Rubio, 1976). Este aspecto también ha sido constatado en materiales metapelíticos, los cuales frecuentemente están alterados en superficie o recubiertos de cultivos, lo que dificulta la identificación de fracturas (Sanz de Galdeano *et al.*, 1985).

Hemos juzgado de interés incluir en este estudio los datos del ejemplo número 9, correspondiente a un acuífero de tipo "seudokárstico" (Avias y Dubertret, 1975). Su particularidad estriba en que la mayoría de los datos corresponden a orientaciones de tramos rectilíneos de cavidades subterráneas controladas por fracturas, obtenidas a partir de topografía espeleológica. El ejemplo número 10 corresponde a un análisis estadístico sobre orientación de formas epikársticas cerradas, generadas sobre las calcarenitas pliocenas del Campo de Dalías, cuya morfología está relacionada estrechamente con las principales fracturas recientes que afectan a ese sector del litoral almeriense. Esa es la razón por la que, tanto para el ejemplo número 9 como para el número 10, el número de medidas disponibles es sensiblemente más reducido que para el resto.

A excepción del primero y último de los ejemplos considerados, en el resto de ellos se dispone de datos

relativos a orientación de fracturas medidas sobre el terreno. Se trata de diaclasas, en la mayoría de los casos, o fallas de pequeño salto, cuyo régimen es difícil de apreciar al efectuarse las medidas de campo sobre aquellas más karstificadas, por lo que las paredes aparecen frecuentemente afectadas por procesos de lenarización.

De acuerdo con la figura 1, se aprecia que la distribución areal de los casos analizados no es demasiado dispersa. Según la tabla I, el ámbito litológico —aun dentro del marco común de materiales kársticos— es amplio, pues cubre desde calizas y dolomías

de diferentes características texturales hasta calcarenitas y mármoles con diferente grado de metamorfismo. También incluye otros materiales karstificables, no carbonáticos, como celestina y yeso.

Desde el punto de vista estratigráfico, agrupa materiales cuyas edades comprenden desde el Triás al Plioceno. Pensamos que, con tal variedad de circunstancias, la representatividad regional de los resultados será mayor.

En ambas situaciones (fotointerpretación y datos de campo) hemos seleccionado para cada ejemplo las dos familias de fracturas más frecuentes, de acuerdo

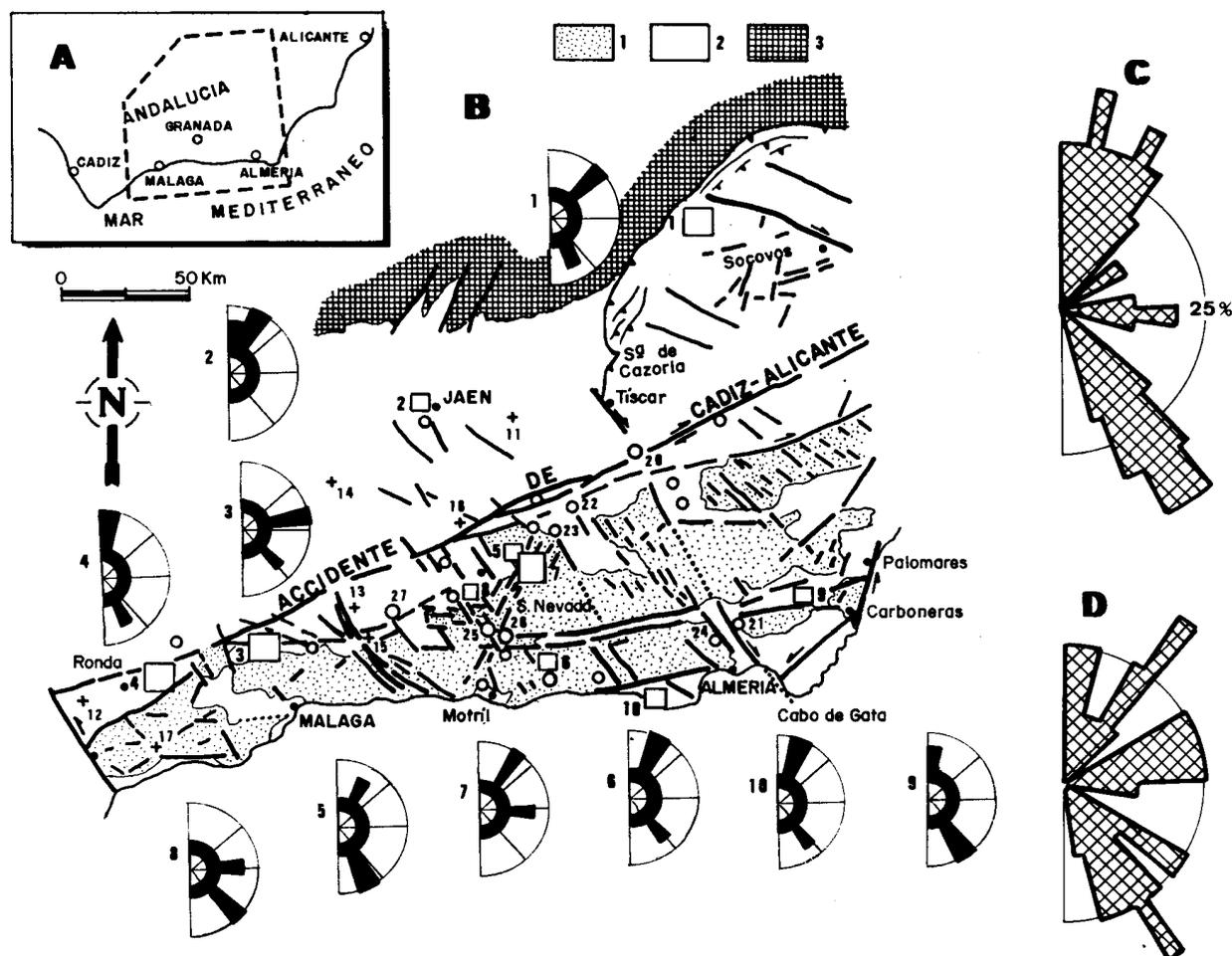


Fig. 1.—A: Localización del área investigada. B: Situación de los macizos kársticos considerados (rectángulos), de las principales surgencias termales o grupos de ellas (círculos) y de otros sectores que se citan en el texto (cruces), en relación con los principales accidentes de las Cordilleras Béticas, tomados de Sanz de Galdeano (1983). Para cada uno de los macizos kársticos, se esquematiza la dirección de las dos familias de fracturas predominantes, deducidas por fotointerpretación. (1: Zonas Internas. 2: Zonas Externas y materiales de las depresiones. 3: Materiales de la Meseta y Cordillera Ibérica. Las líneas gruesas corresponden a las principales fracturas; con trazo de puntos se señale la posición probable de las mismas; con picos indican cabalgamientos). Los diagramas semicirculares de la derecha representan la recopilación, para todos los casos analizados, de las direcciones predominantes de fracturación obtenidas por fotointerpretación (C) y a partir de medidas de campo (D).

TABLA I
Principales características de los ejemplos considerados

Núm.	Sector	Zona	Edad	Núm. fractura		Referencia
				Foto	Campo	
1	Calar del Mundo	Prebética	Cretácico superior	500		Rodríguez Estrella (1976)
2	Sierra de Jaén	Prebética	Cretácico superior	2.350	900	Benavente (1980)
3	Torcal de Antequera	Penibética	Jurásico	1.830	500	Fernández-Rubio <i>et al.</i> (1981)
4	NE de Ronda	Penibética	Jurásico	(1)	1.630	Benavente <i>et al.</i> (1980)
5	Sierra de Alfaguara	Bética	Triás	250	1.000	Castillo (1981)
6	Rambla de Albuñol	Bética	Triás	340	460	Sanz de Galdeano <i>et al.</i> (1985)
7	Alto río Darro (2)	Bética-Dorsal	Triás-Jurásico	950	600	Díaz Hernández y Fernández-Rubio (1978)
8	Montevives (3)	Depresión de Granada	Mioceno	(4)	570	Fernández-Rubio <i>et al.</i> (1975)
9	Sorbas (5)	Depres. Sorbas (Almería)	Mioceno	90	70	Pulido Bosch (1982)
10	Dalias (6)	Neógeno W. de Almería	Plioceno	90		Bach y Estalrich (1980)

NOTAS:

- (1) Análisis efectuado a partir de longitudes acumuladas de fracturas ("Banco de Óptica")
- (2) Medidas de orientación de cauces
- (3) Materiales integrados esencialmente por celestina
- (4) No citan número
- (5) Medidas de dirección de cavidades y cauces; materiales esencialmente integrados por yesos
- (6) Medidas de orientación preferencial de formas kársticas

con los resultados de los correspondientes análisis estadísticos. A continuación, hemos considerado los intervalos angulares en que existía coincidencia, expresándola como porcentaje del número de casos analizados, circunstancia que representamos gráficamente en los diagramas de la figura.

Es obvio que tales representaciones carecen de rigor estadístico, al asignar igual representatividad frecuencial a familias direccionales obtenidas a partir de muestreos muy diferentes en número. Mantendremos, no obstante, dicho criterio, por ser más acorde con los objetivos de este trabajo, en que se busca una comprobación de los resultados obtenidos por otras metodologías más que un estudio exhaustivo y detallado de los datos obtenidos con ésta. Un análisis preciso exigiría la transformación de los datos direccionales a distribuciones de tipo circular-normal (Watson, 1966; Mardia, 1972).

Análisis de los resultados

De la observación de los diagramas de la figura 1 conviene señalar, en primer lugar, la similitud entre los resultados obtenidos en los dos niveles de escala considerados (foto aérea y campo). En ambos aparecen netamente diferenciados los tres intervalos angulares que señalamos a continuación.

LAS FRACTURAS N-S A NE-SW

Dentro de este grupo se identifican dos máximos relativos: N 5-15 E y N 25-35 E, distinción que no había sido referida hasta ahora. Se aprecia cómo esos dos máximos no están igualmente representados en ambos niveles de escala. El hecho de que el primero de ellos predomine en los datos procedentes del análisis fotogeológico y el segundo en las medidas de campo, da idea de su magnitud relativa. No es de extrañar, por tanto, que el único ejemplo de los considerados en que el sistema N 5-15 E predomine en el análisis fotogeológico, sea el número 4, donde el tratamiento se ha efectuado en base a longitudes acumuladas de fracturas.

En el ejemplo número 2, la familia de fracturas más frecuente a partir del análisis fotogeológico es la N 20-40 E (también es la que ofrece valores inferiores del parámetro "distancia interfRACTURAL media", obtenida a partir de datos de campo según la metodología expuesta en Razack, 1978). En este caso disponemos, al igual que para el número 4, de la correspondiente distribución de longitudes de fracturas. Ambas son de carácter log-normal (fig. 2) y, siendo la escala de los fotogramas idéntica, se aprecia cómo la longitud media es sensiblemente superior en el ejemplo en que predomina la familia N 5-15 E que en el de la N 20-40 E.

Parece comprobarse, por tanto, que la diferencia entre los dos máximos relativos identificados es, además de cualitativa, cuantitativa (fracturas de longitud y espaciamiento diferentes). Pensamos que ello representa un matiz —pendiente de confirmación con datos más precisos— respecto a los rasgos generales que, para este sistema, se apuntaban en el trabajo de Sanz de Galdeano (1983).

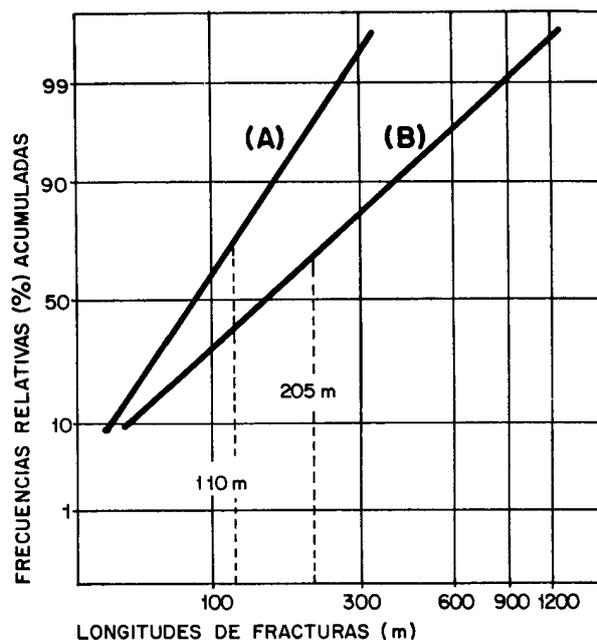


Fig. 2.—Distribución de las longitudes de fracturas obtenidas por fotointerpretación en los ejemplos núm. 2 (A) y núm. 4 (B); para cada uno se indica el valor medio deducido.

En el ámbito regional, y dentro de este sistema de fracturas, la falla de Palomares, en la costa oriental de Almería, pertenecería al primero de los grupos diferenciados. Su régimen es sinistrorso y, tanto su longitud como el salto que para ella se deduce, son apreciables. Al segundo grupo correspondería el conjunto de fracturas del borde occidental de Sierra Nevada (Sanz de Galdeano *et al.*, 1982). Se trata de numerosas fallas de pequeña magnitud, con movimientos fundamentalmente verticales, existiendo también los de desgarre sinistrorso.

La familia de fracturas predominante en el ejemplo número 1 (Calar del río Mundo), supone un rasgo anómalo respecto al grupo anterior, al estar algo desplazada hacia el este. Precisamente en dicho ejemplo no se dispone de datos de campo, que podrían ilustrar sobre dicha anomalía. No obstante, conviene llamar la atención acerca de la posible relación que dicho rasgo muestra en función de su proximidad al accidente dextrorso de Socovos.

LAS FRACTURAS N 70-100 E

De acuerdo con los diagramas C y D de la figura 1, este sistema aparece representado con mayor amplitud angular en los datos de campo que en los precedentes de fotointerpretación. De los tres reconocidos, es el menos importante. No es así en lo que a su importancia tectónica y paleogeográfica se refiere, dentro del ámbito de la cordillera, ya que a este sistema pertenece el contacto entre zonas Internas y Externas. La historia de este accidente es compleja, y tal vez el rasgo más aparente sea el hecho de aparecer en relación con el desplazamiento de las zonas Internas hacia el oeste o, lo que es lo mismo, del Macizo Ibérico hacia el este, a lo largo de más de 300 kilómetros.

También dentro de este grupo se incluye el accidente de Cádiz-Alicante (denominado "de Crevillente" por Foucault, 1971), esencialmente dextrorso, aunque con menor desplazamiento que el anterior. El único de los macizos kársticos estudiados por fotointerpretación en el que predomina dicho sistema de fracturas es el número 3 (Torcal de Antequera). Es significativa su localización geográfica entre los dos accidentes que acabamos de citar, así como su proximidad a la prolongación occidental del conjunto de fracturas que delimitan el corredor de Las Alpujarras (fig. 1).

LAS FRACTURAS N 130-160 E

Este sistema es claramente identificable, para ambos niveles de escala, en los diagramas de la figura 1. Es el que muestra frecuencia más elevada y menor dispersión angular de los tres grupos reconocidos. A nivel regional, son numerosas las fracturas que muestran esa orientación; en general responden a desgarres dextrorsos. Una de las más conocidas es la denominada "falla de Tíscar" (Foucault, 1971) que parte del extremo occidental de la sierra de Cazorla, continúa por la depresión de Baza (Cruz de San Julián y García-Rossell, 1972) y sigue hasta el borde occidental de la costa del cabo de Gata (Sanz de Galdeano, 1983).

Conviene señalar que la escasa dispersión angular registrada para este sistema puede estar condicionada por la localización de los ejemplos considerados, ya que algunas fracturas de este grupo sufren una inflexión que las aproxima más a la dirección este-oeste. Ello sucede al sur de Sierra Gorda de Loja y también en sectores de la zona Prebética (Rodríguez Estrella, 1979a), como la ya citada fractura de Socovos; en ambos casos predomina el régimen dextrorso. De haber considerado algún ejemplo en tales sectores, seguramente el intervalo obtenido sería más amplio en dicho sentido.

Al igual que sucedía con las fracturas del primero

de los sistemas citados, aquí también son importantes los movimientos en la vertical. Es muy apreciable dicho aspecto en la depresión de Granada y su entorno (Sanz de Galdeano, 1980). No es de extrañar, por tanto, que los ejemplos considerados en que este intervalo predomina (Alfaguara y Montevives) se localicen precisamente en los bordes de dicha depresión.

Según López Casado y Sanz de Galdeano (en prensa) las fallas de este sistema son las que muestran mayor actividad sísmica actual.

Como ya se ha indicado, estos tres sistemas principales de fracturas no presentan igual importancia frente a los procesos de karstificación. Así, la figura 3 ilustra acerca de la relación existente, en lo que a magnitud de las fracturas se refiere, entre los tres sistemas diferenciados. El ejemplo corresponde al macizo de sierra de Colorado, al noreste de Ronda, e incluye tanto datos de campo (a) como resultantes del análisis fotogeológico, realizado éste en función del número de fracturas en un sector del macizo (b) y de las longitudes acumuladas de fracturas para el total del mismo (c).

Se aprecia en dicha figura cómo las fracturas de mayor longitud son las de dirección aproximada N 130-160 E, que registra la máxima frecuencia en (c), estando poco representada en (b). Las fracturas del sistema N 70-100 E, aunque relativamente numerosas (b), se caracterizan por su menor longitud, al corresponder al intervalo de frecuencia mínima en (c). La mayor homogeneidad, entendiéndose como tal el equilibrio entre número de fracturas y longitud de las mismas, corresponde al sistema N 5-35 E.

OTROS DATOS

Existen otros aspectos que no han dado lugar a estudios estadísticos, aunque su consignación es de interés, pues confirma el alcance regional de los resultados aquí obtenidos.

En el macizo kárstico de sierra Mágina (núm. 11, fig. 1), García-Rossell y Pezzi (1975) señalan el predominio de las fracturas de dirección noroeste-sureste, a las que atribuyen gran importancia en la morfogénesis de dicho macizo. Esta dirección condiciona también la orientación del polje de Benaoján, en la Serranía de Ronda (núm. 12; Rodríguez Martínez, 1977). Si los primeros autores relacionan la citada dirección con la proximidad a la falla de Tíscar, es evidente en el segundo caso la influencia que, sobre dicho aspecto, tiene el accidente que corresponde al extremo occidental del contacto entre zonas Internas y Externas (fig. 1).

Delgado Moya y Fernández-Rubio (1975) estudian los principales poljes existentes en Sierra Gorda de Loja (núm. 13) y encuentran una estrecha relación entre sus ejes principales de alargamiento y fracturas de dirección aproximada N 30 E y N 130 E.

Tal vez debido a la particular situación del macizo, ya comentada, la alineación de las formas kársticas en el Torcal de Antequera está relacionada con fracturas de direcciones diferentes a las anteriores: N 150 E y N 70 E (Fernández-Rubio y Delgado Al-mendros, 1975).

cierta profundidad de fracturas de dirección N 50-70 E (Almécija *et al.*, 1983), coincidentes con la traza del accidente de Cádiz-Alicante, el cual discurre por la inmediata proximidad de dicho sector.

En la Sierra Blanca de Marbella (núm. 17), Rodríguez Vidal (1982) identifica las fracturas domi-

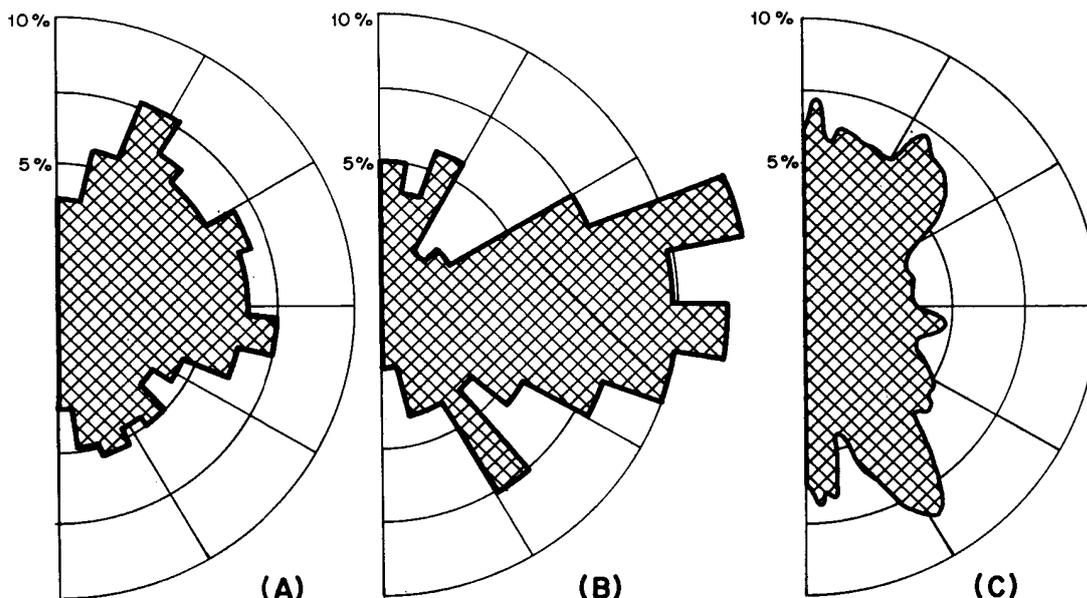


Fig. 3.—Familias predominantes de fracturas en el macizo kárstico de sierra de Colorado (NE de Ronda). A: medidas de campo (núm. = 600). B: número de fracturas en foto aérea en un sector del macizo (3 km², núm. = 200). C: Longitudes acumuladas de fracturas en foto aérea, para la totalidad del macizo (10 km²).

Este aspecto general de relación entre formas kársticas y fracturas, puesto también de manifiesto por Lhenaff (1975) en los poljes abiertos de la Sierra de Cabra (núm. 14), es extensible a la mayoría de las depresiones kársticas de la cordillera. No es de extrañar, por tanto, que el polje de Zafarraya (núm. 15), tal vez el más espectacular de España, se localice en la intersección de dos grandes accidentes megamétricos: contacto zonas Internas-Externas y prolongación occidental del sistema de fracturas del borde sur de Sierra Nevada. La propia elongación del polje es subparalela a la dirección de las fallas del borde oeste de Sierra Gorda de Loja (N 60 W). Ello confirma lo señalado por Nicod (1983) respecto a los principales poljes mediterráneos, relacionados con “zonas de trituración en relación con accidentes que rejuegan periódicamente”. Además del citado de Zafarraya, es el caso de numerosos poljes dináricos, así como en el Líbano.

Sondeos eléctricos direccionales (Grillot *et al.*, 1975, Granda, 1982) realizados en el sector del puerto del Zegrí (núm. 16), denotan la existencia a una

nantes a partir de medidas de campo. Su dirección es, aproximadamente, este-oeste, la misma que presenta el accidente subparalelo a la costa que determina el borde meridional de dicho macizo. Este autor, sin embargo, relaciona la génesis de tales fracturas con un esfuerzo vertical “consecuencia del emplazamiento intrusivo de un apéndice de rocas ultrabásicas”.

Las direcciones principales de karstificación y su posible relación con los esfuerzos

A partir de los datos expuestos, concluimos que las direcciones preferenciales de karstificación parecen corresponder a los sistemas N 130-160 E y N 5-35 E; las primeras, además, son las que evidencian presentar mayor longitud. Estos dos sistemas han sido también reconocidos como más karstificados en la prolongación occidental (Algarve, Portugal) del área investigada (Grillot y Almeida, 1982). Menores evidencias de karstificación registra el sistema N 70-

100 E, cuya importancia relativa resulta patente, sobre todo en las medidas de campo.

En la figura 4 esquematizamos la evolución de las direcciones karstificadas, en relación con la posición del máximo esfuerzo compresivo. El sistema de fracturas N 70-100 E parece haber sido el primero en actuar (Mioceno inferior y medio). Lo hizo con movimientos dextrorsos y según una dirección de σ_1 aproximadamente WNW-ESE. Esta dirección de compresión no se ha mantenido constante hasta la actualidad, sino que se ha alternado con la dirección NNW-SSW. Esta última comienza a predominar a partir del Tortonense y es la responsable de la aparición de los sistemas de fracturas N 130-160 E y N 5-35 E, con movimientos dextrorsos y sinistrorsos, respectivamente.

del tiempo, sino que ha sufrido algunas variaciones de la manera que se indica en la figura 4. Puede esto explicar la presencia de los dos máximos identificados alrededor de la dirección NNE-SSE, de manera que se hayan creado frente a esfuerzos compresivos de orientación parecida, aunque suficientemente diferentes para formar un nuevo sistema, en vez de aprovechar el que ya existía.

Relación entre fracturación y termalismo

Para hacer más completa la relación a escala regional entre la fracturación y los diversos rasgos hidrogeológicos, se discute brevemente la localización de las principales surgencias termales. Esto ya ha

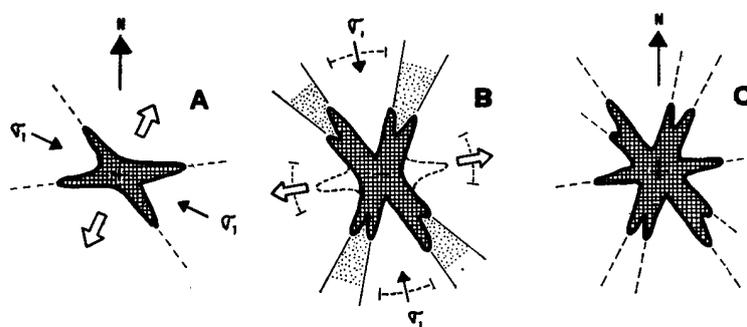


Fig. 4.—Intento de interpretación de las familias predominantes de fracturas deducidas en esta investigación (C), en función de una primera situación de máximo acortamiento cercana a la dirección WNW-ESE (A), posteriormente desplazada hacia la proximidad de la dirección norte-sur, con algunas oscilaciones (B).

De acuerdo con el esquema de la figura 4, es posible que alguna fractura del sistema N 130-160 E existiera previamente como sinistrorsa, en cuyo caso cambiaría de sentido de movimiento frente a la nueva posición de σ_1 . Esta nueva posición, próxima a la norte-sur, ha bloqueado y comprimido en buena medida las fracturas originales del sistema N 70-100 E, de aquí que muestren menos desarrollo en los macizos kársticos estudiados. Además, con una dirección de compresión norte-sur, los sistemas NNE-SSW y NW-SE son más fácilmente movilizables que el N 70-100 E ante los reajustes isostáticos que las Cordilleras Béticas sufren desde al menos el Mioceno superior, con movimientos de diferente magnitud. Es por ello que los citados sistemas tienen, estadísticamente, más posibilidades de encontrarse abiertos que el N 70-100 E y, por tanto, de ser más patentes en los macizos kársticos. Naturalmente las excepciones hay que buscarlas en aquellos sectores próximos a los grandes accidentes N 70-100 E, ya que allí predominan sobre los otros sistemas (caso del Torcal de Antequera).

La dirección de compresión próxima a la norte-sur no se ha mantenido rigurosamente estable a lo largo

sido tratado, en parte, por Cruz San Julián y García-Rossell (1975), a partir del análisis del termalismo en un contexto más amplio (España meridional). Dichos autores señalan la existencia de alineaciones preferenciales en las manifestaciones termales, según la dirección N 60 E y, sobre todo, en la N 30-40 W. En la provincia de Murcia, Rodríguez Estrella (1979b) relaciona los sectores con anomalías geotérmicas (Campo de Cartagena, Zona de Mula) con la existencia de fallas profundas, aunque no indica la dirección de las mismas.

Debido a la variedad litológica de los embalses subterráneos y formaciones atravesadas, existe una notable diversificación hidroquímica relacionada con las aguas termales, que se hace más compleja aún al considerar las peculiaridades de los diferentes sistemas de flujo así como la eventual ocurrencia de otros fenómenos modificadores del quimismo original. Es por ello que una sistematización hidroquímica en función de la localización geológica de las aguas termales puede resultar compleja. Grandá *et al.* (1979a) lo intentan para los macroconstituyentes químicos de las aguas termales de España meridional y aprecian "una distribución de facies en función de la direc-

ción de plegamiento y de la distribución de los grandes conjuntos de las Cordilleras Béticas”.

Como señalan Cruz San Julián y Granda (1979) para el caso de la provincia de Granada, la temperatura de base de las aguas termales no es muy elevada (del orden de 100°C, como máximo), aspecto que relacionan con la influencia de los materiales recientes de relleno de depresiones que limitan los correspondientes sistemas geotérmicos. No descartan tales autores, sin embargo, la existencia de sistemas de mayor energía, ligados en tal caso con accidentes más profundos.

En la figura 1 incluimos la localización de las surgencias o grupos de ellas más significativos dentro del área investigada. En modo alguno dicha representación pretende ser exhaustiva, ya que existen otros muchos puntos que pueden clasificarse como termales de acuerdo con la temperatura media ambiental concreta de los sectores, según los diferentes criterios que existen a ese respecto (Ramos Ontiveros, 1975; Fernández-Rubio, 1975; Cruz San Julián, 1976). En los puntos termales que hemos representado se cumple que la temperatura de surgencia supera los 24°C o, siendo ésta inferior, aquellos cuyo caudal supera los 50 l/s. Los datos de base proceden fundamentalmente de Cruz San Julián *et al.* (1972), Fernández-Rubio *et al.* (1974), Cruz San Julián y García-Rosell (1975), y Cruz San Julián *et al.* (1979).

Es un hecho fácilmente apreciable de dicha figura, que los grandes accidentes aparecen jalonados por este tipo de surgencias, como en el caso del accidente de Cádiz-Alicante (N 70 E). Más patente incluso es la alineación, de dirección aproximada este-oeste, que se extiende desde el norte de Ronda hasta el norte de Almería. A lo largo del borde septentrional de la depresión de Las Alpujarras existen numerosas surgencias (denominadas “fuentes agrias” en la toponimia local) que jalonan dicho accidente; no son estrictamente termales, lo que puede explicarse por mezcla con flujos superficiales fríos, aunque presentan características geoquímicas que revelan igualmente un origen profundo (Albert Beltrán, 1979). En el trabajo de Granda *et al.* (1979b) se discute la estrecha relación que existe entre ciertos microconstituyentes químicos de las aguas termales de España meridional y la temperatura de surgencia; es un aspecto de interés, precisamente para su aplicación en aquellos casos en que un criterio exclusivamente térmico puede no ser suficiente para caracterizar un agua como termal. Al sur del accidente de Las Alpujarras existe otra alineación de surgencias (Carrasco *et al.*, 1981; Benavente y Calvache, 1981; Fernández-Rubio *et al.*, 1982), también de dirección este-oeste, relacionable con una fractura subparalela al borde litoral.

Más que insistir en dichas alineaciones, queremos resaltar la localización de las surgencias de mayor temperatura en la intersección de los principales accidentes. Así los Baños de Zújar (núm. 20) y de

Sierra Alhamilla (núm. 21) están relacionados con la ya citada “falla de Tíscar” (N 150 E), en su intersección con los accidentes de “Cádiz-Alicante” (N 70 E) y de “Las Alpujarras” (E-W). Más hacia el oeste, y en situación similar, se localizan los Baños de Alicún (núm. 22), Graena (núm. 23) y Alhama de Almería (núm. 24).

En el sector central, la dirección N 130-160 E muestra numerosas manifestaciones termales, desde Jaén (Benavente y Pulido, 1979) hasta las inmediaciones de Motril, con una elevada densidad en el sector Valle de Lecrín (núm. 25) - Lanjarón (número 26: López de Azcona y Fernández-Rubio, 1980, Rodríguez Gordillo *et al.*, 1981), correspondiendo éste a la intersección con el accidente de Las Alpujarras.

Estas intersecciones corresponden, además, a la localización de los principales focos sísmicos del área (López Casado y Sanz de Galdeano, en prensa). En determinados casos, la sismicidad reciente ha llegado a modificar el caudal y temperatura e incluso la situación de los puntos de surgencia, como ocurrió en el caso del manantial de Alhama de Granada (número 27), tras el “terremoto de Andalucía” (López Arroyo *et al.*, 1981). Esta importante surgencia termal se localiza en la intersección del contacto zonas Internas-Externas (N 60 E) con el ya citado accidente de Las Alpujarras (E-W) y con otras fracturas N 130-160 E.

Conclusiones

- Del estudio de la fracturación existente en diferentes macizos kársticos de las Cordilleras Béticas, se desprende la presencia de tres sistemas principales: N 130-160 E, N 5-35 E (dividido en dos máximos relativos) y N 70-110 E. Coinciden, en general, y con algunas desviaciones, con las direcciones que muestran los principales accidentes de la cordillera. También condicionan en gran medida numerosos aspectos morfo-genéticos en tales macizos.
- Las fracturas de dirección N 70-100 E, muy importantes en las Cordilleras Béticas, parecen controlar en menor medida que los otros sistemas la karstificación. Esto puede estar en relación con la historia de las fracturas y las direcciones de compresión dominantes desde el Neógeno a la actualidad (WNW-ESE en principio, a casi N-S —con algunas oscilaciones— posteriormente). Existen excepciones, interpretables de acuerdo a la mayor proximidad respecto a los grandes accidentes, en especial los de dirección N 70-100 E.
- La situación de las surgencias termales muestra con claridad su relación con la fracturación

(especialmente la intersección entre los sistemas N 130-160 E y N 70-100 E) y, a su vez, puede ser una fuente de datos acerca de la profundidad que alcanzan las propias fracturas.

Agradecimientos

El trabajo ha sido subvencionado por los proyectos: "Estructuración del conjunto Bético-Rifeño. Origen y relleno de las depresiones del este peninsular", financiado por el C.S.I.C., "Sismicidad y Neotectónica de la Depresión de Granada y de Las Alpujarras" y "Aplicación de los modelos matemáticos al estudio de los acuíferos kársticos", financiados por la C.A.I.C.Y.T.

Bibliografía

- ALBERT BELTRÁN, J. F.
1979. Métodos geoquímicos aplicados a la prospección geotérmica. *Hidrogeol. y Recursos Hidrául.*, 5, 495-510.
- ALMECIA, A.; BURILLO, F. J. y LÓPEZ CABELLO, A.
1983. *Prospección geoeléctrica en el sector de Colomera-Iznalloz*. Trabajo Monogr. Prosp. Geofis. (inédito). Dpto. de Hidrogeología. Univ. de Granada, 63 págs.
- AVIAS, J. y DUBERTRET, L.
1975. Phénomènes karstiques dans les roches non carbonatées. *Hydrogeol. of Karstic Terrains*, 31-40, AIH.
- BACH, J. y ESTALRICH, J.
1980. Relación entre tectónica y formas kársticas. Tres ejemplos concretos. *Actas Espeleológ.*, M-I, 55-68.
- BENAVENTE, J.
1980. Un ejemplo de análisis estadístico de la fracturación en un macizo kárstico. *Tecniterrae*, 37, 51-65.
1981. Caracterización hidrológica del alto río Verde (Granada). *I Simp. Agua Andalucía*, II, 589-598. Granada.
- BENAVENTE, J. y PULIDO BOSCH, A.
1979. Sobre el origen de los manantiales termominerales de Jabalcuz (Jaén). *Hidrogeol. y Recursos Hidráulicos*, 5, 569-588.
- BENAVENTE, J.; FERNÁNDEZ G. DEL ALAMO, R.; FERNÁNDEZ-RUBIO, R. y PULIDO BOSCH, A.
1980. Algunas consideraciones metodológicas para el estudio de la fracturación en acuíferos kársticos. *Actas Espeleológ.*, M-I, 19-54.
- BENAVENTE, J. y CALVACHE, A.
1981. Los manantiales termales de Lobres (Granada) y su entorno hidrogeológico. *I Simp. Agua Andalucía*, II, 599-613, Granada.
- CASTILLO, A.
1981. Estudio de la fracturación del acuífero de La Alfaguara (Alpujarrides septentrionales). *I Simp. Agua Andalucía*, II, 626-642, Granada.
- CARRASCO, A.; CARRASCO, F.; RUIZ-TAGLE, M. y THAUVIN, J. P.
1981. Características hidrogeológicas del acuífero calizodolomítico de la unidad Gádor-Lújar en el sector de Berja-Benihar (Almería) y su relación con las fuentes de Marbella. *I Simp. Agua Andalucía*, I, 249-268, Granada.
- CRUZ SAN JULIÁN, J.
1976. Sobre la temperatura límite del termalismo. *Tecniterrae*, 12, 45-54.
- CRUZ SAN JULIÁN, J. y GARCÍA-ROSSELL, L.
1972. Características hidrogeológicas del sector del Jabalcón (Granada). *Bol. Geol. Min.*, 83, 68-80.
- CRUZ SAN JULIÁN, J.; GARCÍA-ROSSELL, L. y GARRIDO BLASCO, J.
1972. Aguas termales de la provincia de Granada. *Bol. Geol. Min.*, 83, 266-275.
- CRUZ SAN JULIÁN, J. y GARCÍA-ROSSELL, L.
1975. Termalismo en España meridional. *Bol. Geol. Min.*, 86, 179-186.
- CRUZ SAN JULIÁN, J. y GRANDA, J. M.
1979. Temperatura de base de las aguas termales de la provincia de Granada. *Hidrog. y Recursos Hidrául.*, 5, 547-567.
- CRUZ SAN JULIÁN, J.; GARCÍA-ROSSELL, L. y GRANDA, J. M.
1979. Nuevos datos sobre las aguas termales de la provincia de Granada. *Hidrog. y Recursos Hidrául.*, 5, 533-546.
- DELGADO MOYA, S. y FERNÁNDEZ-RUBIO, R.
1975. Morfología kárstica de las sierras de Loja y Alhama (Granada). *Cuad. Geogr. Univ. Granada*. Monog., I, 109-120.
- DÍAZ-HERNÁNDEZ, J. L. y FERNÁNDEZ-RUBIO, R.
1976. Estudio hidrológico-estadístico del Alto río Darro (Granada). *Hidrog. y Recursos Hidrául.*, II, 886-902.
1979. Determinación de la fisuración dominante a partir de los fotogramas aéreos y constatación hidroquímica de la circulación acuífera subterránea a favor de la fracturación principal en un acuífero carbonatado. Cuenca alta del río Darro (Granada). *Tecniterrae*, 25, 34-43.
- DROGUE, C.; MAS, G.; GRILLOT, J. C.; LLORIA, C. y GUERIN, R.
1975. Utilisation du filtrage optique pour l'étude de la fracturation des roches carbonatées en hydrogéologie. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dynam.*, 17, 39-44.
- DROGUE, C. y GRILLOT, J. C.
1976. Structure géologique et premières observations piézométriques à la limite du sous-système karstique de Terrien (Périmètre expérimental). *Ann. Sci. Univ. Besançon*, fasc. 25, 3e série, 195-210.
- DROGUE, C.; GRILLOT, J. C.; GUERIN, R.; PITARD, J.; MAS, G. y LLORIA, C.
1979. *Etude des relations entre structure du milieu et caractères hydrauliques dans les aquifères karstiques*. Coll. "Interactions entre l'eau souterraine et son milieu". C.N.R.S. - U.S.T.L., Montpellier.
- ESTEVEZ, A. y SANZ DE GALDEANO, C.
1983. Neotectonique du secteur central des Chaînes Bétiques. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dynam.*, 24, 23-34.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R.
1975. Identificación de hidrotermalismo y su aplicación

- a la zona meridional de la provincia de Granada. *Tecniterrae*, 7, 38-50.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R. y DELGADO ALMENDROS, J.
1975. Fisuración y karstificación del Torcal de Antequera (Málaga). *Cuad. Geogr. Univ. de Granada*, Mon. I, 93-107, Granada.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R.; DELGADO RODRÍGUEZ, M. y RAMOS, J.
1974. Investigación de aguas minero-medicinales en la provincia de Granada. *Agua*, 82.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R.; ERASO, A.; ORTEGA, M.; ARANA, R. y ROJAS, E.
1975. Estudio de la sierra termal de Las Fumarolas (Montevives, Granada, España). *Ann. Spéléol.*, 30, 287-302.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R.; MARTÍN, J.; VILLALOBOS, J. ZOFIO, E. y PULIDO BOSCH, A.
1981. Análisis de la fracturación y directrices estructurales en el acuífero kárstico del Torcal de Antequera (Málaga). *Simp. Agua Andalucía*, II, 659-673, Granada.
- FERNÁNDEZ-RUBIO, R.; ARANA, R.; PULIDO BOSCH, A.; BENAVENTE, J. y NIETO, M.
1982. Termalismo y mineralogénesis en la ventana tectónica de Albuñol (Granada). *III Semana de Hidrogeol.*, 123-142, Lisboa.
- FOUCAULT, A.
1971. *Etude géologique des environs des sources du Gadaquivir (prov. de Jaén et de Grenade. Espagne méridionale)*. Tesis Univ. París, 633 págs.
- GARCÍA-ROSSELL, L. y PEZZI, M.
1975. Un karst mediterráneo supraforestal en Sierra Mágina (Jaén). Condicionamientos geológicos y geomorfológicos. *Cuad. Geogr. Univ. Granada*, Mon. I, 19-58, Granada.
- GRANDA, A.
1982. Aspectos y métodos geofísicos en el estudio del karst. Aplicaciones hidrogeológicas. *Reun. Monogr. Karst-Larra*, 331-352.
- GRANDA, J. M.; MARTÍN, A. y GARCÍA-ROSSELL, L.
1975a. Estudio geoquímico de aguas termales de España meridional. I. Macroconstituyentes. *Hidrogeol. y Recursos Hidrául.*, 5, 589-612.
1975b. Estudio geoquímico de aguas termales de España meridional. II. Microconstituyentes. *Hidrogeol. y Recursos Hidrául.*, 5, 613-632.
- GRILLOT, J. C.
1979. *Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance*. Thèse Doct. és Sci. U.S.T.L. Montpellier, 212 págs.
- GRILLOT, J. C.; BRION, M.; GUERIN, R. y LESQUER, A.
1975. Essai d'interprétation des sondages électriques pluridirectionnels appliqués au milieu carbonaté fracturé. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dynam.*, 17, 163-170.
- GRILLOT, J. C. y DROGUE, C.
1977. Sur le rôle de la fracturation dans l'organisation de certains phénomènes karstiques souterrains. *Noröis*, 95 bis, 12-21.
- GRILLOT, J. C. y ALMEIDA, C.
1982. Tectonique cassante posthercynienne dans l'Algarve (Sud de Portugal). Incidence sur l'hydrogéologie karstique. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dynam.*, 23, 119-130.
- GRUPE DE RECHERCHE NEOTECTONIQUE DE L'ARC DE GIBRALTAR
1977. L'histoire tectonique récente (Tortonien à Quaternaire) de l'Arc de Gibraltar et des bordures de la mer d'Alboran. *Bull. Soc. Géol. France*, 19, 575-614.
- KIRALY, L.
1969. Statistical analysis of fractures (orientation and density). *Geol. Rundschau*, 59, 125-151.
1975. Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. *Hydrogeol. of Karstic Terrains*, 53-67. A.I.H.
- LHENAFF, R.
1975. Les poljés ouverts de la Sierra de Cabra (Cordillères Bétiques. *Cuad. Geogr. Univ. Granada*, Mon. I, 85-92, Granada.
- LÓPEZ ARROYO, A.; MARTÍN, A. J. y MEZCUA, J.
1981. Terremoto de Andalucía. Influencia en sus efectos de las condiciones del terreno y del tipo de construcción (in "Terremoto de Andalucía de 25 de diciembre de 1884"). 5-94. *Inst. Geograf. Nac.*, Madrid.
- LÓPEZ DE AZCONA, J. M. y FERNÁNDEZ-RUBIO, R.
1980. Consideraciones sobre los manantiales minero-medicinales de Lanjarón. *An. Real. Acad. Farm.*, 46, 251-274.
- LÓPEZ CASADO, C. y SANZ DE GALDEANO, C.
Tectónica, Intensidad máxima y Riesgo sísmico en Granada. *Inst. Geogr. Nac.* (en prensa).
- MARDIA, R. V.
1972. *Statistics of Directional Data*, Academ. Press., Londres.
- NICOD, J.
1983. Nouvelles recherches géomorphologiques sur les karsts méditerranéens. *Karstologia*, 1, 33-38.
- PERNIA, J. M.; GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; SAINT-AUBIN, J.; GÓMEZ PRIETO, J. A.; ROSALES, F.; ESTEVEZ, A.; SANZ DE GALDEANO, C. y UBIAS, A.
1983. Mapa sismotectónico de España 1/100.000. Hoja Piloto de Granada. *IGME*.
- PULIDO BOSCH, A.
1982. Consideraciones hidrogeológicas sobre los yesos de Sorbas (Almería). *Reun. Mon. Karst-Larra*, 257-274, Pamplona.
- RAMOS ONTIVEROS, J. M.
1975. Criterios de clasificación de aguas termales. *Tecniterrae*, 7, 34-36.
- RAZACK, M.
1978. *Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées: numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens*. Thèse Doct. Ing. U.S.T.L., 124 págs., Montpellier.
- RODRÍGUEZ ESTRELLA, T.
1976. El sistema hidrogeológico del Calar del Mundo. *Hidrogeol. y Recursos Hidrául.*, I, 317-338.
1979a. Geología e Hidrogeología del Sector de Alcaraz-Liétor-Yeste (prov. de Albacete). Síntesis geológica de la Zona Prebética. *Mem. Inst. Geol. Min. de España*, 97 (1 y 2), 276 y 290 págs.
1979b. Contribución de la hidrogeología al conocimiento tectónico en el sureste español. *Hidrogeol. y Recursos Hidrául.*, 4, 359-380.

- RODRÍGUEZ GORDILLO, J.; VELLILLA, N. y FERNÁNDEZ-RUBIO, R.
1981. Hidroquímica y termalismo de las aguas de Lánjarón (Granada). *I Simp. Agua Andalucía*, I, 501-518, Granada.
- RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, F.
1977. *La Serranía de Ronda. Estudio geográfico*. Tesis Doct. Univ. Granada. Ed. Conf. Esp. Cajas de Ahorros, 530 págs.
- RODRÍGUEZ VIDAL, J.
1982. El condicionamiento estructural del karst de la sierra Blanca (Marbella, Málaga). *Reun. Mon. Karst-Larra*, 105-115.
- ROMERO, A.
1979. Datos geomorfológicos del río de La Toba. Ausencia de karstificación. *An. Col. Univ. Almería*, 67-90.
- SANZ DE GALDEANO, C.
1980. La neotectónica del norte de la depresión de Granada. *Estudios Geol.*, 36, 255-261.
1983. Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geol.*, 39, 157-165.
- SANZ DE GALDEANO, C.; VIDAL, F. y DE MIGUEL, F.
1982. El sistema de fracturas de dirección N 10-30 E del borde occidental de Sierra Nevada (Cordilleras Béticas). *Estudios geol.*, 38, 393-398.
- SANZ DE GALDEANO, C.; ESTÉVEZ, A.; LÓPEZ-GARRIDO, A. C. y RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, J.
1984. La fracturación tardía al suroeste de Sierra Nevada (terminación occidental del corredor de Las Alpujarras, Zona Bética). *Estudios geol.*, 40, 183-191.
- SANZ DE GALDEANO, C.; FERNÁNDEZ-RUBIO, R. y FERNÁNDEZ-LORCA, S.
1985. Fracturación y fotointerpretación en el sector de Albuñol-La Rábida (Granada). *Bol. Geol. Min. XCVJ-I*: 3-9.
- WATSON, G. S.
1966. The statistics of orientation data. *J. Geol.*, 74, 786-797.

Recibido el 16 de mayo de 1985.
Aceptado el 9 de julio de 1985.