

# PETROGRAFÍA DE LOS DEPÓSITOS ARENOSOS GENERADOS POR EL SONDEO SURGENTE DE GRANÁTULA DE CALATRAVA (CIUDAD REAL): IMPLICACIONES GENÉTICAS DE LA SURGENCIA

M. Ochoa y J. Arribas

*Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, (mochoa@geo.ucm.es).*

**Resumen:** El sondeo surgente de Granátula de Calatrava (activo desde el 25 de julio de 2000 hasta el 16 de enero de 2001) generó un depósito eminentemente arenoso de 36 cm de espesor a 50 m de distancia del pozo. El estudio petrográfico de los materiales arenosos emitidos ha permitido aportar nuevos datos sobre la génesis de la surgencia. El registro arenoso es cuarzolítico con fragmentos de roca sedimentaria (areniscas con cemento ferruginoso y carbonático) y metasedimentaria (metacuarczoarenitas y pizarras), que se interpretan como procedentes de los niveles detríticos de la cuenca neógena de Granátula-Moral de Calatrava. A su vez, estos últimos materiales proceden de la erosión de las series metasedimentarias ordovícicas que constituyen el basamento hercínico local y los bordes de la cuenca sedimentaria. Los primeros depósitos generados por la surgencia se caracterizan por su elevado porcentaje de fragmentos de areniscas con cemento ferruginoso, carbonático y opalino. Estos clastos proceden de niveles ferruginosos generados por paleosurgencias hidrotermales durante el inicio de la actividad volcánica plio-cuaternaria desarrollada en el Campo de Calatrava (Poblete, 1994). La presencia mayoritaria de estos clastos en las capas basales del depósito generado por la surgencia indica que los niveles ferruginosos de los que proceden pudieron actuar como sello de un acuífero confinado, cuya rotura por el sondeo dio lugar a la surgencia.

**Palabras clave:** Petrografía, procedencia, arenas, surgencias, sobrepresión, acuífero confinado, Campo de Calatrava, Granátula.

**Abstract:** The flowing-well of Granátula de Calatrava (active from 25 July 2000 to 16 January 2001) originated a 36 cm-thick sandy deposit far 50 m from the well-site. The petrographic study of the ejected sandy material permits to yield new data about the genesis of the flowing-well. The sandy record is quartzolitic with sedimentary rock fragments (sandstones with ferruginous and carbonate cements) and metasedimentary rock fragments (meta-quartzarenites and slates). The origin of the sand is related to the Tertiary clastic facies from the Neogene Granátula-Moral de Calatrava Basin. The metasediments were provided from the erosion of Ordovician metasedimentary rocks that constitute the local Hercynian basement. The presence of a higher content of sandstone rock fragments with ferruginous, opaline and carbonate cements at the base of the sandy deposit formed as a result of the well indicates that they formed the upper limit of a confined aquifer. These levels were generated by hot paleo-springs during the Pliocene-Quaternary volcanic activity developed in the Campo de Calatrava (Poblete, 1994).

**Key words:** Petrography, provenance, sands, flowing-well, over-pressure, confined aquifer, Campo de Calatrava, Granátula, Spain.

Ochoa, M. y Arribas, J. (2001): Petrografía de los depósitos arenosos generados por el sondeo surgente de Granátula de Calatrava (Ciudad Real): Implicaciones genéticas de la surgencia. *Rev. Soc. Geol. España*, 14 (3-4): 237-245.

Como consecuencia de la realización de un sondeo para la captación de aguas subterráneas, el 25 de julio de 2000 se produjo una surgencia a 7 km al nordeste de la localidad de Granátula de Calatrava (Ciudad Real) (Fig.1), con la emisión de una columna de agua, arena y gas carbónico que llegó a alcanzar hasta 60 m de altura.

El sondeo tiene una profundidad aproximada de 140 m, estando entubados los 120 m superiores. La surgencia fue activa hasta el 16 de enero de 2001, generando durante este período un depósito detrítico en sus proximidades,

formado por materiales emitidos, y consistente en una sucesión de arenas con fracciones de limos y arcillas subordinados. La potencia de dicho depósito llegó a ser de unos 36 cm el 18 de octubre de 2000. El volumen de material sólido emitido se estima entre 40.000 y 50.000 m<sup>3</sup>. La sucesión arenosa presenta una fina laminación debido a la alternancia de colores claros y oscuros ocasionada por variaciones en el contenido de la fracción limo/arcilla. De *visu* no se llegan a apreciar variaciones importantes en cuanto al tamaño medio de los componentes arenosos.

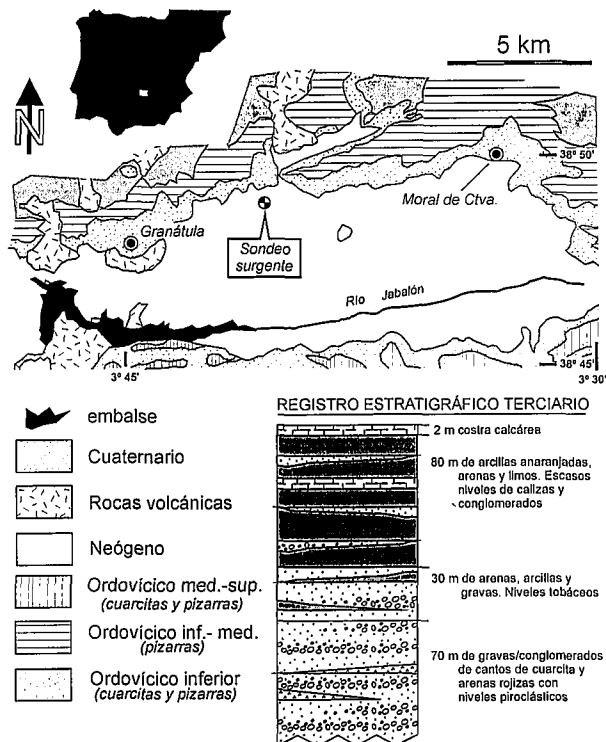


Figura 1.- Esquema geológico de la cuenca de Granátula-Moral de Calatrava, situación del sondeo surgente y esquema del registro estratigráfico terciario (tomado de informe interno de Eptisa).

El sondeo se encuentra ubicado en el borde norte de la cuenca terciaria de Granátula-Moral de Calatrava (Fig. 1) sobre materiales neógenos, estando datada como Plioceno la parte superior de la serie estratigráfica (Gallardo-Millán y Pérez-González, 2000). La distancia de la ubicación del sondeo a los materiales paleozoicos de la Sierra de Granátula es de aproximadamente 1.500 m.

La realización del sondeo se llevó a cabo sin registro de los materiales atravesados, por lo que uno de los objetivos que se proponen en este trabajo es dilucidar si el sondeo llega a afectar al substrato paleozoico. Esta hipótesis implicaría un aporte de gas carbónico «directo» a través de fracturas profundas del zócalo paleozoico. Por el contrario, si el sondeo afecta exclusivamente a materiales del relleno de la cuenca, el origen de la surgencia estaría relacionado con un acuífero cautivo sobrepresionado por el gas carbónico. Esta última hipótesis podría suponer un aporte «indirecto» del mencionado gas, cuyo momento de incorporación al acuífero quedaría indeterminado desde el Plioceno hasta la actualidad.

La cuenca terciaria de Granátula-Moral de Calatrava presenta la particularidad de registrar una importante potencia de sedimentos (próxima a 200 m; Eptisa, 2001), mientras que la potencia de registro sedimentario en el resto de cuencas terciarias del Campo de Calatrava no llega a superar los 140 m (Portero *et al.*, 1988; Ramírez, 1988; Ramírez *et al.*, 1988). Por otra parte, han sido citados materiales mesozoicos (facies Buntsandstein) formando parte del substrato de otras cuencas terciarias próximas (nordeste de Bolaños de Calatrava, Ramírez *et al.*, 1988; y al norte de Valdepe-

ñas, Ramírez, 1988). La mayor potencia del relleno sedimentario en esta cuenca, junto con la presencia de materiales mesozoicos en zonas relativamente próximas, hace que no se llegue a descartar *a priori* la presencia de dichos materiales en el substrato de la cuenca Granátula-Moral de Calatrava.

El origen del CO<sub>2</sub> que acompaña a la surgencia se relaciona con la actividad volcánica de Campo de Calatrava. La formación de hervideros de gas carbónico está acompañada de cuerpos mineralizados estratiformes (costras ferruginosas y de Mn-(Co)) de varios cientos de metros de extensión (Crespo *et al.*, 1995). Estas mineralizaciones se relacionan con importantes accidentes extensionales de zócalo que permiten el ascenso de fluidos hidrotermales, manifestándose desde el inicio de la actividad volcánica pliocena (Crespo *et al.*, 1995).

El análisis petrográfico de las modas detríticas ha sido utilizado clásicamente como una poderosa herramienta en el estudio de la procedencia de depósitos clásticos en muy variados ambientes de sedimentación (p.ej., Pettijohn *et al.*, 1973; Zuffa, 1985; Johnsson y Basu, 1993). El objetivo de este estudio es la caracterización petrográfica del depósito arenoso generado por el pozo surgente con el fin de identificar los niveles de procedencia del subsuelo y, en consecuencia, aportar nuevos datos que permitan esclarecer la génesis de la citada surgencia. El hecho de que el sondeo se encuentre entubado los primeros 120 m permite asumir que el material analizado procede de los niveles inferiores a dicha cota.

El gran interés suscitado por este fenómeno puntual y el esclarecimiento de su origen hicieron que la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha encargara un estudio geológico e hidrogeológico a la empresa Eptisa que fue coordinado por J.L. Barrera. El presente trabajo forma parte de los resultados del mencionado estudio.

## Marco geológico

La cuenca neógena de Granátula-Moral de Calatrava se encuentra situada en el sureste de la provincia de Ciudad Real, dentro de la comarca del Campo de Calatrava. Geológicamente se localiza en las estribaciones surestes de la zona Centroibérica del Macizo Hespérico, en tránsito con las llanuras manchegas y los relieves mesozoicos más meridionales de la Cordillera Ibérica.

La cuenca de Granátula-Moral de Calatrava tiene una orientación general este - oeste y unas dimensiones aproximadas de 160 km<sup>2</sup>. La cuenca se extiende sobre el flanco norte de un sinclinatorio de materiales ordovícicos, estando limitada por los relieves de la Cuarcita Armoricana al norte (Ordovícico Inferior) y por los de las pizarras y metareniscas del Ordovícico medio-superior al sur (Fig. 1).

El relleno de las cuencas neógenas de la región de Campo de Calatrava se caracteriza por presentar una gran variedad litológica de materiales de origen fluvial y lacustre organizados en una sucesión general de de-

Profundidad (cm)	0-1	1-2	2-3,5	3,5-6	6-9,5	9,5-12	12-17	17-20	20-27	27-36
Fracción (2-4mm)	-	-	S-3.1	-	S-5.1	-	S-7.1	S-8.1	S-9.1	S-12.1
Fracción (0,062-2mm)	S-1	S-2	S-3.2	S-4	S-5.2	S-6	S-7.2	S-8.2	S-9.2	S-12.2

Tabla I.- Situación de las muestras en la vertical del depósito y fracciones de tamaño analizadas.

pósitos detríticos gruesos en la base (conglomerados y areniscas), con intercalaciones de lutitas que pasan hacia el techo a margas y calizas lacustres (Molina, 1975; Portero *et al.*, 1988). Los niveles de conglomerados y areniscas de la base de la secuencia se encuentran muy frecuentemente cementados por óxidos e hidróxidos de hierro. La actividad volcánica plio-cuaternaria queda evidenciada por la presencia de niveles piroclásticos y volcanosedimentarios intercalados (e.g. Portero *et al.*, 1988; Ramírez *et al.*, 1988).

Los datos bibliográficos sobre el relleno de la cuenca de Granátula-Moral de Calatrava son muy escasos (Poblete, 1994; Gallardo-Millán y Pérez-González, 2000) debido fundamentalmente a la escasez de afloramientos. El registro terciario se estima en unos 200 m, deducidos mediante sondeos eléctricos. En la zona son muy frecuentes los sondeos realizados para la captación de aguas subterráneas; sin embargo, la información sobre las unidades litológicas afectadas es de muy escasa calidad. La recopilación de estos datos ha permitido reconstruir una sucesión estratigráfica aproximada del relleno de la cuenca (Eptisa, 2001), que consiste, de muro a techo (Fig. 1), en los siguientes tramos: (a) 70 m de conglomerados arcillosos de cantos de cuarcita y arenas rojizas con intercalaciones de niveles piroclásticos; (b) 30 m de arenas y arcillas rojizas con niveles de conglomerados de cantos de cuarcita, con algunas intercalaciones tobáceas de lapilli; (c) 80 m de arcillas anaranjadas y rojizas, arenas y limos con algún nivel de calizas (maares?) y escasos niveles de conglomerados; (d) 2 m costra calcárea (caliche) y niveles piroclásticos. Gallardo-Millán y Pérez-González (2000) han datado, mediante magnetoestratigrafía, la parte alta (nivel a 30m del techo) de la sucesión en 3,3 Ma.

## Metodología

La sección de depósito analizada se encuentra a 50 m de la surgencia, lugar donde presenta su máximo espesor, unos 36 cm. Se ha seleccionado un total de 10 muestras recogidas de los distintos niveles del depósito detrítico, localizadas a distintos intervalos de profundidad con respecto a la superficie topográfica del depósito final (Tabla I).

Las muestras fueron tamizadas con agua en un tamiz de 0,062 mm de abertura con el fin de eliminar la fracción aleurítica y arcillosa. La fracción superior a 0,062 mm así obtenida se lavó con una solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 10% durante 30 minutos para la eliminación de residuos orgánicos. Una vez secas, se procedió a la separación por tamizado de la fracción superior a 2 mm (2-4 mm) en aquellas muestras que presentaban mayor contenido en dicha fracción (Tabla I). Las 10 fraccio-

nes arenosas (0,062 - 2 mm) y las 6 de tamaño superior a 2 mm fueron cementadas artificialmente con resina epoxídica, para posteriormente realizar las correspondientes láminas delgadas. Para facilitar la identificación mineralógica, las láminas se sometieron a tinciones selectivas de feldespatos potásico (solución de cobaltinitrito sódico; Chayes, 1952) y de carbonato (alizarina roja S; Lindholm y Finkelman, 1972).

El análisis petrográfico se ha llevado a cabo mediante las técnicas convencionales de contaje, consistentes en la contabilización de aproximadamente 300 puntos por lámina, siguiendo el criterio ambivalente de Zuffa (1985). El uso de este criterio permite, a partir de un único contaje, la utilización de diagramas composicionales basados en el método «tradicional» (Pettijohn *et al.*, 1973) o en el método Gazzi - Dickinson (Gazzi, 1966; Dickinson, 1970). La diferencia fundamental entre ambos métodos estriba en el concepto de fragmento de roca. Según el método tradicional, todos los agregados poliminerales son fragmentos de roca (incluyendo los fragmentos de roca carbonática), independientemente del tamaño de los cristales que los componen. Sin embargo, por el método Gazzi - Dickinson, los cristales constitutivos de fragmentos de roca faneríticos, de tamaño superior a 0,062 mm son contabilizados como granos simples, al ser considerados potenciales constituyentes monocristalinos de arenas de menor tamaño de grano. En la Tabla II figuran las diferentes tipos, clases y parámetros petrográficos considerados y en la Tabla III los datos relativos al contaje y los valores recalculados de los parámetros utilizados.

## Tipología de los granos detríticos

Se ha considerado un total de 23 tipos petrográficos de clastos (Tabla II), que a su vez han sido reagrupados en 6 grupos principales, cuyas características se detallan a continuación.

### Cuarzo (Q)

Representa la población dominante, estando constituida por granos con gran variedad de tamaños e índices de redondez (entre angulosos y redondeados, Fig. 2A). La tipología dominante es la monocristalina con extinción ondulante (Q<sub>mo</sub>), si bien son también frecuentes los granos monocristalinos con extinción no ondulante (Q<sub>mr</sub>) y policristalinos de dos y tres unidades cristalinas (Q<sub>p2-3</sub>) y más de tres unidades cristalinas (Q<sub>p>3</sub>) (Fig. 2A). Estos últimos pueden presentar una orientación preferente de sus unidades cristalinas (metacuarcitas - Mtq en Tabla II). A menudo, los granos de cuarzo presentan inclusiones de minerales den-

	Q	Qmr	Cuarzo monocristalino con extinción no ondulante (<5°)	Granos monominerales de cuarzo
		Qmo	Cuarzo monocristalino con extinción ondulante (>5°)	
		Qp2-3	Cuarzo policristalino con 2 o 3 unidades cristallinas	
		Qp>3	Cuarzo policristalino con más de 3 unidades cristallinas	
		Mtq	Metacuarcita	
Rms	Rms1	Qas	Cuarzo en metarenisca silícea	Fragmentos faneríticos de roca metasedimentaria
		[Q]as	Cemento de cuarzo en metarenisca silícea	
	Rms2	Qai	Cuarzo en metarenisca ílítica	
		[I]ai	Cemento de cuarzo en metarenisca ílítica	
Rs	Rsc	Qac	Cuarzo en arenisca calcárea	Fragmentos faneríticos de roca sedimentaria
		[C]ac	Cemento de carbonato en arenisca calcárea	
		Sp	Granos carbonáticos esparílicos	
	Rs1	Qaf	Cuarzo en arenisca ferruginosa	
		[F]af	Cemento ferruginoso en arenisca ferruginosa	
	L	Ch	Chert	Fragmentos afaníticos de roca metasedimentaria
		Lm	Pizarra - Esquistos	
	M	Ms	Moscovita	Micas
		Bl	Biotita	
	D	Zr	Circón	Minerales densos
		Ru	Rutilo	
		Tu	Turmalina	
		An	Anatasa	
		Op	Opacos	

Tabla II.- Tipos y clases petrográficas de clastos.

tos (opacos, apatito, turmalina, rutilo, etc.). Frecuentemente, los granos de cuarzo aparecen con restos de cementos heredados (sintaxiales, -Fig. 2B, o ferruginosos) o matriz (íltica - Fig. 2E) en sus bordes y que permiten caracterizar la roca de la que proceden.

El origen de estos clastos se relaciona con las formaciones siliciclásticas arenosas de la serie paleozoica, si bien gran parte de ellos muestran restos de pastas (cementos ferruginoso y carbonático) típicamente observados en depósitos más recientes (terciarios), lo que acredita su paso intermedio por estos últimos depósitos, descartando una procedencia directa de estos clastos a partir de las series paleozoicas.

#### Fragmentos faneríticos de roca metasedimentaria (Rms)

Están representados por fragmentos de metareniscas, de composición cuarzoarenítica, presentando un esqueleto generalmente foliado y muy compactado, con evidencias de haber sufrido procesos de presión-disolución. Texturalmente se caracterizan por presentar índices de redondez relativamente elevados (Fig. 2C y D). Se han distinguido dos tipos de metareniscas en función del material que traba al esqueleto: (1) Metareniscas con cemento de cuarzo (Qas y [Q]as, en Tabla II y III) y (2) metareniscas con matriz íltica (Qai y [I]ai, en Tabla II y III). En las primeras, el cemento sintaxial de cuarzo ocupa el espacio intergranular de la arenisca, encontrándose muy frecuentemente deformado (extinción ondulante) (Figs. 2C y D). La ílita de la matriz de la segunda tipología de metareniscas aparece muy recristalizada y con texturas de corrosión hacia los granos de cuarzo del esqueleto (Fig. 2F). Su crecimiento se realiza según direcciones preferentes marcando la foliación de la roca original. En ambos tipos de metareniscas, los granos de cuarzo son eminentemente monocristalinos con extinción ondulante y con elevados índices de redondez.

La procedencia de estos fragmentos de roca metasedimentaria puede relacionarse claramente con las formaciones cuarcíticas paleozoicas. No obstante, el elevado grado de redondez que presentan estos fragmen-

tos implica que han sufrido un transporte considerable. Por lo tanto, debe asumirse su reciclado en formaciones detríticas posteriores (probablemente terciarias), pudiéndose desechar un origen directo a partir del substrato paleozoico.

#### Fragmentos faneríticos de roca sedimentaria (Rs)

Se han distinguido dos tipos de clastos, correspondientes a areniscas muy angulosas con cemento calcáreo (Qac y [C]ac, en Tabla II y III) y con cemento ferruginoso (Qaf y [F]af, en Tabla II y III). Ambos tipos presentan un esqueleto cuarzoarenítico escasamente compactado, con valores altos de volumen intergranular. El cemento carbonático (dolomita ferrosa y siderita) forma mosaicos muy sucios, debido a la presencia de abundantes inclusiones. Los carbonatos corroen intensamente a los granos de cuarzo del esqueleto (Fig. 3E). Las texturas que en ocasiones presentan los cementos carbonáticos indican que podrían deberse a procesos de reemplazamiento (dolomitización) de una matriz micrítica precursora. Ocasionalmente aparecen fragmentos de carbonato (dolomita ferrosa y siderita) mono y policristalinos (Sp en Tabla II y III) que, por su similitud, pueden asociarse al material cementante de los niveles arenosos descritos anteriormente. Asimismo se incluye en esta clase los rellenos de venas carbonáticas en fragmentos de areniscas. El cemento ferruginoso aparece con texturas peliculares muy bandeadas, en ocasiones asociado a rellenos opalinos, produciendo morfologías de relleno botroidal, que ocluyen frecuentemente la totalidad del volumen intergranular de la arenisca (Fig. 3C). Estos fragmentos se concentran en las fracciones de tamaño de grano superior a 2 mm, siendo frecuente la inclusión en los mismos de clastos de metareniscas equivalentes a los descritos en el grupo petrográfico anterior (Rms). En las fracciones de tamaño grueso son también abundantes los fragmentos con morfologías acanaladas y circulares probablemente asociadas a estructuras de pedotúbulos edáficos (Fig. 3D), muy semejantes a las descritas por otros autores (Fig. 9 en Crespo y Lunar, 1997).

El carácter escasamente compactado de la fábrica de estos componentes indica que han sufrido una diagénesis de escaso enterramiento, por lo que se asocian a niveles detríticos del relleno terciario de la cuenca de Granátula-Moral de Calatrava.

#### Fragmentos afaníticos de rocas metasedimentarias (L)

Se incluyen los granos de *chert* (Ch), muy frecuentemente foliados y con inclusiones de ílita (Fig. 3B), y los fragmentos de pizarras ílticas (Lm, Fig. 3A). Estos últimos aparecen como granos muy redondeados y foliados. Acompañando a la ílita se observan con frecuencia, en estos fragmentos, granos de cuarzo aleurítico, micas y opacos. Las características texturales y composicionales de estos componentes indican un origen relacionado con materiales pelíticos de origen sedimentario, ligeramente me-

	S-1		S-2		S-3.1		S-3.2		S-4		S-5.1		S-5.2		S-6		S-7.1		S-7.2		S-8.1		S-8.2		S-9.1		S-9.2		S-12.1		S-12.2	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Q	51	16,1	44	14,3	11	3,5	11	3,7	5	1,7	5	1,6	21	6,6	1	0,3	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	1,0	0	0,0	0	0,0
Qmr	164	51,9	139	44,6	41	13,2	185	61,5	179	59,3	34	11,1	222	70,9	220	70,5	9	2,9	182	57,2	4	1,3	230	75,2	1	0,3	186	62,0	5	1,7	101	33,7
Qp2-3	40	12,7	7	2,3	4	1,3	19	6,3	17	5,6	8	2,6	18	5,8	14	4,5	0	0,0	17	5,3	1	0,3	9	2,9	10	3,3	14	4,7	1	0,3	27	9,0
Qp>3	17	5,4	11	3,6	92	29,6	29	9,6	18	6,0	88	28,8	17	5,4	18	5,8	10	3,3	26	8,2	65	21,0	9	2,9	0	0,0	18	6,0	23	7,7	29	9,7
Miq	2	0,6	3	1,0	75	24,8	2	0,7	1	0,3	4	1,3	2	0,6	1	0,3	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	0,7	1	0,3
Rms	0	0,0	0	0,0	10	3,2	0	0,0	1	0,3	35	11,4	2	0,6	1	0,3	16	5,2	7	2,2	6	1,9	1	0,3	36	11,9	1	0,3	0	0,0	7	2,3
[Q]as	0	0,0	0	0,0	2	0,6	10	3,3	18	6,0	0	0,0	15	4,8	4	1,3	1	0,3	7	2,2	0	0,0	6	2,0	0	0,0	5	1,7	0	0,0	5	1,7
[Q]ai	10	3,2	5	1,6	24	7,7	10	3,3	6	2,0	31	10,1	6	1,9	4	1,3	17	5,6	8	2,5	8	2,6	10	3,3	8	2,6	17	5,7	9	3,0	21	7,0
[I]ai	13	4,1	25	8,1	32	10,3	25	8,3	43	14,2	26	8,5	16	5,1	28	9,0	10	3,3	23	7,2	22	7,1	26	8,5	31	10,2	29	9,7	18	6,0	12	4,0
Rs	0	0,0	0	0,0	16	5,1	1	0,3	0	0,0	6	2,0	0	0,0	0	0,0	22	7,2	5	1,6	23	7,4	2	0,7	41	13,5	9	3,0	16	5,3	38	12,7
[C]ac	0	0,0	0	0,0	6	1,9	4	1,3	1	0,3	10	3,3	4	1,3	32	10,5	20	6,3	33	10,6	7	2,3	37	12,2	10	3,3	22	7,3	31	10,3	0	0,0
Sp	6	1,9	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Qaf	4	1,3	0	0,0	29	9,3	1	0,3	3	1,0	23	7,5	0	0,0	4	1,3	68	22,2	2	0,6	55	17,7	3	1,0	59	19,5	0	0,0	69	23,0	12	4,0
[F]af	4	1,3	6	1,9	24	7,7	1	0,3	4	1,3	21	6,9	1	0,3	8	2,6	112	36,6	7	2,2	87	28,1	2	0,7	67	22,1	6	2,0	129	43,0	9	3,0
L	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	0,7	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Ch	0	0,0	0	0,0	3	1,0	0	0,0	2	0,7	11	3,6	1	0,3	5	1,6	5	1,6	8	2,5	4	1,3	1	0,3	5	1,7	0	0,0	1	0,3	0	0,0
Lm	2	0,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
M	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	0,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	2	0,7	0	0,0	1	0,3	0	0,0
Bi	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
D	3	0,9	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	2	0,6	2	0,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3
Zr	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Ru	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Tu	0	0,0	4	1,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	4	1,3	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
An	0	0,0	2	0,6	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3	0	0,0	0	0,0
Op	0	0,0	1	0,3	2	0,6	2	0,7	1	0,3	1	0,3	0	0,0	0	0,0	3	1,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	1,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3
TOTAL	316	100,0	308	100,0	311	100,0	307	100,0	302	100,0	306	100,0	313	100,0	312	100,0	306	100,0	318	100,0	310	100,0	306	100,0	303	100,0	300	100,0	300	100,0	300	100,0
Q	87,5		88,0		52,8		82,6		74,0		48,0		85,3		81,4		6,6		72,2		22,7		81,0		4,7		72,9		10,4		53,0	
F	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
R	12,5		12,0		47,2		17,4		26,0		54,0		14,7		18,6		93,4		27,9		77,3		19,0		95,3		27,1		89,6		47,0	
Qmr	18,8		16,9		7,4		4,5		2,3		3,7		0,8		0,4		0,0		0,4		0,0		0,0		21,4		0,0		0,0		0,0	
Qmo	60,3		76,2		27,7		75,8		81,7		25,2		85,7		87,0		47,4		80,5		5,7		92,7		7,1		85,3		17,2		64,3	
Qp	21,0		6,9		64,9		19,7		16,0		71,1		13,5		12,6		52,6		19,0		94,3		7,3		71,4		14,7		82,8		35,7	
Q	88,1		88,0		53,3		82,6		74,3		47,8		85,6		82,7		6,7		74,1		23,0		81,3		4,8		73,9		10,5		53,9	
Rs	4,5		2,0		24,5		2,3		2,7		20,6		1,6		5,2		78,5		11,1		65,1		4,6		69,6		8,5		80,3		30,7	
Rms	7,4		10,0		22,2		15,1		23,0		31,6		12,8		12,1		14,8		14,8		11,8		14,1		25,6		17,6		9,2		15,4	
Q	95,1		97,8		68,5		97,2		96,5		69,8		98,1		94,1		7,9		86,9		26,1		94,7									
Rsc	2,1		0,0		9,2		2,0		0,4		8,0		1,5		1,5		21,3		9,6		20,9		3,4									
Rsf	2,8		2,2		22,3		0,8		3,0		22,1		0,4		4,4		70,9		3,5		53,0		1,9									
Lm	8,0		0,0		4,2		0,0		2,9		10,7		2,5		11,9		10,2		15,1		10,0		2,3									
Rms1	0,0		0,0		16,9		22,2		27,1		34,0		42,5		11,9		34,7		26,4		15,0		15,9									
Rms2	92,0		100,0		79,9		77,8		70,0		55,9		55,0		76,2		55,1		58,5		75,0		81,8									

Tabla III.- Datos petrográficos del conteaje de puntos y valores de parámetros utilizados.

tamorizados, por lo que se asimilan a las series paleozoicas. El grado de redondez de estos componentes indica su reciclado en los depósitos epiclásticos del relleno terciario.

Micas (M)

Son escasas como clastos monominerales, asociándose sobre todo a fragmentos de metareniscas ilitizadas (Rms2 - fragmentos faneríticos de rocas metasedimentarias). Los clastos monominerales son fundamentalmente de moscovita y biotita subordinada.

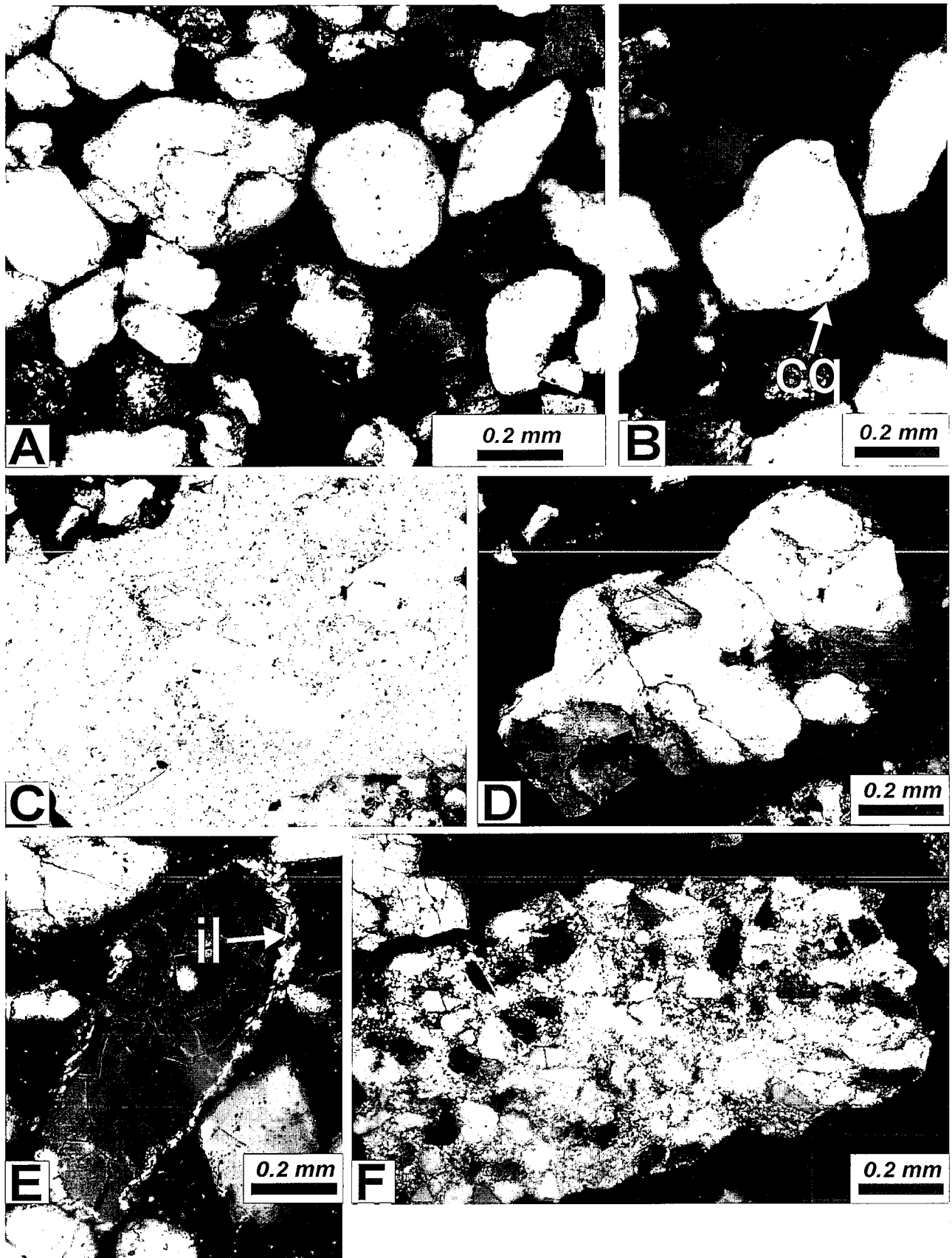
Minerales densos (D)

Son relativamente frecuentes (máximo contenido: 2%), habiéndose identificado: (1) Circones (Zr) como granos muy redondeados equidimensionales y alargados; (2) Rutilo (Ru) en granos rojizos con morfologías irregulares y redondeados; (3) Turmalina (Tu) en granos muy bien redondeados en sus variedades verde y, más ocasionalmente, azul; (4) Anatasa (An) formando granos y agregados semiopacos. La elevada redondez de estos granos, así como la asociación dominada por especies muy estables, sugiere que proceden de depósitos sedimentarios muy maduros, y en concreto de las formaciones de metareniscas paleozoicas. Además, son abundantes los granos opacos (Op) constituidos por óxidos de hierro y sulfuros (piritas framboidales).

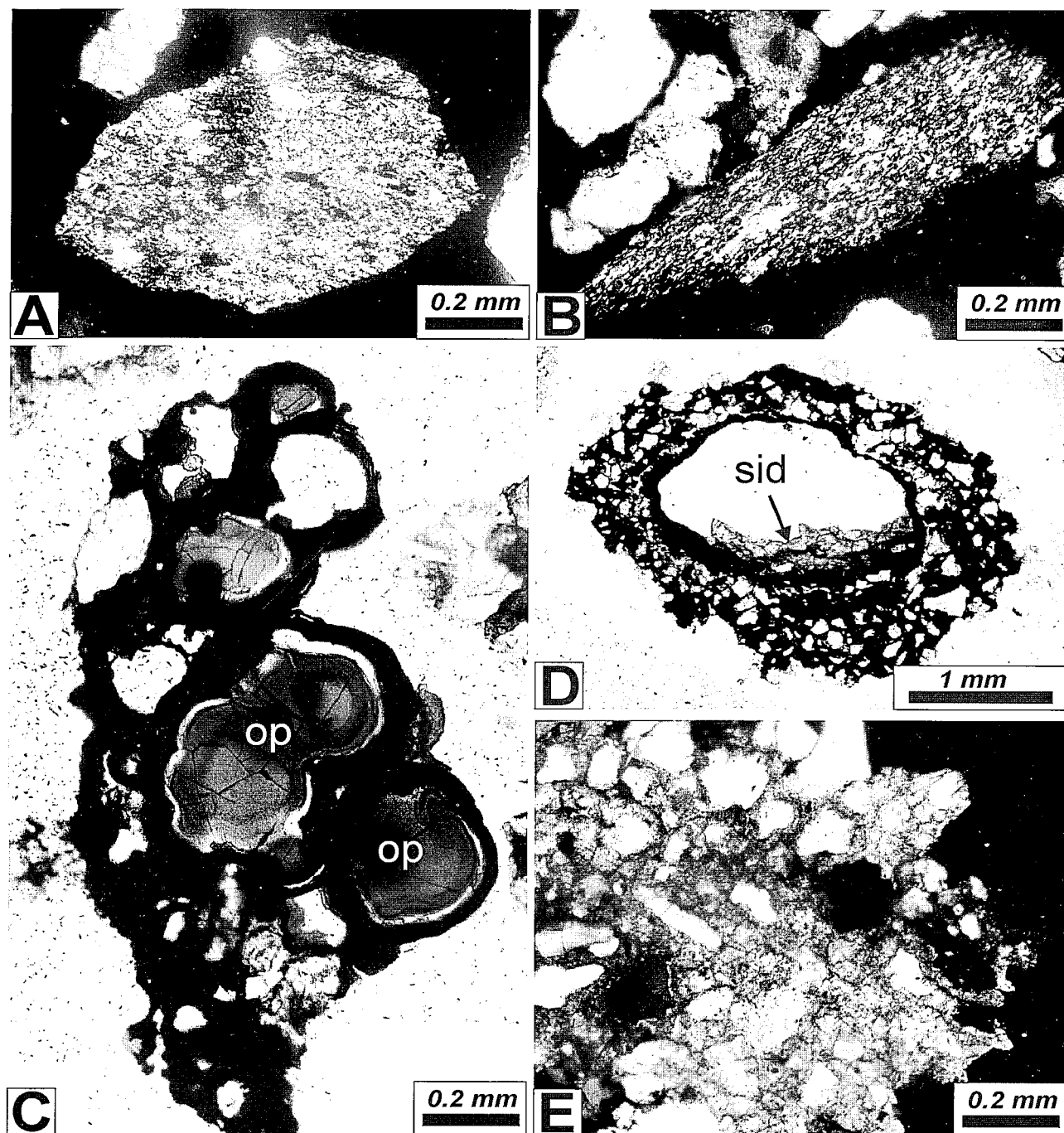
Composición modal de los depósitos detríticos

El carácter cuarzolítico de estos depósitos queda evidenciado en el diagrama QFR con la proyección de las muestras en el lado QR del diagrama (Fig. 4A). La influencia del tamaño de los clastos sobre la composición del depósito se manifiesta en el contenido en fragmentos de roca superior al 47% (QFR%R) en las fracciones más gruesas (>2mm), mientras que la fracción arenosa (0,062 - 2mm) se caracteriza por su naturaleza cuarzosa, con contenidos superiores al 53% en granos de cuarzo (QFR%Q). En los niveles inferiores del depósito causado por la surgencia (numeración más alta de las muestras) se observa, tanto en la fracción gruesa como en la arenosa, un mayor contenido en líticos (vértices R, Rs, Rsc, Rsf y Rms en Fig. 4A, C y D).

La tipología dominante de los cuarzos es la monocristalina con extinción ondulante (Qmo) en la fracción arenosa, mientras que los granos policristalinos (Qp) predominan en la fracción superior a 2 mm (Fig. 4B). En ambas fracciones el contenido en la tipología monocristalina con extinción no ondulante (Qmr) no llega a superar el 25% de la población de cuarzo (QmrQmoQp%Qmr, Fig. 4



**Figura 2.-** A: Cuarzos monocristalinos (Qm) y policristalinos (Qp) con elevados índices de redondez. Muestra S-4. Nícoles cruzados. B: Grano de cuarzo monocristalino (Qm) con cemento syntaxial heredado (cq). Obsérvese el elevado grado de redondez del grano original. Muestra S-2. Nícoles cruzados. C y D: Fragmento fanerítico de roca metasedimentaria (Rms), correspondiente a una metarenisca con cemento syntaxial de cuarzo. Muestra S-8.1. Nícoles paralelos y cruzados. E: Grano de cuarzo monocristalino con restos de matriz íltica (il) en sus bordes. Muestra S-3.2. Nícoles cruzados. F: Fragmento fanerítico de roca metasedimentaria (Rms), correspondiente a una metarenisca con matriz íltica recrystalizada. Muestra S-3.1. Nícoles cruzados.

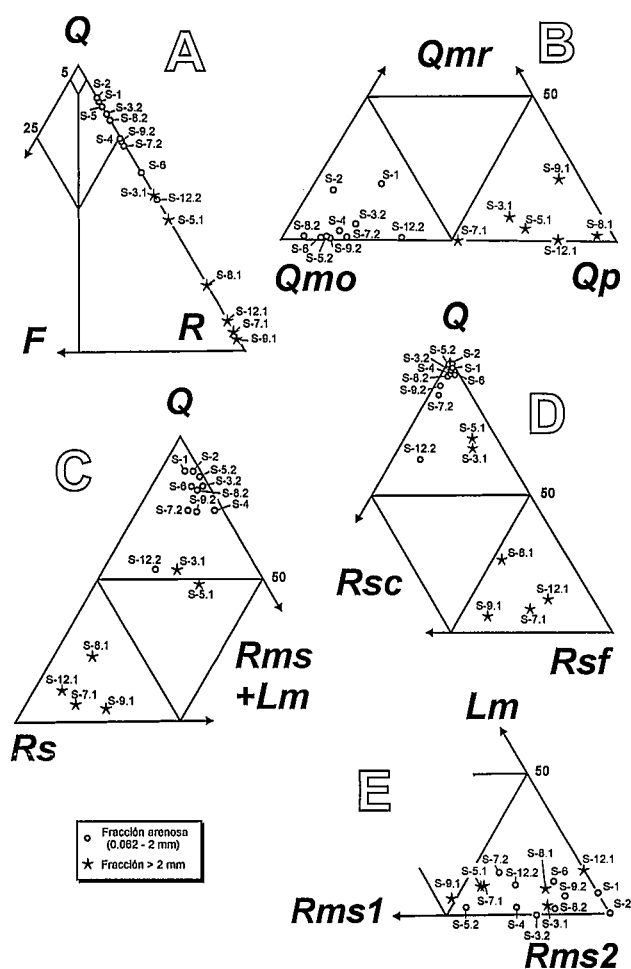


**Figura 3.-** A: Fragmento de pizarra ílítica (Lm) con elevado índice de redondez. Muestra S-3.1. Nícoles cruzados. B: Grano foliado de chert (Ch) con inclusiones de illita. Muestra S-7.2. Nícoles cruzados. C: Arenisca con cemento ferruginoso (Rsf) y rellenos bandeados opalinos (op). Muestra S-12.1. Nícoles paralelos. D: Cavity en arenisca ferruginosa (Rsf) parcialmente cementada por siderita (sid) y cemento ferruginoso pelicular. Muestra S-12.1. Nícoles paralelos. E: Arenisca con cemento calcáreo (Rsc) con bordes muy irregulares. Muestra S-12.1. Nícoles cruzados.

Por lo que se refiere a la población de fragmentos de roca, los fragmentos de areniscas (Rs) con cemento ferruginoso y carbonático son los mejor representados en las fracciones gruesas (>2 mm), con porcentajes que alcanzan el 80% del depósito ( $QRsRms\%Rs$ , Fig. 4C). Los niveles inferiores del depósito acumulado por la surgencia (muestras S-12.1 a S-7.1) son los que poseen un mayor contenido en estos componentes, especialmente en fragmentos de areniscas con cemento ferruginoso (Rsf) (Fig. 4D). En estos niveles basales, los frag-

mentos de areniscas cementadas por carbonato aparecen en todas las fracciones en porcentajes más o menos constantes entre 8 - 35% ( $QRscRsf\%Rsc$ , Fig. 4D), mientras que su contenido en los niveles superiores de la secuencia analizada (muestras S-6 a S-1) no llega a superar el 2% ( $QRscRsf\%Rsc$ ) en las fracciones arenosas, y el 10% ( $QRscRsf\%Rsc$ ) en las fracciones de tamaño más grueso (muestras S-3.1 y S-5.1 en Fig. 4D).

Por último, los fragmentos metasedimentarios aparecen en porcentajes inferiores al 30% ( $QRsRms\%Rms$ ,



**Figura 4.-** Composición de los depósitos arenosos emitidos por el sondeo surgente de Granátula de Calatrava. A: Diagrama composicional QFR (cuarzo - feldespato - fragmentos de roca) de Pettijohn *et al.* (1973). B: Tipologías de granos de cuarzo, diagrama QmrQmoQp (Cuarzo monocristalino con extinción recta - Cuarzo monocristalino con extinción ondulante - Cuarzo policristalino). C: Tipologías de fragmentos de roca totales, diagrama QRsRms+Lm (Cuarzo - Fragmentos faneríticos de roca sedimentaria - Fragmentos de roca metasedimentaria (faneríticos - Rms - y afaníticos - Lm -)). D: Tipología de fragmentos de roca sedimentarios, diagrama QRscRsf (Cuarzo - Fragmentos faneríticos de roca sedimentaria con cemento carbonático - Fragmentos faneríticos de roca sedimentaria con cemento ferruginoso). E: Tipología de fragmentos de roca metasedimentarios, diagrama LmRms1Rms2 (Fragmentos afaníticos de roca metasedimentaria - Fragmentos faneríticos de roca metasedimentaria con cemento de cuarzo - Fragmentos faneríticos de roca metasedimentaria con matriz ílítica)

Fig. 4C). De la totalidad de esta población, los fragmentos de metareniscas con matriz ílítica son los dominantes, con porcentajes superiores al 50% (LmRms1Rms2%Rms2, Fig. 4E).

### Discusión y conclusiones

La composición del registro arenoso generado por la emisión del sondeo surgente de Granátula de Calatrava es eminentemente cuarzolítica (litoarenítica) con ausencia de componentes feldespáticos.

El origen de los granos de cuarzo se asocia a la serie sedimentaria terciaria de la cuenca de Granátula-Moral

de Calatrava, que a su vez se nutrió de la serie metasedimentaria siliciclástica paleozoica. Su relación con las unidades paleozoicas queda evidenciada por la fuerte extinción ondulante y los restos de matriz o cemento sintaxial que presentan los granos detríticos. El paso intermedio de estos clastos por las series epiclásticas terciarias es también evidente, ya que se presentan muy frecuentemente con restos de cementos ferruginosos y carbonáticos en sus bordes.

Los fragmentos de roca presentes en estos depósitos son de origen sedimentario (Rs) y metasedimentario (Rms). Los fragmentos de roca de origen sedimentario (areniscas con cemento carbonático y ferruginoso) se interpretan como procedentes de los niveles detríticos terciarios de la propia cuenca de Granátula-Moral de Calatrava. Esta asignación se establece por presentar evidencias de haber sufrido una diagénesis con escasa compactación (elevado volumen intergranular). Los fragmentos de roca metasedimentaria (pizarras y metaareniscas con cemento de cuarzo y matriz ílítica) corresponden a fragmentos de la serie paleozoica que fueron incorporados a los depósitos detríticos terciarios. Esta procedencia ligada a los materiales terciarios queda patente, al igual que con los granos de cuarzo, por el elevado grado de redondez de los fragmentos paleozoicos y su inclusión en fragmentos de areniscas terciarias con cemento carbonático o ferruginoso.

Ni en la fracción ligera ni en la pesada de las muestras analizadas se ha observado componente alguno que pudiera asociarse a un origen volcánico claro. La fracción pesada está representada por una asociación de minerales densos muy estables (circón, turmalina, rutilo, anatasa) con grados de redondez elevados, por lo que su origen se relaciona con los depósitos de la serie paleozoica siliciclástica reciclada en los depósitos terciarios. Tampoco se han encontrado componentes que puedan asociarse a formaciones estratigráficas de un posible substrato mesozoico de la cuenca. Así, teniendo en cuenta las litologías típicas de estas formaciones en los afloramientos próximos a Manzanares - La Solana (Yébenes *et al.*, 1977; Ramírez *et al.*, 1988), puede asumirse que la ausencia total de componentes dolomicrofíticos, yesíferos o feldespáticos confirma la ausencia de niveles jurásicos y/o triásicos en el subsuelo de la cuenca. Por todo ello, los únicos materiales que fueron afectados por el sondeo surgente corresponden a los distintos niveles del relleno terciario de la cuenca de Granátula-Moral de Calatrava. En consecuencia, el origen de la surgencia estaría relacionada con un acuífero confinado existente dentro del relleno sedimentario de la propia cuenca terciaria, probablemente sobrepresionado.

Existen ligeros cambios composicionales en la vertical del depósito clástico analizado, consistentes en un mayor contenido en fragmentos de arenisca con cemento ferruginoso y carbonático (este último en menor proporción) en los primeros niveles generados por la surgencia (muestras S-12.1 a S-7.1). Los depósitos más tardíos reflejan una composición más monótona, con dominio de clastos de cuarzo monocristalino. Este hecho sugiere que los niveles

de arenisca con cemento ferruginoso podrían representar el límite superior del acuífero confinado que, una vez perforado por el sondeo, provocaría la surgencia, generando unos primeros depósitos muy ricos en fragmentos procedentes de este nivel.

Se constata la presencia en el subsuelo de la cuenca de niveles de areniscas ferruginosas con texturas vadosas y morfologías edáficas (Fig. 3 D), cementos y rellenos de ópalo (Fig. 3C) y carbonatos ferrosos y magnésicos (dolomita ferrosa y siderita) (Fig. 3E). Estos niveles podrían relacionarse con paleosurgencias hidrotermales durante la sedimentación terciaria (paleo-hervideros), similares a los aflorantes actualmente en la provincia de Ciudad Real (Crespo *et al.*, 1995; Crespo y Lunar, 1997; Poblete, 1994). Esta interpretación facilitaría la explicación del origen hidrotermal del CO<sub>2</sub> asociado con la fracturación profunda del zócalo que ocasionó la formación de hervideros durante el relleno terciario. Posteriormente, los propios depósitos de los paleo-hervideros funcionaron como niveles de sello para la acumulación de CO<sub>2</sub> en el acuífero confinado.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Consejería de Obras Públicas de la Comunidad de Castilla La Mancha el permiso para publicar los datos obtenidos. También se agradece a Eptisa, y en particular a D. José Luis Barrera por la información y sugerencias proporcionadas en la realización de este trabajo. Asimismo, se agradecen los comentarios realizados por J.P. Calvo sobre el manuscrito final, así como los comentarios y críticas sobre un primer manuscrito efectuados por M. Pozo y otro revisor anónimo.

### Referencias

- Chayes, F. (1952): Notes on the staining of potash feldspar with sodium cobaltinitrite in thin section. *American Mineralogy*, 37: 337-340.
- Crespo, A.; Lunar, R.; Oyarzun, R. y Doblas, M. (1995): Unusual case of hot springs-related Co-rich Mn mineralization in central Spain: The Pliocene Calatrava deposits. *Economic Geology*, 90: 433-437.
- Crespo, A. y Lunar, R. (1997): Terrestrial hot-spring Co-rich Mn mineralization in the Pliocene-Quaternary Calatrava Region (central Spain). En: *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits* (K. Nicholson, J.R. Hein, B. Bühn y S. Dasgupta, Eds.), Geological Society Special Publication, 119: 253-264.
- Dickinson, W.R. (1970): Interpreting detrital modes of grauwacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40: 695-707.
- Eptisa (2001): *Estudio de caracterización geológica e hidrogeológica del área afectante al sondeo surgente de Granátula de Calatrava (Ciudad Real)*. En: Informe para la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Tomo I, 293 pp.
- Gallardo-Millán, J.L. y Pérez-González, A. (2000): Magnetoestratigrafía del relleno neógeno en las cuencas del Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Geotemas*, 1 (1): 101-104.
- Gazzi, P. (1966): Le arenarie del flysch sopracretaceo dell'Appennino modenese; correlazioni con il flysch Monghidoro. *Mineralogia et Petrographia Acta*, 12: 69-97.
- Johnsson, M.J. y Basu, A. (1993): Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. *Geological Society America Special Paper*, 284, 342p.
- Lindholm, R.C. y Finkelman, R.B. (1972): Calcite staining; semiquantitative determination of ferrous iron. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42: 239-245.
- Molina, E. (1975): Estudio del Terciario superior y Cuaternario del Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Trabajos sobre Neógeno - Cuaternario*, 3: 1-106.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R. (1973): *Sand and Sandstones*. Springer-Verlag, New York, 618 p.
- Poblete, M.A. (1994): *El relieve volcánico del campo de Calatrava (Ciudad Real)*. Tesis Doctoral, Univ. de Oviedo, 467p.
- Portero, J.M., Ancochea, E., Gallardo, J. y Pérez-González, A. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 784 (Ciudad Real)*. IGME, Madrid.
- Ramírez, J.I. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 786 (Manzanares)*. IGME, Madrid.
- Ramírez, J.I., Ancochea, E. y Pérez-González, A. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 785 (Almagro)*. IGME, Madrid.
- Yébenes, A., Marfil, R., Soriano, J., de la Peña, J.A. y Díaz-Molina, M. (1977): El Triásico de Alcázar de San Juan (Región de La Mancha). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 4: 495-507.
- Zuffa, G.G. (1985): Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results. En: *Provenance of arenites* (G.G. Zuffa, Ed.). *NATO-ASI Series*, 148: 165-189.

Manuscrito recibido el 31 de mayo de 2001  
Aceptado el manuscrito revisado el 17 de diciembre de 2001