

Actividad paleo-hidrotermal episódica en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español): nuevas edades K-Ar y correlación tectónica con la Cordillera Ibérica

Episodic palaeo-hydrothermal activity in the Sierra de Guadarrama (Spanish Central System): new K-Ar ages and tectonic correlation with the Iberian chain

Carmen Galindo Francisco ⁽¹⁾, Cesar Casquet Martín ⁽¹⁾ y Fernando Tornos ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias Geológicas, Inst. Geología Económica (UCM-CSIC). Avda. José Antonio Novais 2, 28040, Madrid. cgalindo@geo.ucm.es y casquet@geo.ucm.es

⁽²⁾ Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. f.tornos@igme.es

ABSTRACT

Episodic hydrothermal alterations in the Sierra de Guadarrama took place between ca. 300 Ma and 10 Ma. New K-Ar ages for hydrothermal minerals have been obtained that along with previous data allow to better constrain the late- to post-Variscan history of tectono-hydrothermal activity. This activity can further be correlated with Alpine tectonic events in central Iberia recorded in Permian to Cainozoic sedimentary basins. Dating of hydrothermal events in the basement is thus a useful tool to better constrain the chronology of tectono-sedimentary events in the cover.

Key words: K-Ar dating, hydrothermal alterations, Sierra de Guadarrama, Variscan basement, Alpine-cycle.

Geogaceta, 48 (2010), 159-162
ISSN: 0213-683X

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010

Fecha de revisión: 21 de abril de 2010

Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010

Introducción

La Sierra del Guadarrama, que es parte del basamento pre-Alpino ibérico, ha sido escenario de episodios recurrentes de actividad hidrotermal a lo largo de los últimos 300 Ma, que han dado lugar a una notable variedad de tipos de alteraciones: greisenes, episenitas, skarns, alteraciones de tipo sericita-clorita, alteraciones aluníticas, filones diversos (F-Ba ± (Pb+Zn), Ag, cuarzo, etc.) (e.g., Tornos *et al.*, 2000). La mayoría de estas alteraciones y filones muestra un fuerte control estructural, que se pone de manifiesto por las orientaciones preferentes de las mismas y su relación, en muchos casos, con sistemas de fracturas nuevas o reactivadas (González Casado *et al.*, 1993; 1996). Los episodios de alteración hidrotermal constituyen por lo tanto, un registro muy completo de la historia tectónica tardi- y post-varisca.

En este trabajo se presentan nuevas dataciones K-Ar realizadas en minerales neoformados de diversas alteraciones hidrotermales de la Sierra del Guadarrama: anfíbol, moscovita, sericita, alunita, illita, así como de algunos minerales anteriores (p.ej biotita), en la roca caja

de las alteraciones, rejuvenecidos isotópicamente, ampliando así el catálogo de edades existentes. La historia hidrotermal de la Sierra de Guadarrama se puede correlacionar con la historia tectónica post-varisca de la cercana Cordillera Ibérica, bien conocida gracias a la existencia de un registro sedimentario que abarca desde el Pérmico al Cuaternario (Salas y Casas, 1993; Salas *et al.*, 2001; Sánchez-Moya y Sopena, 2004). La datación de los eventos hidrotermales puede contribuir así a mejorar la comprensión de la evolución tectono-sedimentaria post-varisca del centro peninsular

Metodología

Veinticuatro muestras se dataron mediante K-Ar. Las determinaciones isotópicas de Ar se realizaron por dilución isotópica con un «Spike» de ³⁸Ar en un Espectrómetro de Masas VG MICROMASS 603 del CAI de Geocronología y Geoquímica Isotópica de la UCM. Las constantes utilizadas en este trabajo para el cálculo de la edad son: $\lambda_a = 5.81 \cdot 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_b = 4.962 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, $^{40}\text{K} = 0.01167\%$, $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar} = 5.349206$ y $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar} = 1.5809524 \cdot 10^3$ (Steiger &

Jaeger, 1977). El potasio se determinó en un fotómetro de llama tipo Eppendorf. El error estimado con las muestras *standard* es de 2% respecto al valor certificado. Los resultados se muestran en la tabla I. Las edades abarcan desde los 293 ± 5.6 Ma a los 13 ± 2.5 Ma y representan, en cada caso, la edad probable de la alteración, resultado del enfriamiento geológicamente rápido en los sistemas hidrotermales.

Discusión

La figura 1 es un diagrama de probabilidad acumulada de edades con sus respectivos errores (density probability plot), obtenido mediante el programa ISOPLOT (Ludwig, 2003). Los límites cronoestratigráficos corresponden a la escala de la IUGS (2009). La base de datos empleada para la construcción de la figura incluye, además de las nuevas edades aportadas en este trabajo, edades K-Ar ya publicadas (n=26) (Caballero *et al.*, 1992; Tornos *et al.*, 1995; Lozano *et al.*, 1998 y Lozano, 2003). La tabla II recoge, a su vez, algunas edades significativas de rocas ígneas y de alteraciones y filones, obtenidas con diversos métodos, que complementan a las anteriores y permiten

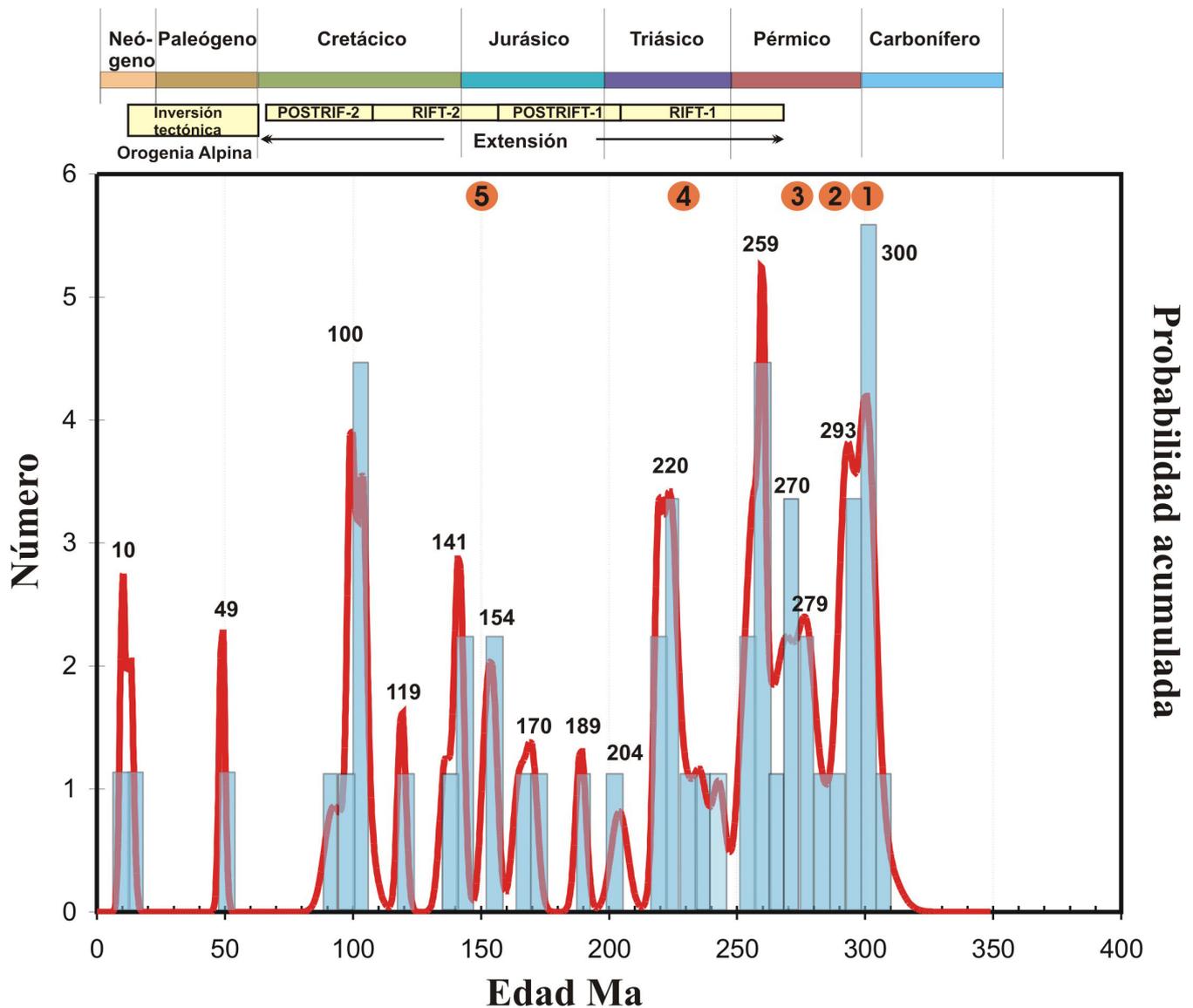


Fig. 1.- Diagrama de probabilidad acumulada de edades K-Ar en las alteraciones hidrotermales de la Sierra de Guadarrama. Los círculos numerados se refieren a las edades de la tabla II.

Fig. 1.- Cumulative probability plot of K-Ar ages of hidrothermal alterations in the Sierra de Guadarrama. Numbered circles refer to ages in Table II.

encuadrar mejor la historia tectono-hidrotermal registrada en la Sierra del Guadarrama. Finalmente se indican en la figura 1 la ubicación temporal de los estadios tectónicos de subsidencia tectónica (RIFT-1 y RIFT-2) y sus correspondientes estadios de post-rift (subsidencia térmica) reconocidos en el dominio de la Cordillera Ibérica (Salas y Casas, 1993; Sánchez-Moya y Sopena, 2004).

La figura 1 muestra que la actividad hidrotermal ha sido episódica desde ca. 300 Ma hasta los ca. 10 Ma. Se observa una disminución a lo largo del tiempo de las alteraciones registradas. La profundidad (y antigüedad) se relaciona con el grado de exhumación cenozoica de los diver-

sos bloques del basamento que forman la Sierra de Guadarrama: a mayor exhumación alteraciones más antiguas y más profundas (p.ej., greisenes) frente a las más jóvenes y someras (p.ej. filones de cuarzo y alteraciones aluniticas). Como cada episodio hidrotermal representa un evento discreto de fracturación, la figura 1 representa la historia tectónica tardi- y post-varisca del centro de la placa Ibérica.

Los periodos tectono-hidrotermales más significativos son:

Alteraciones tardi-variscas:

Los picos a ca. 300 Ma (principal) y a 293 Ma (secundario) corresponden

principalmente a alteraciones de tipo greisen (Sn-W), a menudo en fracturas con desplazamiento horizontal, y filones de W-(Sn-Mo), así como a alguna mineralización de As-(Ag) (Mina San Francisco y Mina Mónica; Tablas I, II). La actividad hidrotermal coincide dentro del error con un magmatismo representado por enjambres de diques E-W y pequeños stocks- de pórfidos granitoides (296±3 Ma; Tabla II) y de diques de microdioritas, así como con el vulcanismo andesítico de Atienza (291 ± 12 Ma; Tabla II) El contexto tectónico en este periodo, considerado tradicionalmente como «tardi-varisco», vendría determinado por la ubicación

MUESTRA	material	% K	⁴⁰ Ar _{rag} ml/gr	% ⁴⁰ Ar _{atm}	Edad Ma	error	localización y descripción
SE-7	sericita	5.19	2.5954	74.6	13	2.5	Colmenar de Arroyo. Mina San Eusebio (Ba-F) (Madrid). Alteración en granito de la salbanda
AS-11	sericita	5.26	10.1244	52.9	49	2.2	Navas del Rey. Mina La Asturiana (F-Ba) (Madrid). Alteración en granito de la salbanda.
AV-5	alunita	3.59	13.1085	90.73	92	6.7	La Colilla (Availa). Alteración blanca en dique de pórfido granítico (+ ópalo)
AV-3	alunita	1.39	5.5002	94.52	99	2.4	Monsalape (Ávila). Cerro Cuesta Moreira. Alunita en conglomerado
H-3	illita+caol.	2.79	11.5150	81.15	103	7.4	Honrubia de la Cuesta (Segovia). Alteración sobre pegmatita
MH-2	mica+smect+clor	3.54	14.8309	13.4	104	2.9	Navalagamella (Madrid). Mina de Horcajo (Ba-F). Arcilla en falla
MF	sericita (<2 μm)	8.62	47.3373	36.6	136	4.4	Garganta de los Montes (Madrid). Mina Fernando (Cu).
OS-160	sericita (<2 μm)	5.89	39.5675	44.53	165	5.0	Otero de Herreros (Segovia). Mina Cerro Almadenes (Cu, Zn, W, Sn, Ag). Alteración en granito
C-60	mica+clor (<2 μm)	4.07	28.2342	14.5	170	4.4	Otero de Herreros (Segovia). Crta. A Vegas de Matute. Falla normal en granito
D5	biotita	6.857	53.2517	1.1	189	4.0	Cabeza Lijar (Madrid). Mina s.n. (W). Granito a 0.5m del filón.
MH-1	sericita	6.95	583.242	63.75	204	6.5	Navalagamella. Mina Horcajo (Ba-F). Alteración en granito de la salbanda
CD-37	biotita-clorita	3.13	28.3268	31.14	219	3.0	Rascafría-El Paular (Madrid). Carro del Diablo. Alteración en granito junto a skarn.
LOZ-1	sericita	6.03	55.7356	12.33	224	4.9	Lozoyuela (Madrid). Alteración en granito asociada a venillas de cuarzo (+ carbonato)
OS-163	mica+clor (<2 μm)	6.54	68.8241	13.82	252	5.2	Otero de Herreros (Segovia). Mina Cerro Almadenes (Cu, Zn, W, Sn, Ag). Brecha hidráulica
JM-156	sericita	7.11	76.0642	6.4	256	5.1	Otero de Herreros (Segovia). Alteración en granito
40	anfíbol	1.87	19.6459	1.1	260	6.5	Vegas de Matute (Segovia). Skarn de El Caloco
CD-51	biotita-clorita	0.997	10.8262	48.37	260	2.0	Rascafría-El Paular (Madrid). Carro del Diablo. Alteración en granito junto a skarn.
AV-1	illita+Q (<2 μm)	4.91	55.4464	75.08	270	11.6	Cardenosa (Avila). Alteración en granodiorita
J83b	anfíbol	0.91	10.2426	2.9	270	7.1	Manzanares el Real (Madrid). Epispinita en granito de La Pedriza
S-44	anfíbol	0.48	5.4319	54.6	270	15.9	Rascafría-El Paular (Madrid). Carro del Diablo. Skarn (Sn, W).
CD-51	moscovita	8.21	95.6457	10.32	277	7.0	Rascafría-El Paular (Madrid). Carro del Diablo. Alteración en granito junto a skarn.
CD-37	moscovita	8.43	100.2215	16.99	283	8.0	Rascafría-El Paular (Madrid). Carro del Diablo. Alteración en granito junto a skarn.
C52	moscovita	8.03	99.2305	6.7	293	5.5	Otero de Herreros (Segovia). Greisen junto filón de cuarzo (+W)
HORC-1	sericita	7.97	98.6007	8.1	293	5.6	Horcajuelo de la Sierra (Madrid). Mina S. Francisco (Ag+Apy). Alteración en gneis

Tabla. I.- Nuevas edades K-Ar en minerales de las alteraciones hidrotermales de la Sierra de Guadarrama.

Tabla I.- New K-Ar ages for hidrothermal minerals from the Sierra de Guadarrama.

de Iberia en una mega-cizalla dextral entre África y Europa con la deformación intra-placa distribuida entre desgarrres y fracturas extensionales (González-Casado *et al.*, 1996). Este primer evento hidrotermal pre-Alpino es a su vez consecutivo al plutonismo más voluminoso en el Guadarrama (ca. 300-306 Ma; Tabla II) de carácter extensional (Casquet *et al.*, 1988), durante el cual hubo alguna actividad hidrotermal en forma de pequeños skarns de W-Sn (Tornos *et al.*, 2000).

Alteraciones Alpinas:

Los episodios tectono-hidrotermales atribuibles al ciclo alpino se relacionan claramente con las etapas tectónicas reconocidas en el ámbito de la Cordillera Ibérica (Fig. 1), con periodos con mayor registro hidrotermal coincidentes con los estadios de rift y otros de menor registro correspondientes a los periodos de post-rift y de inversión tectónica.

Estadio RIFT-1. Este periodo abarca desde el inicio del Wordiense (268 Ma) al final del Noriense (203.6 Ma) (Sánchez-Moya & Sopena, 2004). Hay cuatro picos en la figura 1, correlacionables con el Estadio RIFT-1: 1) 270-278 Ma (Artinskiense-Kunguriense; Pérmico). Corresponde a diversas alteraciones: Las epispinitas (Caballero *et al.*, 1993; Caballero, 1992) son las más significativas. Esta alteración, muy frecuente en la Sierra de Guadarrama sobre granitos y gneises, se produjo en un contexto tectónico extensional acompañado por una anomalía térmica regional. Se interpretó como el ini-

cio del ciclo Alpino (González-Casado *et al.*, 1996), que sería así un poco anterior a la edad propuesta por Sánchez-Moya y Sopena (2004). 2) ca. 259 Ma (Wuchiapingiense; Pérmico). Este pico está muy definido y representado por diversas alteraciones (p.ej., tipo skarn, tipo clorítico-sericítico); 3) 245 Ma (Triásico Inferior). Un pequeño pico pero significativo, al coincidir con la edad de un enjambre de diques monzoníticos (Galindo *et al.*, 1994a). 4) 220-224 Ma (Carniense; Triásico). Representado por la alteración filítica.

Estadio Post-RIFT-1. Este periodo abarca hasta el Oxfordiense terminal (ca. 155 Ma). Se caracteriza por el escaso registro hidrotermal (véase la Fig. 1), como corresponde a un periodo dominado por la subsidencia térmica. Las alteraciones registradas son de tipo filítico (sericita - clorita) principalmente.

Estadio RIFT-2. Abarca hasta el Albiense medio (c. 105 Ma). La actividad tectónica vuelve a manifestarse en el basamento donde se reconocen al menos tres eventos de actividad hidrotermal: 1) Filones de F-Ba (-Pb-Zn) datados por Sm-Nd (ca. 145 Ma; Tabla II); 2) alteración filítica (sericita - clorita) en salbandas de filones de cuarzo estéril y reactivaciones de alteraciones anteriores, 3) Formación de microclina en las cavidades con alteración cálcica en el plutón de La Cabrera (Lozano *et al.*, 2004).

Estadio Post-RIFT-2 Se prolonga hasta el inicio de la inversión tectónica

y comienzo de la orogénesis Alpina (Pirenaica) hacia los 65 Ma. Se reconoce un único pico de alteraciones a unos 100 Ma representado por: 1) Alteración filítica (sericita-clorita) ligada a filones de cuarzo, relacionada con fallas de salto horizontal de dirección NE-SW tardías. 2) Alteración ácida con alunita (92-99 Ma) cuyo origen ha sido motivo de discusión: hidrotermal de acuerdo con Ubanell *et al.* (1978) vs. edáfica, según Molina *et al.* (1989). Su asociación a ópalo en diques a favor de fracturas nos inclina hacia la hipótesis hidrotermal. Esta edad, también está representada en la Cuenca de Cameros por un metamorfismo hidrotermal de bajo grado ligado a una estructura compresiva (Casquet *et al.*, 1992). Aunque de significado incierto podría correlacionarse con el inicio del Estadio Post-RIFT-II en la Ibérica. El resto del periodo se caracteriza por la ausencia de registro hidrotermal en el basamento.

Inversión tectónica alpina. Hasta el Mioceno Medio (ca. 23 Ma). Sorprende la ausencia de registro hidrotermal durante este periodo compresivo: sólo una edad de ca. 49 Ma de una alteración sericítica. Esta edad coincide, dentro del rango de error, con la obtenida por Trazas de Fisión en apatitos (Sell *et al.* 1995), y representa un levantamiento importante de la Sierra del Guadarrama en este estadio, que se puede correlacionar, a su vez, con una importante ruptura sedimentaria en las cuencas del Duero, Tajo y Loranca que Díaz Molina (1978) sitúa en el Rhenaniense.

	#	método	edad Ma	autores
Granito de La Cabrera	1	U-Pb	302±2	Casquet et al, 2004
Gabros de Talavera, La Solanilla y Navahermosa	1	U-Pb	300-305	Villaseca et al, 2009
Granito de Ledrada	1	U-Pb SIMS	306.8±1.9	Zeck et al. 2007
Granito de Colmenar	1	U-Pb SIMS	306.5±1.5	Zeck et al. 2007
Metagabronorita de Navahermosa	1	U-Pb SIMS	305.6±1.4	Zeck et al. 2007
Diques de pórfido E-O en Guadarrama	2	Rb-Sr	296±3	Galindo et al 1994a
Andesitas de Atienza	2	K-Ar	291±12	Hernando et al, 1980
Venas de As-(Ag). Mina Mónica (Bustarviejo)	2	Ar-Ar	286±4	Martín Crespo et al, 2004
Diques monzoníticos de dirección NE-SO	3	K-Ar	245±7	Galindo et al, 1994a
Episenitas	4	Rb-Sr	274±6	Caballero et al, 1993
Filonos F-Ba-(Pb-Zn)	5	Sm-Nd	145±18	Galindo et al, 1994b

localización en la Fig. 1

Tabla II.- Edades significativas por diversos métodos, de episodios ígneos e hidrotermales, que complementan la base de datos K-A. Los números (#) se refieren a los círculos numerados en la figura 1.

Table. II.- Significant ages from different methods, of igneous and hidrothermal episodes, that complement the K-Ar data. The numbers (#) refer to numbered circles in figure 1.

Tectónica reciente. Se reconoce un pico hacia los 10 Ma (Tortonense) en diversas manifestaciones hidrotermales: 1) formación de apofilita en cavidades miarolíticas de La Cabrera (Lozano et al, 2004), 2) alteraciones sericíticas que coincide con un evento de calentamiento registrado mediante Trazas de Fisión de los apatitos (Sell *et al.*, 1995). Este episodio se corresponde con la fase tectónica compresiva Guadarrama (Capote et al, 1990) y se correlaciona con rupturas sedimentarias neógenas en cuencas aledañas al Sistema Central (Calvo et al, 1994).

Conclusiones

La actividad hidrotermal tardía a post-varisca en la Sierra de Guadarrama tiene carácter episódico y abarca, al menos, desde el final del Carbonífero hasta el Mioceno. Esta actividad se puede correlacionar con las etapas tectónicas reconocidas en el ámbito de la Cordillera Ibérica. La densidad del registro parece ser mayor en las épocas de subsidencia tectónica aunque sin duda existe un sesgo a favor de las alteraciones más antiguas relacionado probablemente con la magnitud de la exhumación cenozoica de los bloques de basamento.

Agradecimientos

Al colega fallecido J.M. González Casado por su contribución a la interpretación estructural de las alteraciones. La financiación procedió de los proyectos PB88-0124 (MEC) y PB96-0575 (MCYT). Agradecemos a M. Lago, F. Velasco y a F.M. Alonso sus constructivos comentarios.

Referencias

- Caballero, J.M., Casquet, C., Galindo, C., González Casado, J.M., Pankhurst, R.J. y Tornos, F. (1993). *Geogaceta*, 13, 16-18.
- Caballero, J.M., Casquet, C., Galindo, C., González-Casado, J.M., Snelling, N. y Tornos, F. (1992). *Geogaceta*, 11, 18-21.
- Calvo, J.P., Daams, R., Morales, J., López-Martínez, N., Agustí, J., Anadón, P., Armenteros, I., Cabrera, L., Civis, J., Corrochano, A., Díaz Molina, M., Elizaga, E., Hoyos, M., Martín Suarez, E., Martínez, J., Moissenet, E., Muñoz, A., Pérez González, A., Portero, J., Robles, F., Santisteban, C., Torres, T., Van der Meulen, A.J., Vera, J.A. y OEIN, P. (1994). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6, 29-40.
- Capote, R., González Casado, J.M. y De Vicente, G. (1990). *Geogaceta*, 7, 20-22.
- Casquet, C., Montero, P., Galindo, C., Bea, F. y Lozano, R. (2004). *Geogaceta*, 35, 71-74.
- Casquet, C., Fuster, J.M., González-Casado, J.M., Peinado, M. y Villaseca, C. (1988). Proceedings of the Fifth Workshop on the EGT, 65-76.
- Casquet, C., Galindo, C., González Casado, J.M., Alondo, A., Mas, R., Rodas, M., García, E. y Barrenechea, J.F. (1992). *Geogaceta*, 11, 22-25.
- Díaz Molina, M. (1978). *Bioestratigrafía y paleogeografía del Terciario al E. de la sierra de Altomira (Cuenca)* Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid, 370 p.
- Galindo, C., Tornos, F., Darbyshire, D.P.F. y Casquet, C. (1994b). *Chemical Geology*, 112, 351-364.
- Galindo, C., Casquet, C. y Huertas, M.J. (1994a). *Geogaceta*, 16, 23-26.
- González-Casado, J.M., Casquet, C., Caballero, J.M., Galindo, C., Quílez, E. y Tornos, F. (1993). *Geogaceta*, 13, 53-56.
- González-Casado, J.M., Casquet, C., Caballero, J.M., Galindo, C., y Tornos, F. (1996). *Tectonophysics*, 262, 213-229.
- Hernando, S., Schott, J.J., Thuizat, R., Montigny, R. (1980). *Sciences Géologiques Bulletin*, 33, 119-128.
- IUGS (2009). *Internacional Stratigraphic Chart*.
- Lozano, R.P., Galindo, C. y Casquet, C. (1998). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 21ª, 134-136.
- Lozano, R.P. (2003). *Petrología de los rellenos cálcicos hidrotermales de las cavidades miarolíticas del plutón de La Cabrera (Madrid)*. Tesis Doctoral Univ. Complutense de Madrid, 373 p.
- Lozano, R.P., Casquet, C., Galindo, C. y González Laguna, R. (2004). *Geogaceta*, 6, 185-188.
- Ludwig, K.R. (2003). *A user's manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication*, 4, 70 p.
- Martín Crespo, T., Vindel, E., López-García, J.A. y Cardellach, E. (2004). *Ore Geology Review*, 25, 199-219.
- Molina, E., Vicente, M.A., Cantano, M. y Martín Serrano, A. (1989). *Studia Geologica Salamantiensa*, 5, 177-186.
- Salas, R. y Casas, A. (1993). *Tectonophysics*, 228, 33-55.
- Salas, R., Guimerà, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A. y Alonso, A. (2001). En: P.A. Ziegler, W. Cavazza, A.F.H. Robertson y S. Crasquin-Soleau (Eds.), *Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle*, 186, 145-185.
- Sanchez Moya, Y. y Sopena, A. (2004). En: *Geología de España* (Vera, J.A., Ed.). 484-522.
- Sell, I., Poupeau, G., Casquet, C., Galindo, C. y González Casado, J.M. (1995). *Geogaceta*, 18, 23-26.
- Steiger, R.H. y Jaeger, E. (1977). *Earth Planet. Sc. Lett.*, 36, 359-362.
- Tornos, F., Casquet, C., Galindo, C. y Caballero, J.M. (1995). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 18, 99-110.
- Tornos, F., Delgado, A., Casquet, C. y Galindo, C. (2000). *Mineralium Deposita*, 35, 551-569.
- Ubanell, A.G., Garzón, G., de la Peña, J.A., Bustillo, A. y Marfil, R. (1978). *Estudios Geológicos*, 34, 151-160.
- Villaseca, C., Orejana, D., Armstrong, R.A., Pérez-Soba, C. y Merino, E. (2009). *Geochemica Cosmochimica Acta*, 73, nº 13S, A1385.
- Zeck, H. P., Wingate, M. T. D. y Pooley, G. (2007). *Geological Magazine*. 144, 157-177.