

Caracterización de los fluidos en sucesivas fases de fracturación en las Cadenas Costero Catalanas y su registro en los filones de Ba-F de baja temperatura

Fluid characterization in successive faulting episodes in the Catalan Coastal Ranges and their record in the Ba-F low temperature veins

A. Canals (*) y E. Cardellach (**)

(*) Dpto. de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. C/ Martí i Franqués s/n. 08028 Barcelona.
 (**) Dpto. de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Barcelona. 08193 Bellaterra.

ABSTRACT

In the F-Pb-Zn Berta mine (Catalan Coastal Ranges), fluid inclusion, stable and radiogenic isotope data have allowed to recognize two different and temporally separated hydrothermal events. The first is characterized by mixing of two fluids of contrasting salinities (from 3 to 20% NaCl eq.) and temperatures (80 to 200°C). The fluid having the lower salinity and higher temperature has a $\delta^{18}\text{O}$ around -1.2‰, suggesting a surficial origin. The second event is dominated by low salinity (up to 5% NaCl eq.) and low temperature (120°C) meteoric waters, chemically similar to the nearby La Garriga-Samalus geothermal waters. Strontium isotopes in fluorites suggest a relationship of the hydrothermal episodes to rifting periods of Triassic-Jurassic and Miocene age respectively.

Key words: fluid inclusion, stable and radiogenic isotopes, fluorite veins, hydrothermal fluids

Geogaceta, 20 (3)(1996), 696-699

ISSN: 0213683X

Introducción

La formación de un depósito hidrotermal es sólo parte de un fenómeno a mayor escala que implica el movimiento y evolución química de fluidos en la corteza. Las fracturas son zonas de alta permeabilidad que pueden actuar varias veces en el tiempo como conductos de fluidos, dejando un registro preciso, en los filones, de las condiciones del flujo así como de su origen. Además, poder relacionar los distintos eventos hidrotermales con la historia deformativa de una zona puede proporcionar una información adicional significativa para comprender la evolución geológica de la misma.

El estudio de los filones de baja temperatura de las Cadenas Costero Catalanas ha permitido poner de manifiesto la existencia de importantes procesos de movimiento de fluidos en esta area y reconocer diferentes episodios de flujo en el tiempo, caracterizados por condiciones de composición, temperatura y origen distintos. Este hidrotermalismo parece estar relacionado con el juego de las estructuras longitudinales que caracterizan morfológicamente las Cadenas Costero Catalanas el cual ha tenido lugar en diferentes épocas (final de Paleozoico, durante el Mesozoico y en el Neó-

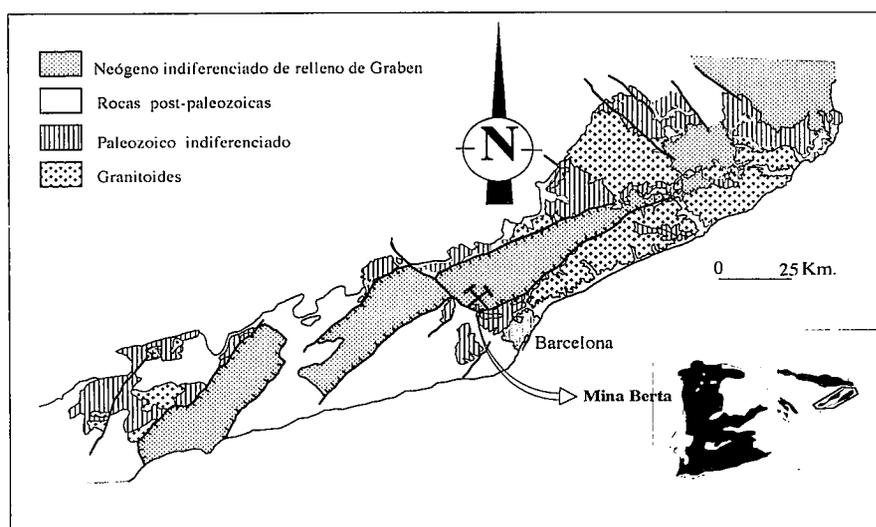


Fig.1.- Situación geológica y geográfica de la mina Berta.

Fig. 1.- Geologic and geographic situation of Berta mine.

geno) tal y como ha sido demostrado a partir de estudios sedimentológicos, estructurales y geofísicos (Fontboté *et al.*, 1989; Torné y Banda, 1988).

En el caso del depósito de F-Zn-Pb de mina Berta (Barcelona), la caracterización de los fluidos ha permitido determinar la coinci-

dencia en el espacio de dos episodios mineralizantes que en otras zonas aparecen separados en distintas estructuras. La composición de los fluidos así como las condiciones de formación de las distintas paragénesis minerales se han obtenido a partir de la microtermometría de inclusiones fluidas en fluorita y cuarzo;

geoquímica de los isótopos estables de O en cuarzo y calcita; S en sulfuros y en sulfatos, geoquímica de los isótopos de Sr en fluoritas, baritinas y calcitas y de Pb en galenas.

Situación geológica y mineralogía del depósito

La mina Berta forma parte del conjunto de sistemas filonianos con F-Zn-Pb de baja temperatura que aparecen ampliamente representados en las Cadenas Costeras Catalanas (Cardellach *et al.*, 1989). Está situada a unos 25 km al W de Barcelona (Fig. 1) y fue objeto de explotación de fluorita, esfalerita y galena a principios de este siglo. El depósito consiste en dos filones de dirección N60, verticales, de potencia métrica, encajados en una granodiorita biotítica tardihercínica, próximos a una de las fallas que controlan el graben neógeno del Vallés-Penedés y cuya dirección es NE-SW (Fig. 1).

Las fallas de dirección ENE-WSW a NE-SW que afectan al zócalo y que caracterizan estructuralmente las Cadenas Costeras Catalanas se formaron probablemente como direccionales al final del Paleozoico (Arthaud and Matte, 1975). Durante el Mesozoico estas fallas actuaron como normales y fueron reactivadas como fallas contractivas durante el Paleógeno (Anadón *et al.*, 1985; Roca y Guimerà, 1992). Posteriormente durante el tránsito Oligoceno-Mioceno volvieron a tener un comportamiento normal (Fontboté *et al.*, 1989).

Asociadas a la estructura extensiva del Vallés-Penedés y a la reactivación neógena de las fallas ENE-WSW y NW-SE existe un grupo de surgencias termales, que corresponden a manifestaciones de aguas meteóricas que han penetrado hasta profundidades de varios kilómetros y han ascendido rápidamente por fracturas, sin que sea necesario implicar un régimen geotérmico anómalo en esta zona (Fernández y Banda, 1990). En una de ellas, la de La Garriga-Samalús, Canals *et al.*, (1990), describen la precipitación de fluorita entre 500 y 600m de profundidad en un testigo de sondeo sobre un granito fuertemente alterado, como prueba del potencial mineralizante de los sistemas geotérmicos actuales en esta área.

En el encajante granodiorítico de la mina Berta, localizados en zonas alrededor de los filones, han sido reconocidos los siguientes tipos de alteración (Roig y Canals, 1994): 1) arcillítica con caolinita; 2) propilítica con clorita, sericita epidota y calcita; 3) potásica con adularia y cuarzo y 4) piritica que se superpone a las anteriores. A partir del estudio de la paragénesis y de las inclusiones fluidas en el relleno filoniano, se han podido determinar dos episodios mineralizantes en el tiempo: un primero constituido por cuarzo (I) y (II), calcita (I), fluorita (I), sulfuros (galena, esfalerita, calcopirita y pirita) y baritina (I), y un segundo

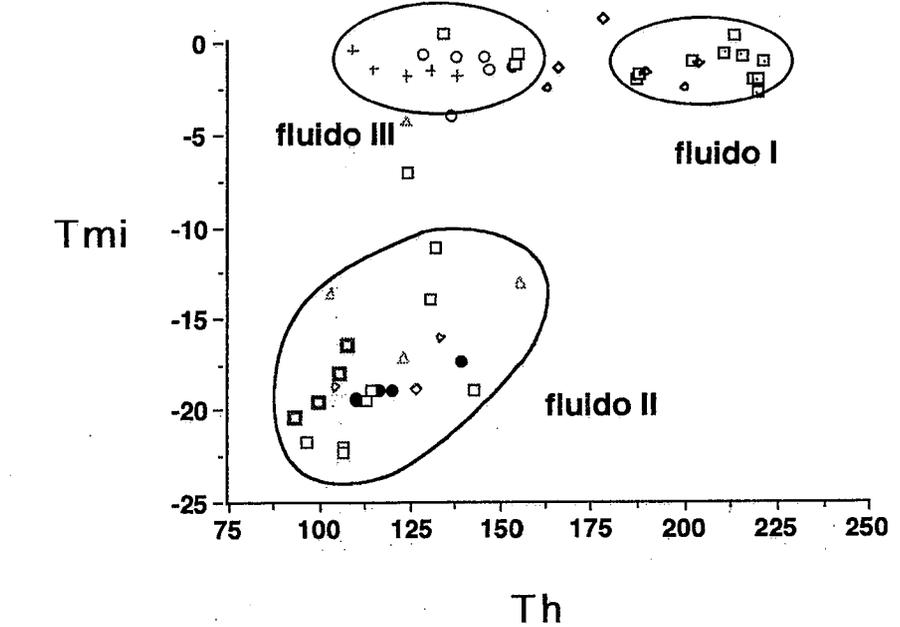


Fig. 2.- Diagrama de temperaturas de fusión del hielo (T_{mi}) frente a temperaturas de homogeneización (T_h) de las inclusiones fluidas.

Fig. 2.-Melting ice temperatures (T_{mi}) versus homogenization temperatures (T_h) of fluid inclusions.

formado por cuarzo (III), fluorita verde octaédrica (II), calcita (II), baritina (II) y trazas de adularia.

Geoquímica de los fluidos

Datos de las inclusiones fluidas: Se han estudiado las inclusiones fluidas en el cuarzo I y en las fluoritas I y II mediante microtermometría. Todas las inclusiones son bifásicas (L+V) a T ambiente y homogeneizan a líquido. A partir de las temperaturas de homogeneización (T_h) y de fusión del hielo (T_{mi}) se han podido diferenciar tres tipos de fluidos:

a) fluido I, en cuarzo de la primera generación (I). Es de relativamente alta T (T_h alrededor de 200°C) y baja salinidad (T_{mi} entre -4 y 0°C), con T eutécticas superiores a -25°C que indican un sistema salino simple formado por NaCl-H₂O.

b) fluido II, presente en la fluorita I. Es de baja temperatura (T_h alrededor de 100°C) y alta salinidad (T_{mi} entre -22 y -16°C), con T eutécticas cercanas a -60°C, indicando la presencia de un sistema polisalino complejo compuesto por CaCl₂-MgCl₂-NaCl-(KCl)-H₂O.

c) fluido III, hallado en el cuarzo I, la fluorita I y II, en los dos primeros coexistiendo con los fluidos I y II, siendo el único que se encuentra en la fluorita II. Es de baja T (T_h alrededor de 120°C) y baja salinidad (T_{mi} entre -3 y 0°C). Las T eutécticas mayores de -25°C indican un sistema salino simple NaCl-H₂O.

Representando los datos en un diagrama T_h/T_{mi} se puede observar (Fig. 2):

1) ligero enfriamiento del fluido I durante la

deposición del cuarzo (I).

2) mezcla del fluido I y del fluido II durante estadios de la precipitación de la fluorita I y de los sulfuros.

3) circulación del fluido III dando lugar a cristales de fluorita verde octaédrica (II), generando inclusiones secundarias tanto en el cuarzo (I) como en la fluorita (I).

Las relaciones Br/Cl y I/Cl obtenidos mediante la técnica de "crush-leach" tanto en el cuarzo como en las fluoritas corroboran la presencia de estos tres tipos de fluidos (Tritlla *et al.*, 1995).

Isótopos estables: (tabla I)

Se ha analizado la $\delta^{18}O$ de tres muestras de cuarzo I en los que se había obtenido información microtermométrica. Tomando un valor medio del 10.4‰ y una T de formación de 200°C, la composición isotópica del agua en equilibrio con el mismo, calculada a partir de la ecuación de Clayton *et al.*, (1972) es de -1.2‰. Este valor es compatible con la presencia de agua de origen superficial durante la precipitación del cuarzo del primer estadio de formación del filón.

La composición isotópica de la calcita I es marcadamente distinta a la de la calcita II. La primera presenta una $\delta^{13}C = -5.3\text{‰}$ y $\delta^{18}O_{(SMOW)} = 16.8\text{‰}$; suponiendo una T de formación de la misma de 200°C, similar a la del cuarzo I coexistente, y utilizando la ecuación de O'Neil *et al.* (1969) se obtiene una $\delta^{18}O$ del fluido aproximada de +6‰. Este valor contrasta con el obtenido a partir de la $\delta^{18}O$ del cuarzo (-1.2‰) y puede significar: a) que la T de formación de la calcita I sea inferior a la del cuarzo o b) que ha habido un

mineral	muestra	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ (CDT)	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (SMOW)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
baritina I	MB5.2a	0.71243	+27.2					
	MB5.2b	0.71243						
baritina II	MBG-7	0.7168	+18.9					
fluorita II	RB-2	0.71894						
	MB-OC	0.71873						
fluorita I	AR-7	0.71378						
	AR-9	0.71449						
	AR-11	0.71466						
calcita I	MB3.1-2	0.71252		-5.3	+17.0			
	MB3.1	0.71242		-5.3	+16.7			
calcita II	MB-56			-6.1	+11.7			
	MB-57			-6.5	+11.0			
cuarzo I	AR-20a				+9.9			
	AR-12a				+11.1			
	AR-12b				+10.1			
esfalerita	MB-30b		+12.3					
	MBA1-Eo		+11.9					
	MB-1		+12.0					
pirita	MBA2-3		+1.3					
galena	MBP-30b		+8.5					
	MBA1-Eo		+5.4					
	MBA1-Eb		+5.4					
	MBA1-Ea		+5.9					
	MBA1-1d		+1.9					
	MBG-4a		+8.2					
	MBG-4c		+8.1					
	MBG-4b		+5.6			18.510	15.725	38.951
	MBG-2b		+7.3			18.511	15.727	38.942
	PA-3A		+7.3			18.509	15.714	38.888
	PA-3B		+8.5			18.495	15.703	38.861
	PA-3C		+7.7			18.450	15.702	38.863

Tabla 1.- Datos de la composición isotópica de las muestras analizadas.

Tabla 1.- Isotope composition data of the analyzed samples

aumento progresivo de la $\delta^{18}\text{O}$ del fluido con el tiempo a medida que evoluciona el sistema. La falta de datos de inclusiones fluidas en la calcita no permite resolver el problema.

La calcita II es isotópicamente más ligera que la anterior y tiene una $\delta^{13}\text{C} = -6.3\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})} = 11.5\text{‰}$. Asumiendo una T de formación para este estadio de 120°C, la $\delta^{18}\text{O}$ del fluido en equilibrio con la misma es de -5.4‰. Este valor es indicativo de un origen meteórico de estos fluidos tardíos, está de acuerdo con la baja salinidad (entre 0 y 5% en peso equivalente de NaI), encontrada en las inclusiones de la fluorita II (octaédrica verde).

La $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfuros varía entre +5.4 y +8.2‰ en la galena (11 análisis) y entre +11.9 y +12.3‰ en la esfalerita (3 análisis). Una pirita analizada ha dado un valor de +1.3‰. Se han obtenido temperaturas isotópicas de 160 y 60°C en dos pares esfalerita-galena analizados, valores próximos a los obtenidos en las inclusiones de la fluorita I confirmando la baja T de formación de este estadio. Por ello no se ha considerado necesaria una corrección de presión en las temperaturas de homogenización de las inclusiones y pueden considerarse como cercanas a las temperaturas de atrape. La $\delta^{34}\text{S}$ del H_2S en equilibrio con la galena y la esfalerita del estadio mineralizante principal es del +11‰ (calculada a una T de

150°C) lo que indica una fuente crustal, no magmática del azufre).

Se han analizado la composición isotópica del azufre de dos muestras de baritina: una que acompaña a la fluorita I cuya $\delta^{34}\text{S}$ es de 27.2‰ y otra que acompaña a la fluorita II con un valor de 18.9‰. La composición de la baritina (I) es mucho más pesada que las registradas en filones parecidos de las Cadenas Costero Catalanas. Este valor podría explicarse a partir de una reducción inorgánica de sulfato de origen evaporítico ($\delta^{34}\text{S} \sim +17\text{‰}$) en algún punto del sistema hidrotermal, la cual podría dar lugar a una $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \sim +13\text{‰}$ y a una $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ coexistente de alrededor del 40‰ (asumiendo una T de 250°C). La oxidación parcial del H_2S daría lugar a un sulfato más ligero, el cual, mezclado con el original del fluido podría dar los valores pesados encontrados en la baritina. El aumento de la concentración de ión sulfato en zonas superficiales del sistema, favorecería además, la precipitación de la baritina. Esta hipótesis es consistente con una relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la baritina mucho más radiogénica que la del agua del mar en contraste con los valores encontrados en los filones de baritina dominante de las Cadenas Costero Catalanas. La composición isotópica del azufre de la baritina (II), podría en cambio, estar directamente relacionada con la de sulfato evaporítico o de agua marina.

Isótopos radiogénicos : (tabla 1)

Se ha analizado la composición isotópica del estroncio en seis fluoritas, tres baritinas y dos calcitas procedentes del filón, así como de una fluorita y una calcita del sondeo S-6 del campo geotérmico de La Garriga-Samalús. También se ha analizado la composición isotópica del plomo de cinco galenas. Las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varían entre 0.7138 y 0.7189 en las fluoritas, entre 0.7124 y 0.7168 en las baritinas y entre 0.7125 y 0.7124 en las dos calcitas analizadas. Las variaciones de las relaciones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de las galenas entre 18.450 y 18.511, 15.702 y 15.727, y 38.861 y 38.951 respectivamente, se hallan dentro del rango de error de los análisis.

Situando los minerales con distintas relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en la secuencia paragenética, se observa que los valores de calcita I y baritina I son coincidentes (alrededor de 0.7124), los valores de fluorita II son ligeramente más radiogénicos (entre 0.7138 y 0.7145) y son las fluoritas II y la baritina II las que presentan las relaciones más elevadas (entre 0.7168 y 0.7194). Los cristales de fluorita, con inclusiones fluidas de características parecidas a las encontradas en la fluorita II de Mina Berta y procedentes de una profundidad de 840m en el sondeo de La Garriga-Samalús, presentan un valor muy radiogénico (0.7199), mientras que la calcita procedente del mismo sondeo, a una profundidad de 517m, tiene una relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0.7143.

Las variaciones en las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, tanto de las fluoritas como de las baritinas, no pueden explicarse mediante la desintegración "in situ" del isótopo ^{87}Rb y deben ser, por lo tanto, el reflejo de estroncio procedente de fuentes diferentes y/o de episodios mineralizantes de edades distintas, coincidentes en el mismo filón. Suponiendo que la diferencia en el tiempo de precipitación entre los minerales fuera la única causa que explicara la variación en la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, entonces ésta debería ser de 230 millones de años; si se considera la granodiorita biotítica la principal fuente de este elemento en los minerales analizados (relaciones $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 1.983$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = 0.71068$; Enrique y Debon, 1987). Si por el contrario, se considera que todos los minerales han precipitado en el mismo espacio de tiempo y que las diferencias del estroncio son debidas a la presencia de diferentes fuentes (una poco radiogénica como agua marina y otra más radiogénica como podría ser el estroncio lixiviado de los granitos) todos los puntos analizados caen en una curva de mezcla. Sin embargo esta última hipótesis no es verosímil, ya que la mezcla se debería dar entre fluidos de muy poca salinidad (fluido I y fluido III) para producir un fluido de alta salinidad (fluido II).

En conjunto, el sistema filoniano de mina Berta presenta unas relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ más

elevadas y más variables que cualquier otro sistema conocido de las Cadenas Costeras Catalanas. Donde se ha podido demostrar un proceso de mezcla de fluidos, el rango de variación no supera al encontrado entre la calcita I y la fluorita I y es aproximadamente el doble del existente en el interior de la fluorita I.

Como primera hipótesis, las variaciones encontradas entre la calcita I, baritina I y fluorita I (primer episodio hidrotermal) se podrían asociar a un proceso de mezcla, tal y como parecen indicarlo los datos de inclusiones fluidas. En este caso si la $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las fluoritas representan los valores más próximo a los del granito en el momento de la mineralización, éste debería situarse en el límite Jurásico superior-Cretácico inferior, época caracterizada por una importante fracturación extensiva (Salas y Casas, 1993). Sin embargo, el episodio de actividad hidrotermal documentado por Canals y Cardellach (1993) en otros filones de características geoquímicas parecidas en las Cadenas Costero Catalanas corresponde al rifting Triásico superior-Jurásico inferior. Esta última edad está de acuerdo además, con los datos de K/Ar en granitos de esta zona de Solé (1993), quien demuestra la existencia de un episodio térmico de hasta 180°C que afecta a dichos granitos y que tuvo lugar entre 180 y 200 Ma. La aparente discrepancia de edad entre el primer episodio mineralizante de mina Berta y los demás sistemas filonianos puede explicarse si se infiere una fuente para el estroncio más rica en Rb que el propio granito. La interacción de los fluidos hidrotermales con materiales pelíticos del basamento paleozoico además de los granitos, (tal y como sugieren los isótopos de Pb y de azufre) podrían explicar a dicha diferencia.

La precipitación de fluorita II y baritina II se daría en épocas muy posteriores. Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso de la fluorita de centro de filón (fluorita I), la probable edad de su formación sería miocénica, momento de la generación del graben del Vallés-Penedés (Bartrina, *et al.*, 1992).

De acuerdo con el modelo de evolución del plomo de Stacey y Kramers (1975) las galenas analizadas corresponden a edades $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 350 Ma para valores de μ de 10.2 indicativo de un área fuente situada en la corteza superior. Esta edad es superior a la de las rocas encajantes y superior también a las edades estimadas anteriormente. A falta de datos sobre la composición isotópica del plomo de los granitoides de las Cadenas Costeras Catalanas, y dadas las similitudes geoquímicas, de edad y situación geológica dentro del orógeno hercínico se ha establecido una comparación con los datos de los isótopos de Pb obtenidos por Michard-Vitrac *et al.*, (1981) en granitoides del Pirineo Central.

La relación $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de los feldespatos potásicos y plagioclasas del granito de la Maladeta es muy similar a la relación $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

de las galenas analizadas. Por otro lado la composición isotópica del plomo en roca total una vez corregido el plomo radiogénico producido durante el intervalo de tiempo transcurrido desde la formación de los filones hasta hoy día, coincide también con los datos obtenidos en las galenas. Sin embargo, existe una cierta diferencia entre la relación $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ del granito y la de las galenas filonianas lo que puede indicar la presencia de una segunda fuente de plomo caracterizada por una relación $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ más elevada que la de los granitos en el momento de su emplazamiento.

Conclusiones

La combinación de los datos de inclusiones fluidas e isótopos estables y radiogénicos permiten determinar que el sistema hidrotermal de mina Berta esta constituido por tres fluidos marcadamente diferentes que actúan en dos episodios separados en el tiempo.

Los fluidos que han circulado por el sistema de fracturas son predominantemente de origen superficial. Tanto la composición isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O} \sim -1\%$) como la baja salinidad del primero de ellos, apuntan hacia un origen, posiblemente a partir de aguas marinas. Los datos sobre el fluido II de temperatura menor (100°C), mayor salinidad (fluido polisalino complejo) junto con la relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y los valores de $\delta^{34}\text{S}$ indican que se trata de un fluido que ha interactuado tanto con el basamento granítico como con material de origen sedimentario. El fluido III, responsable del último episodio hidrotermal es también de baja T (120°C), baja salinidad (T_{mi} entre 0 y 3°C) y muy radiogénico ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.718$). Este valor sólo puede explicarse a partir de una interacción de los fluidos con materiales muy ricos en Rb o bien con una edad de esta fase mineralizante mucho más joven que la anterior. Tanto los datos de inclusiones fluidas como las evidencias geológicas apuntan a esta última hipótesis como la más probable. Es de destacar la similitud existente entre las temperaturas, salinidades y relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del fluido III y las hallados en fluoritas precipitadas en pequeñas fracturas del sondeo S-6 de La Garriga-Samalús. Dicho sondeo está situado en el sistema geotérmico actual asociado a la falla N del graben Vallés-Penedés.

La actividad hidrotermal en esta área tuvo lugar durante épocas distintas a juzgar por las relaciones paragenéticas, asociadas en el tiempo a fluidos con composiciones químicas, temperaturas y características isotópicas diferentes. Es importante destacar la gran similitud entre los fluidos más tardíos y los que actualmente fluyen por áreas geotérmicas cercanas. Es probable que exista una relación entre los períodos más importantes de rifting que han afectado a las Cadenas Costero Catalanas y la circulación de fluidos a

gran escala provocada por el aumento en el gradiente geotérmico que los acompaña. Si bien el período Triásico-Jurásico estaba ya bien documentado, el efecto de la extensión miocénica con el desarrollo del graben del Vallés-Penedés lo es por primera vez como fenómeno metalogénico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través del Proyecto PB92-0597 de la DGICYT. Agradecemos al Dr. R. Moritz de la Universidad de Ginebra las facilidades para poder realizar los análisis isotópicos de estroncio, y al Dr. E. Roca la lectura del manuscrito.

Referencias

- Anadón, P.; Cabrera, L.; Guimerà, J.; Santanach, P. (1985): *SEPM Spec. Pub.*; 37:303-318.
- Arthaud, F and Matte, Ph. (1975): *Tectonophysics*; 25: 139-171.
- Bartrina, M.T.; Cabrera, L.; Jurado, M.J.; Guimerà, J. y Roca, E. (1992): *Tectonophysics*; 203: 219-247.
- Canals, A.; Albert, J. y Ayora, C. (1990): *Geogaceta*; 7: 88-90.
- Canals, A. y Cardellach, E. (1993): *Chem. Geol. (Isot. Geosc. Sect.)*, 104:269-280.
- Canals, A.; Cardellach, E.; Rye, D.M. y Ayora, C. (1992): *Econ. Geol.*; 87: 142-153.
- Cardellach, E.; Canals, A. y Tritlla, J. (1990): *Acta Geol. Hisp.*; 1-2: 75-81.
- Clayton, R.N.; O'Neil, J.R. y Mayeda, T.K. (1972): *Jour. Geophys. Research*; 77(17): 3057-3067.
- Fernández, M. y Banda, E. (1990): *Tectonophysics*; 164: 259-266
- Fontboté, J.M.; Guimerà, J.; Sabat, F. y Santanach, P. (1989): *Libro Homenaje a Rafael Soler. A.G.G.E.P.*; 37-51.
- Michard-Vitrac, A.; Albarede, F. y Allègre, C.J. (1981): *Nature*; 291: 460-464.
- O'Neil, J.R.; Clayton, R.N. y Mayeda, T.K. (1969): *Jour. Chem. Physics*; 51:5547-5558.
- Roca, E. y Guimerà, J. (1992): *Tectonophysics*; 203: 203-218.
- Roig, A. y Canals, A. (1994): *Bol. Soc. Min. Esp.*; 17-1: 194-195.
- Salas, R. y Casas, A. (1993): *Tectonophysics*; 228: 33-55.
- Solé, J. (1993): Ph.D. Thesis, 201pp. Université de Genève.
- Stacey, J.S. and Kramers, J. D. (1975): *Earth Planet. Sci. Letters*; 26: 207-221.
- Tomé, M. y Banda, E. (1988): *II Cong. Soc. Geol. Esp., Granada*; 2: 231-234
- Tritlla, J., Canals, A.; Banks, D. y Cardellach, E. (1995): *Bol. Soc. Min.*; 18-1:252-253.