

## EL SISTEMA GRANITO-MINERALIZACION DE URANIO DE EL BERROCAL COMO ANALOGO NATURAL DE UN ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS

L. Pérez del Villar \*, B. de la Cruz \*, J. Pardillo \*, M. Pelayo \*, P. Rivas \* y J. Astudillo \*\*

### RESUMEN

En este trabajo se resume la aplicación del estudio analógico de los yacimientos de elementos radiactivos a la modelización y validación de los procesos de migración/retención de los radioisótopos artificiales de alta actividad, en un medio geológico.

Las características geológicas, mineralógicas y geoquímicas del sistema granito-mineralización de uranio de El Berrocal sugieren que dicho sistema no puede considerarse como un análogo natural global de un almacenamiento de residuos radiactivos. Sin embargo, los procesos hidrotermales de baja temperatura que lo afectaron, incluido el que originó la mineralización uranífera, así como los de alteración supergénica, pueden considerarse como procesos geoquímicos análogos a los que podrían tener lugar en un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad.

**Palabras clave:** Granitos, mineralización de uranio, análogos naturales, residuos radiactivos, El Berrocal, Sierra de Gredos.

### ABSTRACT

This work summarizes the analogical study of the radioactive elements and rare earths are deposits applied to the modelling and validation of the migration/retention processes of the high level radioactive artificial isotopes in a geological environment.

The geological, mineralogical and geochemical characteristics of the El Berrocal granite-U mineralization system suggest that this system cannot be considered as a global natural analogue for a radioactive waste repository. However, the low-temperature hydrothermal processes, which affected it, including that one which originated the uraniferous mineralization, as well as the weathering processes, can be considered as geochemical processes analogous to those that could take place in a high level radioactive repository.

**Key words:** Granites, uranium ore deposit, natural analogues, radioactive wastes, El Berrocal, Sierra de Gredos.

### Introducción

La idea de que los yacimientos profundos de elementos radiactivos y tierras raras (TR) podrían ser análogos naturales de un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad (RRAA) surgió al considerar que ambos sistemas podían compararse globalmente entre sí, o al menos en determinados aspectos. La alteración de un yacimiento radiactivo y sus aureolas de dispersión pueden proporcionar datos sobre la migración de los elementos geoquímicamente análogos a los radioisótopos artificiales de alta actividad, datos muy útiles para modelizar y validar la posible dispersión de estos radioisótopos a partir

de su almacenamiento. En este sentido, el estudio de la propia génesis de algunos yacimientos de U puede aportar datos semicuantitativos sobre el comportamiento geoquímico de éste y otros elementos análogos (Brookins, 1987).

En el último decenio se han estudiado muchos yacimientos de U, Th o TR como análogos naturales. Entre ellos cabe citar el yacimiento y reactor nuclear natural de Oklo (Brookins, 1976 y 1984; Chapuis y Blanc, 1992), Poços de Caldas (NAGRA, SKB, UK DOE y US DOE, 1991), Cigar Lake (Cramer, 1986a y b; McConnell y Cramer, 1987; Cramer *et al.*, 1987), Alligator River (OECD, NEA, ANSTO, 1992), Tono (Ochiai *et al.*, 1989; Seo *et al.*, 1989; Yoshida

\* Div. Técnicas Geológicas del CIEMAT, Avenida Complutense, 22, 28040 Madrid.

\*\* ENRESA. Emilio Vargas 7, 28043 Madrid.

*et al.*, 1991; Seo y Yoshida, 1992), y algunos yacimientos de U y sistemas hidrotermales intragraníticos franceses (Ménager *et al.*, 1988; Ménager *et al.*, 1992; Piantone y Sureau, 1991).

Además de las características de naturaleza y profundidad, un yacimiento debe reunir una serie de condiciones para que pueda considerarse como un análogo natural. Estas son: a) que esté encajado en materiales geológicos análogos a los que pueden servir como roca almacén de los RRAA; b) que tenga una geometría simple; c) si está encajado en rocas cristalinas, que esté además flanqueado por materiales arcillosos y d) que esté poco perturbado por labores de exploración o explotación, o bien que tenga zonas mineralizadas sin explotar.

En el mejor de los casos, un yacimiento de elementos radiactivos podría constituir un análogo natural casi integral de un almacenamiento de RRAA, ya que el término fuente y al menos dos de las barreras necesarias para aislarlo estarían representadas en el sistema. La única barrera ausente sería la vaina de acero inoxidable con la que se recubren los RRAA. Si bien es difícil que todas estas características se reúnan en un mismo yacimiento, algunos de los procesos que en ellos se observan (p.ej., los procesos de alteración y removilización) pueden ser análogos a los que ocurrirían por la eventual degradación de un almacenamiento de RRAA.

El objetivo de este trabajo es analizar las características del sistema granito-mineralización de U de El Berrocal y los procesos de alteración que lo afectan, a fin de determinar si el sistema puede considerarse como un análogo natural global, y si los procesos mencionados podrían considerarse análogos a los que eventualmente tendrían lugar en un repositorio.

### Metodología de estudio

La comparación entre los objetivos de la metalogénia de algunos tipos de yacimientos radiactivos y los del estudio de los yacimientos análogos puede ser útil para deducir la metodología de estudio de este tipo de sistemas naturales (fig. 1). Así, los objetivos de la metalogénia son el estudio de la roca fuente y de las condiciones de movilización, transporte y depósito de un elemento, objetivos que son coincidentes con los del estudio de los yacimientos análogos. En consecuencia, la metodología del estudio análogo de un yacimiento radiactivo conllevará todos aquellos métodos que aporten datos sobre el término fuente y, principalmente, sobre los procesos y condiciones de movilización, transporte y depósito de los elementos análogos, tanto en condiciones hidrotermales de baja temperatura como supergénicas. En definitiva, sería la misma metodología que normalmente se utiliza en el estudio metalogénico de algunos yacimientos radiactivos, y que abarca desde el muestreo y análisis de la roca encajante, la mineralización, los fluidos fósiles, etc., hasta los métodos analíticos más sofisticados, como son los de espectrometría  $\alpha$  y de masas, el de las trazas de fisión, e incluso la resonancia paramagnética electrónica para detectar defectos reticulares en la caolinita, trazador y dosímetro cristalino de radioelementos.

Otros métodos no siempre empleados en la metalogénia de yacimientos radiactivos, o empleados con éxito desigual, son los de

especiación de elementos en soluciones naturales, los de cálculo de los equilibrios químicos, de la cinética de las reacciones naturales, del balance y transferencia de masas, etc. Todos ellos pueden proporcionar datos importantes para cuantificar, modelizar y validar la migración de los radioelementos naturales a través de un medio geológico, lo que permitirá predecir, por analogía, lo que pudiera ocurrir si se produjera eventualmente el deterioro de un almacenamiento de RRAA.

Hasta el momento, en este estudio se han empleado los métodos clásicos de caracterización del sistema y los procesos que lo afectan. Los métodos analíticos más sofisticados, como la espectrometría de masas, se están comenzando a utilizar.

Los materiales estudiados son los que constituyen el sistema granito-mineralización de U de El Berrocal, como son el granito sano, hidrotermal y supergénicamente alterado, la mineralización uranífera y los rellenos fisurales.

### ¿El sistema granito-mineralización de U de El Berrocal puede considerarse como un análogo natural?

La idea de considerar la mineralización de U de El Berrocal y el granito encajante como un sistema análogo surgió ante la necesidad de estudiar una mineralización de U, con geometría simple y encajada en granito o arcilla.

El Berrocal está situado en la parte central de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico (Julivert *et al.*, 1972), en las proximidades del contacto entre la Sierra de Gredos y la cuenca terciaria del río Tajo (fig. 1A). Se trata de un plutón circunscrito, de traza cartográfica casi circular y con 5 km aproximadamente de diámetro (Varea e Iglesias, 1981). Está constituido mayoritariamente por una facies de granito equigranular de grano grueso, a veces porfídico, y con dos micas, siendo la moscovita dominante (Facies El Berrocal). En él se han distinguido además otras dos facies: una, constituida por leucogranitos de grano medio a fino y equigranular, en transición gradual con la facies El Berrocal y que ocupa las partes más altas del plutón (fig. 2B), y otra, denominada Facies Pegmoaplítica, bien desarrollada en los bordes del plutón y, sobretudo, en el sector NO del mismo. Esta última es transicional con la facies de leucogranitos y ha sido interpretada como la facies típica de una cúpula granítica (Pérez del Villar y Pardillo, 1992). Esta facies no está representada en la figura 2B.

Desde el punto de vista de la geoquímica y mineralogía del U, la facies El Berrocal se caracteriza por tener aproximadamente el 60 % del U total en forma de uraninita ortomagmática, por lo que esta facies se ha clasificado como fértil en U y fuente de este elemento desde el pasado geológico hasta la actualidad (Pérez del Villar *et al.*, 1992a).

La facies El Berrocal es a su vez la roca encajante de un filón importante de cuarzo que, con dirección N100°-110°E y 75° de buzamiento hacia el N, está mineralizado por esfalerita, pirita, galena y calcopi-

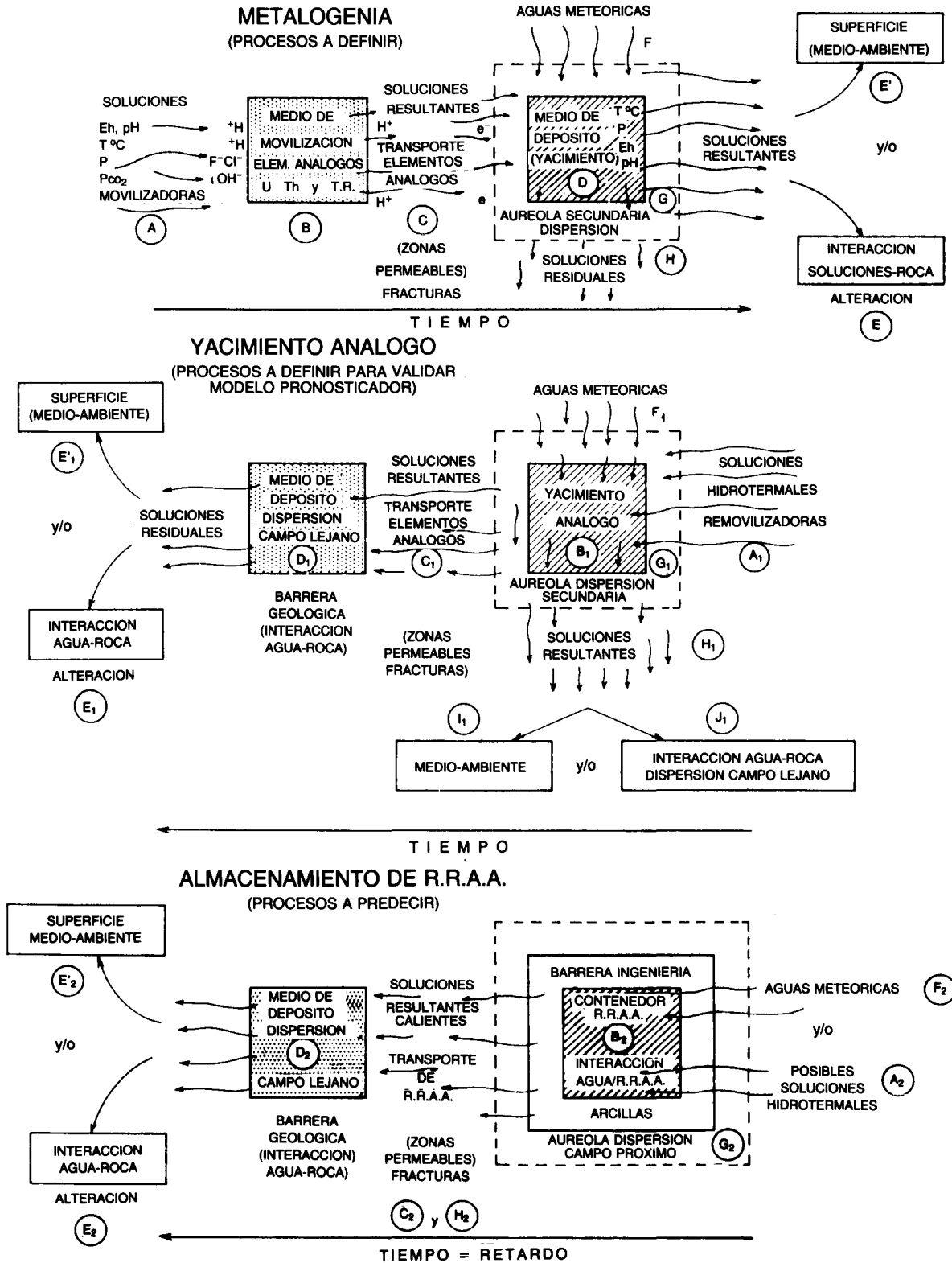


Fig. 1.—Comparación entre los objetivos de la metalogenia y del estudio de yacimientos radiactivos análogos a un almacenamiento de R.R.A.A.

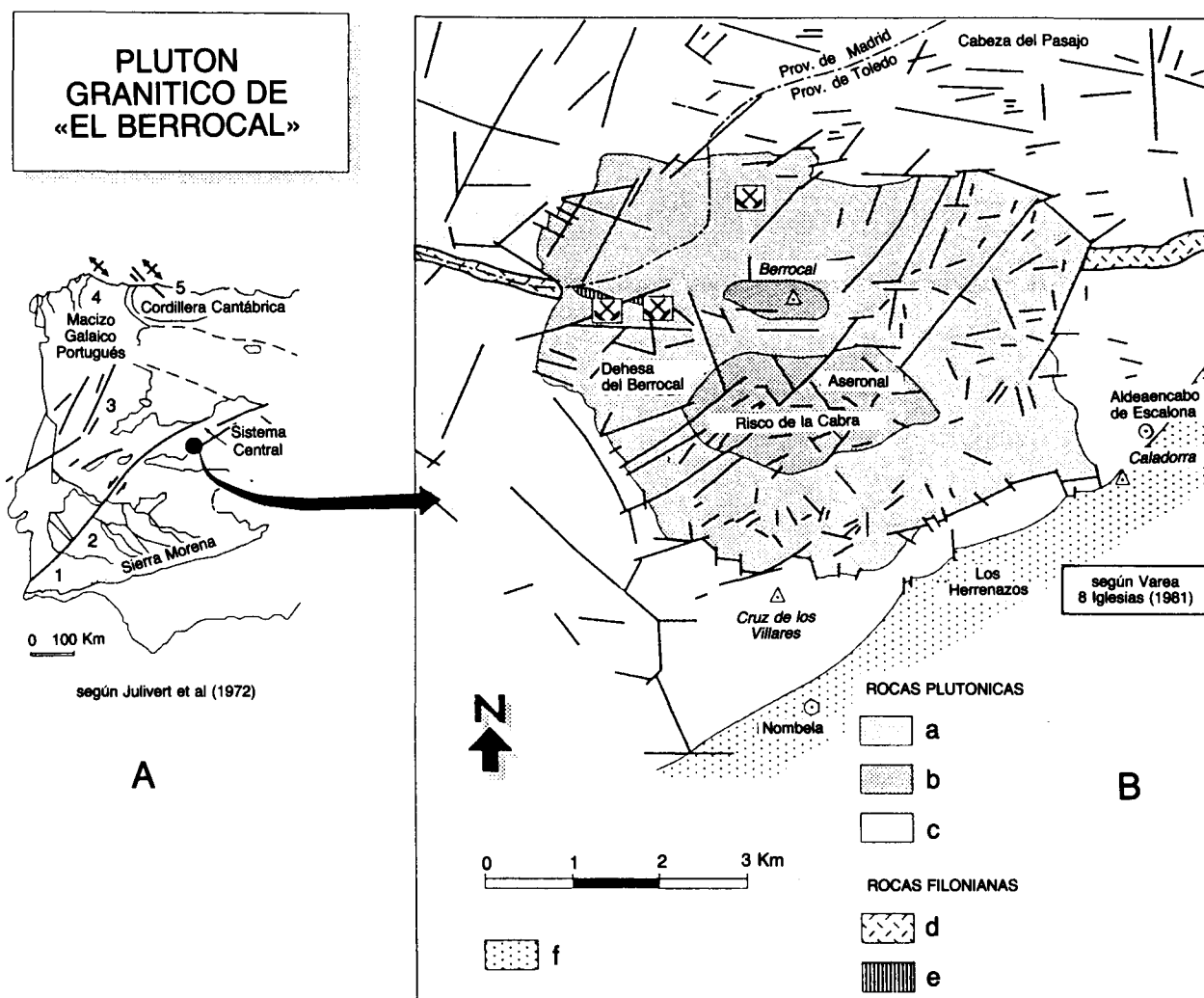


Fig. 2.—Mapa de situación y esquema geológico del plutón granítico de El Berrocal.

A: 1) Zona Surportuguesa. 2) Zona de Ossa-Morena. 3) Zona Centro-Ibérica. 4) Zona Occidental Asturiana. 5) Zona Cantábrica.  
 B: a) Cuarzogranito con dos micas. Facies El Berrocal. b) Leucogranito. c) Granito adamellítico, tipo San Vicente. d) Dique aplítico «Paredes de Escalona-Navamorcuende». e) Filón de cuarzo mineralizado con BPGC y pirita, pechblenda, barita y carbonatos (Mina de El Berrocal). f) Materiales terciarios indiferenciados.

rita y, posteriormente, por pechblenda, carbonatos y algo de pirita y barita (Arribas, 1965 y Pérez del Villar y Pardillo, 1992). Dicho filón aflora en la superficie, tiene aproximadamente 2 m de potencia, está flanqueado por sendas salbandas arcillosas de 10-20 cm de espesor y su continuidad en profundidad puede alcanzar los 500 m. En esta cota se ha localizado la zona de su posible enraizamiento (Pérez del Villar *et al.*, 1993). Este filón de cuarzo mineralizado, denominado mina de El Berrocal, fue explotado por la JEN en la década de los años sesenta, hasta una profundidad de aproximadamente 70 m (fig. 3).

Desde el punto de vista analógico, el filón de cuarzo de El Berrocal está mineralizado por minerales de U, elemento análogo por excelencia, que rellenan fracturas y microfisuras del cuarzo, material que podría representar el vidrio silicatado con el que se mezclan los RRAA. Su geometría es simple y está limitado por dos bandas de arcillas que, a pesar de su escasa potencia, podrían representar la barrera arcillosa de ingeniería o segunda barrera. Por el contrario, el dique aflora en la superficie, está intensamente fracturado, es extremadamente permeable, está muy perturbado por la explotación y, sobretodo, encaja en un granito fértil también en U, por lo que, en prin-

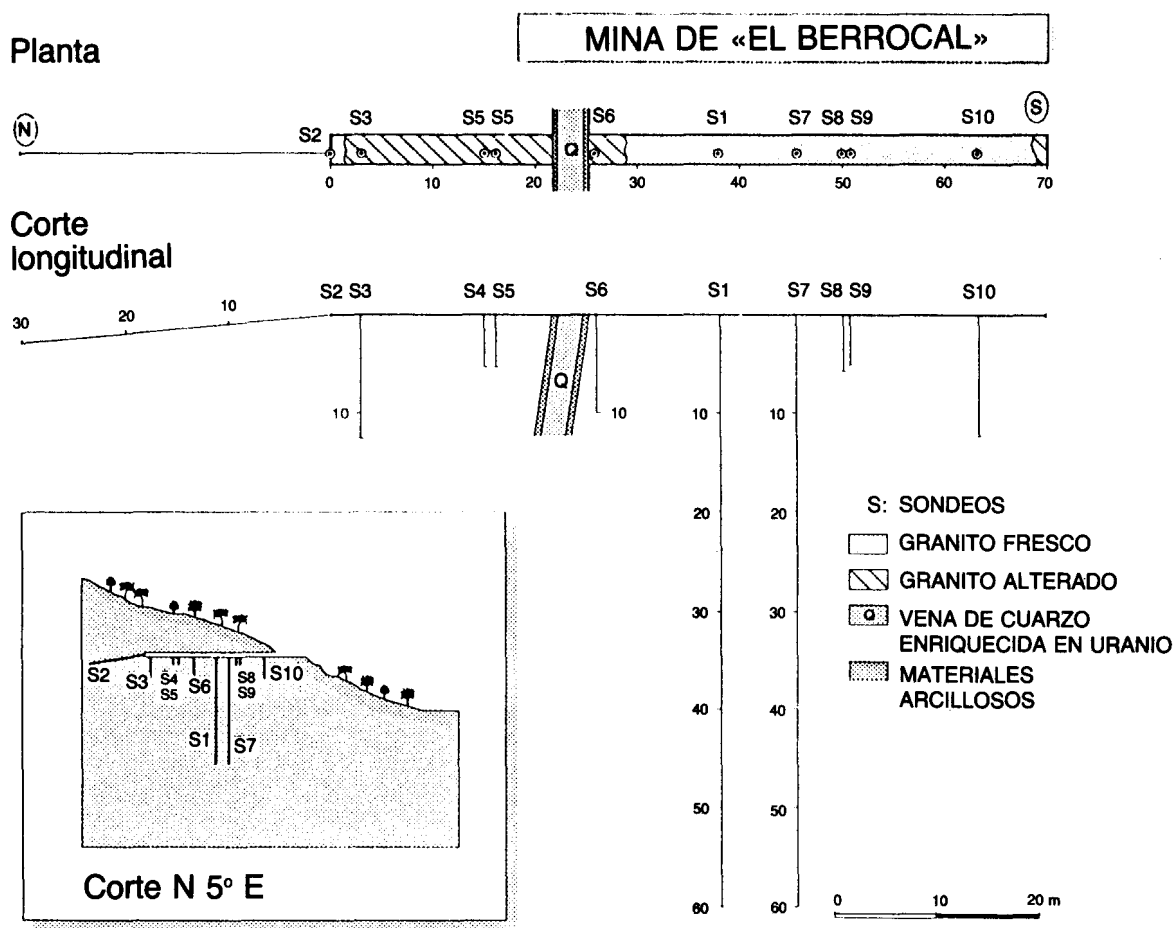


Fig. 3.—Esquema de la galería de la mina y del filón mineralizado de El Berrocal.

cipio, resultaría difícil delimitar la aureola de dispersión del U procedente del dique.

De acuerdo con estas características, el yacimiento de El Berrocal no puede considerarse como un análogo natural global, en el sentido estricto del término. No obstante, los procesos hidrotermales que afectaron al granito, incluidos los que originaron el dique de cuarzo y la propia mineralización de U, así como los procesos supergénicos subactuales que afectaron al sistema, podrían considerarse como procesos de removilización, migración y retención del U, Th y TR, análogos a los que podrían ocurrir en un almacenamiento de RRAA. Además, el hecho de que el sistema granito-mineralización de U de El Berrocal haya sido elegido para estudiar los procesos actuales de migración del U, hace que dicho sistema sea actualmente objeto de un estudio analógico muy completo, por abarcar gran parte de los procesos que pueden esperarse en un almacenamiento de RRAA.

### Resultados

#### La facies El Berrocal y los procesos de alteración

El batolito de El Berrocal pertenece al grupo de granitoides emplazados durante el episodio dúctil transcurrente tardihercínico, y está intruido en los granitos-adamellitas del tipo San Vicente. Estos últimos se emplazaron durante la fase compresiva hercínica F-3 o al principio del episodio extensional dúctil tardihercínico (Doblas, 1990). La edad del emplazamiento de El Berrocal, obtenida por el método Rb-Sr, es de  $300 \pm 1$  Ma, con una relación  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0,713 \pm 0,002$  (Pérez del Villar, *et al.*, en prensa). A su vez, dicho plutón parece cortar al dique aplítico «Paredes de Escalona-Navamorcuende», que sería anterior al plutón (Varea e Iglesias, 1981), o bien, coetáneo al mismo, emplazado bajo el mismo régimen tectónico y procedente del mismo magma (Ubanell y Doblas, 1988).

La composición mineralógica de la facies El Berrocal ha permitido clasificarla, de acuerdo con Streckisen (1974), como un cuarzogranito de feldespato alcalino y dos micas. La asociación de minerales accesorios está constituida por corindón, andalucita, circón, *monacita*, *xenotima*, ilmenita, apatito, *torita-auerlita*, *uraninita*, casiterita, galena, piritita, esfalerita y fluorita. Esta facies está afectada por los procesos tectónicos, deutéricos y/o tardimagmáticos siguientes: microfisuración del granito, baueritización de la biotita, cloritización constante de la biotita, oxidación de la ilmenita (anatasa), sericitización incipiente de la albita ( $\text{An}_3$ ) y, en menor proporción, del FdK, albitización intersticial, disolución parcial del apatito y oxidación y removilización parcial de la uraninita.

Estos procesos, difíciles de ordenar relativamente, se han considerado como el resultado de la interacción granito/soluciones hidrotermales de alta temperatura, en condiciones probablemente ácidas y oxidantes, con baja relación agua/roca y facilitados por la microfisuración del granito.

La datación mediante el método Rb-Sr del último cierre del sistema para el  $^{87}\text{Sr}$  pone de manifiesto que los procesos anteriormente descritos se produjeron, al menos, hace  $289 \pm 1\text{Ma}$ , originándose un aumento del valor de la relación  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  hasta  $0,731 = 0,001$  (Pérez del Villar *et al.*, en prensa).

Las características geoquímicas más importantes de la facies El Berrocal se pueden resumir de la siguiente manera: se trata de un granito rico en  $\text{SiO}_2$  (74-75 %), peraluminico (13-14 %), hipocálcico ( $\approx 0,5$  %), rico en  $\text{P}_2\text{O}_5$  ( $\approx 0,30$  %), con una relación  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  comprendida entre 0,80 y 0,90. Estas características, junto al bajo contenido en Ba y Sr, alto en Rb y el valor de la relación K/Rb, comprendido entre 80 y 100, como en las pegmatitas, permite clasificar a dicho granito como muy evolucionado, del grupo de las peraciditas (La Roche, 1964) y enriquecido en elementos incompatibles, como el U, Li, F, Sn (Pérez de Villar y de la Cruz, 1989; Pérez de Villar *et al.*, 1990).

Desde el punto de vista de los radioelementos análogos U y Th, la facies El Berrocal presenta un contenido medio de 16,5 ppm en U y 7 ppm de Th, variando el valor de la relación U/Th entre 2,26 y 2,50 para 150 muestras analizadas. En este sentido, en los granitos muy evolucionados y con relación U/Th  $\geq 1$ , la proporción de U atribuible a la uraninita ortomagmática puede llegar a ser hasta del 80 % del total, y el 20 % restante estaría repartido entre los minerales esenciales y accesorios del granito (Friedrich y Cuney, 1989). En efecto, el cálculo de la distribución mineralógica del U y Th en la facies El Berrocal, afectada ya por los procesos deutéricos y/o tardimagmáticos, ha permitido estimar que

aproximadamente el 62 % del U total se encuentra en forma de uraninita, el 15 % satura los minerales accesorios, el 6 % se encontraría en los minerales esenciales y el 17 % restante sería fácilmente lixiviable, por estar en posición de cambio catiónico, asociado a radicales  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  y adsorbido por los oxihidróxidos de Fe amorfos o cripto a microcristalinos (Pérez del Villar *et al.*, 1992a). Estas últimas fases minerales estarían ubicadas en las microfisuras de la roca y en los planos de exfoliación de algunos de sus minerales esenciales.

Si el U clasificado como fácilmente lixiviable se considera procedente de la alteración y removilización parcial de la uraninita, se llega a una conclusión, para la facies El Berrocal, semejante a la obtenida por Friedrich y Cuney (1989). Es decir que, el 79 % del U total de la citada facies estaría originalmente en forma de uraninita. Todo ello conduce a establecer que el primer proceso de removilización, migración y retención del U en el granito, susceptible de ser estudiado como proceso análogo, fue el de la alteración deutérica y/o tardimagmática.

La facies El Berrocal está afectada por una red de fracturas tardihercínicas entre cuyas familias destaca la N110°E, por su gran desarrollo, ser la responsable de un proceso hidrotermal intenso y llevar asociados filones de cuarzo, generalmente mineralizados por sulfuros y barita.

El efecto del hidrotermalismo sobre dicha facies se pone de manifiesto por la sericitización generalizada de la roca y, como consecuencia, la cuarcificación de los feldespatos e incluso el relleno de las microfracturas por cuarzo. Sobre este granito alterado se superpuso otro proceso hidrotermal, fértil en U, que dio lugar a la neoformación de clorita rica en Mg, carbonatos del tipo ankerítico, ricos en Mn y, en algunas fracturas, minerales de U, probablemente pechblenda y coffinita.

Para semicuantificar el efecto geoquímico producido por estas dos fases de alteración se han calculado y comparado las celdillas elementales de Barth (1948) del granito fresco y del hidrotermalmente alterado, y se han comparado los contenidos en algunos elementos trazas de ambos (tablas 1 y 2).

Aunque el método empleado es aproximado, los resultados indican los elementos que han intervenido en ambos procesos y explican las transformaciones mineralógicas observadas. Así, la ganancia en  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$  y la pérdida de  $\text{Na}^+$  están relacionadas con la sericitización de la albita fundamentalmente; la ganancia en  $\text{Fe}^{3+}$  y de parte del  $\text{Mg}^{2+}$  con la neoformación de clorita; y la ganancia en  $\text{C}^{4+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y parte del  $\text{Mg}^{2+}$  con la neoformación de carbonatos. A excepción del  $\text{Si}^{4+}$ , el resto de los cationes varían poco, y la variación de este último tiene poca significación dado el valor de  $\sigma$  del contenido medio.

Tabla 1.—Composición química del granito sano e hidrotermalmente alterado (elementos mayores y balance geoquímico)

Oxidos %	Composición química media				Celdillas elementales de Barth		Balance geoquímico				
	Sondeos				C. media elemental	Sondeos		Sondeos		Gr. sano ganancias → Gr. alter. pérdidas	
	Gr. sano (77 M)		Gr. alter. (21 M)			Gr. sano	Gr. alter.	Gr. sano ganancias	Gr. alter. pérdidas		
$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$		Gr. sano	Gr. alter.					
SiO <sub>2</sub>	74,14	1,12	73,90	2,17	Si <sup>4+</sup>	63,92	62,82	Fe <sup>3+</sup>	0,1	Si <sup>4+</sup>	1,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,92	0,55	14,07	1,16	Al <sup>3+</sup>	14,15	14,10	Mg <sup>2+</sup>	0,46	Si <sup>3+</sup>	0,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,50	0,10	0,68	0,13	Fe <sup>3+</sup>	0,33	0,43	Ca <sup>2+</sup>	0,08	Fe <sup>2+</sup>	0,06
FeO	0,80	0,12	0,73	0,19	Fe <sup>2+</sup>	0,58	0,52	K <sup>+</sup>	0,56	Na <sup>+</sup>	3,56
MgO	0,21	0,03	0,58	0,10	Mg <sup>2+</sup>	0,27	0,73	P <sup>5+</sup>	0,02	CARGAS	8,23
MnO	<0,03	—	<0,03	—	Ti <sup>4+</sup>	0,075	0,085	C <sup>4+</sup>	0,29		
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,02	0,13	0,01	Ca <sup>2+</sup>	0,49	0,57	Ti <sup>4+</sup>	0,01		
CaO	0,52	0,06	0,62	0,14	K <sup>+</sup>	4,82	5,38	OH <sup>-</sup>	4,92		
K <sub>2</sub> O	4,30	0,24	4,85	0,47	Na <sup>+</sup>	6,06	2,50	CARGAS	8,16		
Na <sub>2</sub> O	3,63	0,44	1,52	0,75	P <sup>5+</sup>	0,22	0,24				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30	0,05	0,34	0,04	C <sup>4+</sup>	0,15	0,44				
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,18	0,06	0,26	0,08	OH <sup>-</sup>	5,34	10,26				
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,93	0,15	1,81	0,26	O <sup>=</sup>	154,66	149,74				
CO <sub>2</sub> T	0,13	0,06	0,38	0,27	M: Muestras. Gr.: Granito. Alter.: Alterado.						
F <sup>-*</sup>	0,15	0,04	0,14	0,02	C.: Celdilla.						

Tabla 2.—Contenido medio en elementos traza

Elem. (ppm)	Muestras de sondeos			
	Granito sano (77 M)		Granito alterado (21 M)	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
Ba.....	64	41	92	51
Sr.....	<5	—	<5	—
Rb.....	473	27	541	44
Li.....	179	37	214	63
Zn.....	67	18	48,4	7,1
V.....	5,2	0,4	5	0,1
Sn.....	16,8	3,4	17,6	7,5
Y.....	5,7	1,9	6,5	0,8
Zr.....	60	6,7	66	7,3
Ce.....	11,9	4,9	19,4	4
La.....	<5	—	<5	—
Th.....	7,2	1	8,5	0,90
U.....	16,5	3,7	18,6	6,4

Los elementos traza indican que los procesos hidrotermales fueron acompañados con un aporte de Ba, probablemente precipitado en forma de barita; Rb, ubicado en la sericita neoformada, y Li, probablemente también en la sericita. El Ce y el U parecen aumentar muy ligeramente en el granito alterado.

Los efectos de los procesos supergénicos de alteración sobre el granito hidrotermalmente alterado se han estudiado en la zona N de la galería de la mina (ver fig. 3). El estudio se ha realizado siguiendo el

mismo método que en el caso anterior, comparando la celdilla elemental correspondiente al granito hidrotermal y supergénicamente alterado de la galería (tabla 3) con la del granito hidrotermalmente alterado de los sondeos, exento de alteración supergénica (tabla 1). Dicha comparación pone de manifiesto que, en ambos casos, los elementos que participan en los procesos de alteración hidrotermal son fundamentalmente los mismos, pero en proporciones diferentes. Esto último se debe a que las muestras de la galería están menos alteradas hidrotermalmente que la de los sondeos. La diferencia más acusada entre el balance geoquímico de ambas celdillas está en que, en la galería, hay pérdida de P y Ca, debida probablemente a la alteración supergénica. Otra diferencia apreciable es la mayor ganancia de Fe<sup>3+</sup> en la galería que en los sondeos, lo que también es atribuible a los efectos supergénicos de alteración.

Respecto al efecto de la alteración supergénica sobre los elementos traza (tabla 4), se puede decir que los únicos elementos que presentan un comportamiento distinto en relación al granito alterado sólo hidrotermalmente son el Rb y Li, que disminuyen en la galería, y el Zn, que aumenta. La disminución de los dos primeros, que son altamente solubles, puede explicarse por la lixiviación supergénica, mientras que el aumento del Zn se explicaría porque las muestras analizadas están tomadas en la proximidad del dique de cuarzo, mineralizado por esfalerita. Este mineral pudo haberse formado también en el granito próximo al dique durante la segunda fase hidrotermal. Esto explicaría a su vez el valor alto de  $\sigma$ .

Tabla 3.—Composición química del granito fresco e hidrotermal + supergénicamente alterado (elementos mayores y balance geoquímico)

Oxidos %	Composición química media				C. media elemental	Celdillas elementales de Barth		Balance geoquímico			
	Galería					Galería		Galería			
	Gr. sano (15 M)		Gr. alter. (9 M)			Gr. sano	Gr. alter.	Gr. sano ganancias		Gr. alterado pérdidas	
$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$								
SiO <sub>2</sub>	75,25	0,19	75,23	0,59	Si <sup>4+</sup>	64,66	64,27	Fe <sup>3+</sup>	0,22	Si <sup>4+</sup>	0,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,56	0,17	13,64	0,30	Al <sup>3+</sup>	13,73	13,73	Mg <sup>2+</sup>	0,30	Fe <sup>2+</sup>	0,17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,41	0,05	0,51	0,11	Fe <sup>3+</sup>	0,27	0,49	K <sup>+</sup>	0,42	Ti <sup>4+</sup>	0,01
FeO	0,75	0,10	0,52	0,17	Fe <sup>2+</sup>	0,54	0,37	C <sup>4+</sup>	0,165	Na <sup>+</sup>	2,24
MgO	0,16	0,04	0,39	0,18	Mg <sup>2+</sup>	0,20	0,50	OH <sup>-</sup>	2,48	P <sup>5+</sup>	0,01
MnO	<0,03	—	<0,03	—	Ti <sup>4+</sup>	0,06	0,05	CARGAS	4,82	Ca <sup>2+</sup>	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,02	0,08	0,01	Ca <sup>2+</sup>	0,43	0,39			CARGAS	4,31
CaO	0,47	0,04	0,39	0,03	K <sup>+</sup>	4,88	5,30				
K <sub>2</sub> O	4,36	0,18	4,79	0,53	Na <sup>+</sup>	5,34	3,10				
Na <sub>2</sub> O	3,21	0,23	1,87	0,81	P <sup>5+</sup>	0,21	0,20				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,29	0,03	0,28	0,03	C <sup>4+</sup>	0,14	0,30				
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,26	0,01	0,51	0,15	OH <sup>-</sup>	4,92	7,40				
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,86	0,10	1,30	0,36	O <sup>=</sup>	155,08	152,60				
CO <sub>2</sub> T	0,12	0,02	0,26	0,31	* Valor medio de 4 muestras.						
F <sup>-*</sup>	0,22	0,01	N.D.	N.D.	M: Muestras.						

Tabla 4.—Comparación entre el contenido medio en elementos traza del granito alterado de la galería y los sondeos

Elementos (ppm)	Galería				Sondeos			
	Gr. sano (15 M)		Gr. alterado (9 M)		Gr. sano (77 M)		Gr. alterado (21 M)	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
Ba	28,8	9,9	47,0	13,5	64	41	92	51
Sr	5,5	1	8,2	1,9	<5	—	<5	—
Rb	489	92,5	468,5	34	473	27	541	44
Li	219,3	30,5	133	34,7	179	37	214	63
Zn	88,5	8,6	121	77	67	18	48,4	7,1
V	5,5	0,4	5,7	0,45	5,2	0,4	5	0,1
Sn	ND	—	ND	—	17,8	3,4	17,6	7,5
Y	6,3	0,9	7,3	1,25	5,7	1,9	6,5	0,8
Zr	63,3	2,9	63,5	3	60	6,7	66	7,3
Ce	22,5	6,1	26,9	1,5	11,9	4,9	19,4	4
La	5,9	1	7,4	1,3	<5	—	<5	—
Th	7,8	1,3	8,7	0,9	7,2	1	8,5	0,9
U	16,7	3	22	13,5	16,5	3,7	18,6	6,4

Por lo que se refiere al U, las muestras de la galería están muy enriquecidas en dicho elemento, lo que se explica por la presencia constante de autunita, producto de alteración supergénica de los minerales primarios de U, pechblenda y coffinita. No obstante, el valor de  $\sigma$  es muy alto debido a que las muestras están muy desigualmente mineralizadas, existiendo algunas cuyo contenido es superior a cuatro veces el valor medio del granito sano, y otras la mitad de dicho valor medio. Estas últimas muestras, estudiadas mediante trazas de fisión (Pérez del Villar *et al.*, en prensa), ponen de manifiesto que el U ha sido intensamente lixiviado por efecto de las aguas

percolantes. Este proceso podría explicar la pérdida de P y Ca observado en la celdilla elemental, ya que son los elementos que, junto al U, forman la autunita.

#### *El filón de cuarzo mineralizado y los procesos de formación y alteración*

Los procesos más importantes identificados en el filón de cuarzo son: la formación del propio filón y las salbandas arcillosas, la formación de la mineralización uranífera y la alteración supergénica sobre el conjunto.

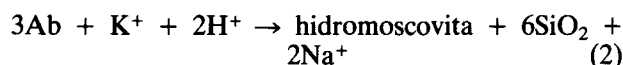


La formación del filón de cuarzo y las salbandas arcillosas está relacionada con la fase de fracturación tardihercínica de dirección N110°E y con el hidrotermalismo convectivo asociado a ella. El estudio mineralógico y geoquímico realizado sobre los materiales arcillosos y el cuarzo (Pérez del Villar *et al.*, 1992b), sugiere que el proceso de formación podría ser el siguiente:

La interacción entre las harinas de falla y las aguas hidrotermales ácidas, enriquecidas en KCl y a una temperatura comprendida entre 70°-120° (datos obtenidos por EDX y  $\delta^{18}\text{O}$  de las arcillas y del cuarzo), daría lugar a las transformaciones mineralógicas siguientes: a) total sericitización de la biotita, por lavado de Fe y Mg; b) fuerte sericitización del FdK, de acuerdo con la reacción:



c) sericitización total de la albita, según la reacción:



El  $\text{K}^+$  liberado en (1) facilitaría la reacción (2), la  $\text{SiO}_2$  liberada en (1) y (2) sería suficiente para formar el filón de cuarzo, y el  $\text{Na}^+$  libre en (2) se solubilizaría en la solución resultante, migrando hacia zonas más superficiales actualmente erosionadas. En la zona estudiada no se han observado minerales neoformados con Na en su composición.

Los sulfuros que acompañan al cuarzo (BPGC) procederían del propio granito, previamente removilizados, redepositados junto al cuarzo en ambiente reductor.

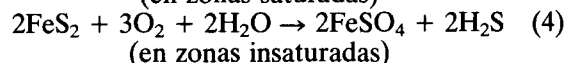
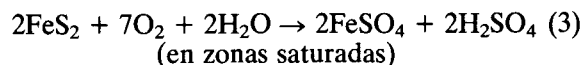
Durante este proceso de baja temperatura se produciría la segunda fase importante de removilización y migración de los elementos análogos: U, Th y TR, procedentes de la uraninita, monacita, torita, apatito y xenotima, para reprecipitar, en las salbandas arcillosas, como geles silicatados complejos de Ca, Ce, Y y TR, y fosfoaluminosilicatos de U, Th y TR, detectados por MEB + EDX.

Este proceso de alteración, pero con menor intensidad, sería el responsable de la alteración del granito afectado por las fracturas N100°-110°E, y del ligero aumento en U y Ce observado en él.

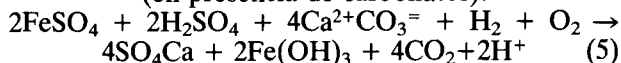
La formación de la mineralización uranífera, circunscrita a la salbanda N del filón de cuarzo y, en menor intensidad, en el granito hidrotermalmente alterado que se localiza al N del filón, se ha interpretado de acuerdo con las siguientes fases:

La primera fase consistiría en la interacción entre el granito tectonizado y fértil en U con aguas meteóricas enriquecidas probablemente en  $^{12}\text{CO}_2$ - $\text{H}^{12}\text{CO}_3^-$  o  $\text{H}^{12}\text{CO}_3^-$ - $^{12}\text{CO}_3^{-2}$ , en función del pH (la determi-

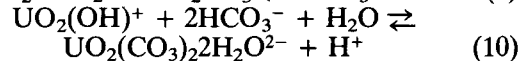
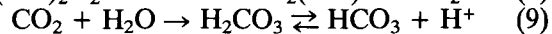
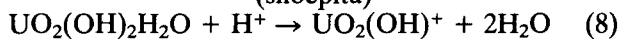
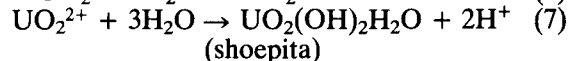
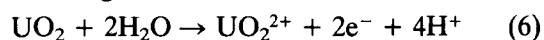
nación de la  $\delta^{13}\text{C}$  en los carbonatos asociados a la mineralización está en curso). La infiltración de estas aguas provocaría la oxidación de los sulfuros diseminados en el granito según las reacciones:



(en presencia de carbonatos):



Esta reacción controlaría el pH y  $\text{P}_{\text{CO}_2}$ , pudiéndose generar soluciones ligeramente ácidas (pH  $\approx$  6) y oxidantes, capaces de oxidar y disolver la uraninita del granito, según las reacciones:



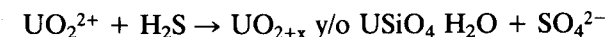
El complejo uranil-dicarbonato es estable en soluciones débilmente ácidas y alcalinas, entre 25° y 200° C.

La segunda fase iría precedida por la reactivación de las fracturas N110°E, el recalentamiento (100°-50° C) en profundidad de las soluciones uraníferas débilmente alcalinas y la reactivación de las cel-das convectivas.

La tercera fase correspondería al ascenso de las soluciones mineralizadoras y a la formación de la mineralización que, por su distribución espacial, parece haber sido controlada por el propio dique de cuarzo, que habría actuado como una barrera paleohidrogeológica hacia el S. Los procesos geoquímicos y mineralogénicos que se pudieron producir fueron:

a) Desestabilización del complejo uranil-dicarbonato por pérdida de presión y temperatura:  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-} \rightarrow \text{UO}_2^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$ .

b) Reducción del catión uranilo por la presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  y precipitación de la pechblenda y/o coffinita en función de la  $[\text{SiO}_4^{4-}]$ .



Aunque la procedencia del  $\text{H}_2\text{S}$  es incierta, la reactivación de las fracturas pudieron provocar emanaciones de dicho gas, de origen más profundo, y que se incorporaría a las soluciones hidrotermales.

c) Precipitación de los carbonatos tipo ankerítico, hasta con 4 % de MnO.

d) Precipitación de la barita, la pirita y algo de cuarzo.

El valor estimado del Eh, basado en la coexistencia de la pirita y barita (Krivovichev, 1979), estaría comprendido entre  $-200$  a  $-300$  mV. Este valor y el medio ligeramente alcalino serían coherentes con el campo de estabilidad de la pechblenda, coffinita y pirita, a bajas o muy bajas temperaturas ( $< 100^\circ$  C). En consecuencia, el proceso mineralizador podría ser considerado como el tercer proceso análogo de removilización, migración y retención, por precipitación, del U.

Los procesos de alteración supergénica sobre las tres unidades diferenciadas en el filón se resumen así:

Sobre el propio dique de cuarzo se ha observado la oxidación de los sulfuros a goethita y covellina, así como la precipitación de oxi-hidróxidos de Fe y jarosita. Este último mineral está de acuerdo con el valor del pH de las aguas percolantes, que puede llegar a ser de  $\approx 3$ . Estas aguas son sulfáticas y con altos contenidos en elementos traza (Turrero y Gómez, 1990).

Sobre la mineralización uranífera se produjo: i) La oxidación de la pirita de acuerdo con las reacciones (3) y (4) y, consecuentemente la precipitación de yeso y oxi-hidróxidos de Fe, de acuerdo con (5). ii) La oxidación y disolución de la pechblenda a  $UO_2^{++}$  que, en presencia de  $PO_4^{-3}$ , Cu, Ba y Ca, daría lugar a la formación de torbernita, uranocircita y autunita. iii) La disolución de los carbonatos ricos en Fe y Mn originó la concentración de oxi-hidróxidos de Fe y Mn observable actualmente en la zona más mineralizada del crucero de la galería de la mina.

Sobre las salbandas arcillosas se produjo la degradación de la hidromoscovita y sericita preexistentes a illita, beidellita, caolinita, gibbsita, oxi-hidróxidos de Al y geles de Si y Al, por intenso lavado del K<sup>+</sup> y de la sílice. Idéntica mineralogía y procesos se han identificado en las arcillas cortadas por los sondeos a  $\approx 100$  m de profundidad.

El contenido en Th y U de la fracción  $< 2 \mu\text{m}$  del material arcilloso de las salbandas del dique, así como la distribución mineralógica del U, obtenida

por lixiviación secuencial (Airey *et al.*, 1987), se resumen en la tabla 5.

De los datos de esta tabla se llega a las conclusiones siguientes:

a) Los materiales arcillosos de las salbandas están muy enriquecidos en U y Th respecto al granito del que proceden. El U procedería en su mayor parte de la mineralización uranífera epitermal, mientras que el Th, ausente en dicha mineralización, procedería solamente del granito, y está concentrado en las arcillas en forma de los geles anteriormente descritos y en la monacita heredada del granito.

b) Aproximadamente los 2/3 del U total ( $U_T$ ) se encuentra formando mineral discretos de U, principalmente fosfatos de uranilo, insolubles en las distintas fases de lixiviación.

c) La mayor parte del U lábil ( $U_L$ ) está asociado a los oxi-hidróxidos de Fe amorfos.

d) La cantidad de U como catión de cambio en la fracción  $< 2 \mu\text{m}$  es  $< 0,1$  ppm, lo que indica que estas arcillas tienen poca capacidad de retención, por adsorción del U, o bien que los procesos de percolación de las aguas meteóricas, ligeramente acidificadas, han provocado el proceso de desorción.

e) La presencia de  $CO_3^{=}$  en la fracción  $< 2 \mu\text{m}$  ha sido detectada por MEB + EDX y se han interpretado como restos sin disolver y protegidos por los mismos minerales de la arcilla.

En definitiva, los oxi-hidróxidos de Fe y los  $PO_4^{3-}$  del medio son los responsables máximos de la retención del U.

### Resumen y conclusiones

Los resultados obtenidos hasta el momento han permitido definir y clasificar los procesos geoquímicos y mineralogénicos que, por haber removilizado/reprecipitado el U, Th y algunas TR, pueden ser considerados como procesos análogos y, por ello, objeto de un estudio más focalizado e intenso. Estos procesos son:

Tabla 5.—Contenidos en Th y U de la fracción  $< 2\mu$  del material arcilloso de las salbandas N y S del dique mineralizado y distribución mineralógica del uranio

Muestras	Th <sub>T</sub> ppm	U <sub>T</sub> ppm	ΣU <sub>L</sub> ppm	U <sub>F</sub> ppm	% U <sub>L</sub>	% U <sub>L</sub>		
						% en CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	% en Fe amorfos	% en Fe cristalinos
S-S .....	17	50,9	17,7	33,2	34,77	2,16	13,36	1,96 (1)
S-N.....	14	93,3	27,2	66,1	29,15	2,42	22,83	3,86

S-S: Salbanda Sur. S-N: Salbanda Norte. T: Total. L: Lábil. F: Fijo.

(1) El % restante hasta 34,77% fue lixiviado con agua destilada.

1. El proceso que produjo la primera removilización del U es el denominado deutérico y/o tardimagmático. A pesar de que la temperatura a la que se produjo dicho proceso pudo ser muy superior a la esperada en un almacenamiento de RRAA, debe ser estudiado con detenimiento por dos razones: una, por ser un ejemplo de alteración de la uraninita, mineral análogo al combustible gastado, y de migración del U a corta distancia y por microfisuras; y otra, porque el efecto de dicho proceso debe tenerse en cuenta para poder interpretar los procesos posteriormente superpuestos.

Paralelamente al estudio de la movilización y migración del U, se estudiarán también los mismos procesos para el Th y las TR, elementos ubicados en los minerales accesorios más resistentes, pero que también fueron alterados durante este proceso.

2. La formación del dique de cuarzo y los procesos de sericitización-hidromoscovitzación inducidos en las harinas de falla son los resultados de un proceso hidrotermal de baja temperatura (70°-120° C), que indujo la alteración del granito adyacente, de los minerales accesorios portadores de U, Th y TR, así como la movilización, migración y retención de dichos elementos en las fases minerales neoformadas. El estudio de este proceso proporcionará datos de interés sobre la migración de elementos análogos, a baja temperatura, a través de la propia matriz rocosa.

Necesariamente este estudio ha de realizarse en muestras de granito procedentes de las inmediaciones de una fractura N100°-110°E, y en la que no se observe el proceso mineralizador posterior de pechblenda.

3. El estudio más detallado del propio proceso hidrotermal que produjo la mineralización de U proporcionará también datos de interés sobre los procesos de transporte y depósito de dicho radioelemento, a temperaturas aún más bajas que las estimadas para la formación del dique de cuarzo.

4. Los procesos supergénicos subactuales que afectaron al granito sano, al hidrotermalmente alterado, mineralizado o no con U, así como sobre el propio dique mineralizado, son ejemplos excelentes de la migración/retención del U a temperatura ambiente y en distintas condiciones de pH y Eh. Este punto sería el eslabón de enlace con el estudio de la migración del U en las condiciones actuales.

Finalmente, conviene apuntar que, si bien el estudio de estos procesos análogos es una vía importante para obtener datos cualitativos y, en algunos casos, semicuantitativos (p. ej., el balance de masas), aplicables a un sistema geoquímico tan complejo como el que puede llegar a ser un almacenamiento de RRAA, existen problemas difícilmente solucionables. Entre ellos, estaría la duración de los procesos

naturales de removilización, migración y retención de los radionucleidos naturales. Aunque para estimar esta variable puede ser útil la datación absoluta de los distintos procesos, dicha edad representaría, en el mejor de los casos, la del final del proceso o del cierre del sistema para el geocronómetro empleado. No obstante, la combinación entre los métodos isotópicos de datación y de las trazas de fisión fósiles en apatito y circón puede aportar datos muy aproximados sobre la duración de los procesos naturales análogos, y que pueden ser directamente utilizables en la modelización del sistema.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del convenio 18/1991 entre CIEMAT y ENRESA titulado «Investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la migración de radionucleidos y comportamiento de barreras naturales y artificiales frente a la migración», y con la colaboración de todos y cada uno de los miembros de la División de Técnicas Geológicas y Químicas del CIEMAT.

#### Referencias

- Airey, P. L., Duerden, P., Roman, D., Golian, C., Nightingale, T., Davey, B. G., Gray, D., Fabryka-Martin, J., Curtis, D. B., Snelling, A., Lever, D. A. y Shirvington, P. J. (1987). Radionuclide Migration Around Uranium Ore Bodies-Analogues of Radioactive Waste Repositories. USNRC Contract NRC-04-81-172. Annual Report, 1984-1985, AAEC Report C-55, 140 págs.
- Arribas, A. (1965). Mineralogía y Metalogía de los yacimientos de uranio. «El Berrocal», Escalona (Toledo). *Notas y Comunicaciones*, 77, 67-92.
- Barth, T. F. W. (1948). Oxigen in rocks: a basis for petrographic calculations. *J. Geol.*, 56, 50-60.
- Brookins, D. G. (1976). Shale as a repository for radioactive waste: evidence from Oklo. *Environ. Geol.*, 1, 255-259.
- (1984). *Geochemical aspects of radioactive waste disposal*, Springer-Verlag, New York, 347 págs.
- (1987). Sandstone uranium deposits: analogues for SURF disposal in some sedimentary rocks. *Natural Analogues in Radioactive Waste Disposal*, Preprint of Symposium Proceedings. CEC Brussels, 28-30th April, vol. 2, 14 págs.
- Cramer, J. J. (1986a). Sandstone-hosted uranium deposits in northern Saskatchewan as natural analogs to nuclear fuel waste disposal vaults. *Chem. Geol.*, 55, 269-279.
- (1986b). A natural analogue for a fuel waste disposal vault. 2nd. Int. Conf. Radioactive Waste Management, Can. Nuclear Soc., September 7-11, 1986, Proc. 697-702.
- Cramer, J. J., Vilks, P. y Larocque, J. P. A. (1987). Near-field analog features from the Cigar Lake uranium deposit. *CEC Symposium on Natural Analogues in Radioactive Waste Disposal*, Brussels, April 28-30, 1987.
- Chapuis, A. M. y Blanc, P. L. (1992). Oklo, analogue naturel de stockage de déchets radioactifs. Rapport d'Avancement Janvier-Décembre 1991. Contract avec la CCE FI 2W-CT91-0071. CEA (SERGD).
- Doblas, M. M. (1990). *Estudio de las deformaciones tardihercínicas de los granitoides de un sector del Sistema Cen-*

- tral Español (Zona Central de Gredos y áreas adyacentes)*. Colección Tesis Doctorales de la Universidad Complutense de Madrid, n.º 59/90, 465 págs.
- Friedrich, M. H. y Cuney, M. (1989). Uranium enrichment processes in peraluminous magmatism. *Uranium deposits in magmatic and metamorphic rocks*, Procc. Tech. Comm. IAEA Meeting, Salamanca, 11-35.
- Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribero, D. y Conde, L. (1972). Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. E. 1:10<sup>6</sup>. Inst. Geol. Mim. de España, Madrid.
- Krivovichev, V. G. (1979). The paragenesis of minerals and analysis of mineral equilibrium in barite and barite polymetallic ore deposits. *Minerals and mineral paragenesis in rocks and ores* (Rundkvist, D. V., edit.). Leningrad, Izdatel'stvo Nauka, Leningradskoe Otdelenie, 45-60.
- La Roche (1964). Sur l'expression graphique des relations entre la composition chimique et la composition minéralogique quantitative des roches cristallines. *Sci. de la Terre*, 11, 293-337.
- McConnell, D. B. y Cramer, J. J. (1987). Simulating the movement of radium and lead away from the Cigar Lake uranium deposit. *CEC Symposium on Natural Analogues in Radioactive Waste Disposal*, Brussels, April, 28-30, 1987.
- Ménager, M. T., Parneix, J. C., Petit, J. C. y Dran, J. C. (1988). Migration of U, Th and REE in a fossil intragranitic geothermal system: implications for the mobility of actinides around a radwaste disposal. *Radiochim. Acta*, 44-45, 291-297.
- Ménager, M. T., Menet, C. y Petit, J. C. (1992). Dispersion of U, Th and REE by water-rock interaction around an intragranitic U-vein, Jalerys Mine, Morvan, France. *Appl. Geochem.*, Suppl. Issue n.º 1. «Geochemistry of Radioactive Waste Disposal a French Contribution», 239-252.
- NAGRA, SKB, UK DOE y US DOE (1991). Poços de Caldas Project. Report Series, n.º 1 to n.º 15, Switzerland, Sweden, United Kingdom and United States of America.
- Ochiai, Y., Yamakawa, M., Takeda, S. y Harashima, F. (1989). A natural analogue study on Tono uranium deposit in Japan. CEC natural analogue working group 3rd meeting, Snowbird near Salt Lake City (USA), 15-17 June 1988, Final Report, 126-138.
- OECD, NEA y ANSTO (1992). Alligator River Analogue Project (A RAP). *5th CEC Natural Analogue Working Group Meeting and Alligator River Analogue Project Final Workshop*, Toledo, Spain, 5-9 October 1992 CEE Pre-print.
- Pérez del Villar, L. y De la Cruz, B. (1989). Caracterización mineralógica y geoquímica del granito sano y alterado del macizo de El Berrocal (Sierra de Gredos, provincia de Toledo). *Stud. Geol. Salmant.*, 26, 47-80.
- Pérez del Villar, L., De la Cruz, B. y Cózar, J. S. (1990). Estudio mineralógico, petrográfico y geoquímico del granito de El Berrocal (S. Gredos, provincia de Toledo). Informe inédito. CIEMAT, Madrid, 72 págs.
- Pérez del Villar, L. y Pardillo, J. (1992). Lithological Map of the «El Berrocal» Site (Sierra de Gredos, provincia de Toledo). EB-CIEMAT-(92)-46(1). Topical Report, Madrid, 23 págs.
- Pérez del Villar, L., De la Cruz, B., Pardillo, J. y Cózar, J. S. (1992a). Cálculo de la distribución mineralógica del uranio y torio en el granito sano del plutón de El Berrocal (Sierra de Gredos, provincia de Toledo). *Bol. Soc. Esp. Min.*, 15, 123-136.
- Pérez del Villar, L., De la Cruz, B., Cózar, J. S., Pardillo, J., Gómez, P. y Turrero, M. J. (1992b). The clayey materials associated with N100-110E fractures at the «El Berrocal» site (Gredos, Spain). Genesis and U, Th and other elements retention capacity, CIEMAT, Topical Report EB-CIEMAT(92)34, 50 págs.
- Pérez del Villar, L., De la Cruz, B., Pardillo, J., Pelayo, M., Turrero, M. J., Gómez, P. y Rivas, P. (1993). Preliminary litho-geochemical model of the «El Berrocal» site (Sierra de Gredos, provincia de Toledo). EB-CIEMAT(93)-6, Topical Report, Madrid, 58 págs.
- Pérez del Villar, L., Ménager, M. T., De la Cruz, B., Pardillo, J. y Cózar, J. S. (en prensa). Uranium distribution in relation to the mineralogical and geochemical characteristics of the El Berrocal granite. An experimental site, Spain (Proceedings of Migración 93, Carolina del Sur, EE.UU.).
- Pérez del Villar, L., Sanz, H. G., Quejido, A. J., Lalleña, P. P., Fernández-Díaz, M., Pardillo, J. (en prensa). Datación absoluta del plutón granítico de El Berrocal por el método Rb-Sr (Sierra de Gredos, provincia de Toledo, España) (Rev. Soc. Geol. España. En revisión).
- Piantone, P. y Sureau, J. F. (1991). Hydrothermal alteration systems as analogues of nuclear waste repositories in granitic rocks: The mineralized vein at Fombillou (Lot), France. *Source, Transport and Deposition of Metals* (Pagel y Leroy edit.) Balkema, Rotterdam, 113-116.
- Seo, T., Ochiai, Y., Takeda, S. y Nakatsuka, N. (1989). A natural analogue study on Tono Sandstone-type uranium deposit in Japan. Proceedings of the 1989 joint international waste management conference, 22-28 octubre 1989, Kyoto (Japan), 2, 353-358.
- Seo, T. y Yoshida, H. (1992). Natural analogue studies of the Tono uranium deposit in Japan. *5th CEC Natural Analogue Working Group Meeting and Alligator River Project*. Final Workshop, Toledo, Spain, 5-9 octubre 1992, CEE Pre-print.
- Streckeisen, A. (1974). Classification and nomenclature of plutonic rocks. Recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geol. Rundschau*, 63, 773-785.
- Turrero, M. J. y Gómez, P. (1990). Estudio hidroquímico de las aguas de «El Berrocal». Informe CIEMAT, 98 págs.
- Ubanell, A. G. y Doblas, M. M. (1988). Los diques aplíticos deformados de Paredes de Escalona-Navamorcuende (SW del Sistema Central Español), su relación con la intrusión. *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*, ed. Rueda, Madrid, 393-403.
- Varea, R. e Iglesias, A. (1981). Proyecto «Río Alberche». Investigación de U en los materiales graníticos de un sector del Sistema Central. Informe Previo 281/6, t. 1 y 2, 131 y 252 págs. ADARO-JEN.
- Yoshida, H., Yui, M. y Shibtani, T. (1991). A study of influence factor on uranium fission in the Tono uranium deposit. PNC technical report, PNC TN7410 91-061.