

## LAS MINERALIZACIONES DE URANIO EN EL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVÁQUICO DEL ÁREA ACEHUCHE-CECLAVÍN (PROVINCIA DE CÁCERES): UNA HIPÓTESIS GENÉTICA

L. PÉREZ DEL VILLAR\*

**RESUMEN.**— En este trabajo se propone una hipótesis genética para las mineralizaciones peribatolíticas de uranio Acehuche-Ceclavín, concebida a partir de sus características metalogénicas, las correlaciones establecidas entre aquéllas y las de la provincia de Salamanca y de datos geológicos, paleográficos y geotérmicos regionales.

Se sugiere que el U procede de las pizarras encajantes y/o de posibles yacimientos peribatolíticos más antiguos, puesto en solución por aguas meteóricas descendentes, bicarbonatadas, ligeramente ácidas y enriquecidas en  $^{12}\text{C}$ . Estas aguas procederían de perfiles edáficos y/o ambientes continentales de sedimentación finicretácicos, enriquecidos en materia orgánica húmica y propios de climas subtropicales.

La mineralización de U es epitermal y se originó probablemente durante el ascenso de las soluciones mineralizantes, las cuales fueron movilizadas por los efectos térmicos e hidráulicos relacionados con la Fase Pirenáica de la Orogenia Alpina.

Se señalan los procesos físico-químicos probables que intervinieron en el depósito de la mineralización uranífera, y se sugiere que las manifestaciones hidrotermales actuales de las provincias de Cáceres, semejantes a las de Salamanca, representarían los vestigios geotérmicos responsables de la formación de las mineralizaciones estudiadas. Las características físico-químicas de estas aguas termales serían aproximadamente las de las soluciones mineralizantes después de haber depositado su carga metálica, transportada en solución.

**ABSTRACT.**— A genetic hypothesis is proposed for the uraniferous peribatholithic mineralizations of the Acehuche-Ceclavín area. This hypothesis is based on their metallogenic characteristics, on the correlations established between the former deposits and the ones from the province of Salamanca and on regional geological, paleographic and geothermal data.

It is assumed that the U comes from the host shales and/or from possibly older peribatolithic deposits, leached by descending meteoric, bicarbonated, slightly acid and  $^{12}\text{C}$ -enriched waters. These waters would come from edaphic profiles and/or

\* Departamento de Tecnología Geológica del C.I.E.M.A.T. (Madrid).

continental sedimentation environments, corresponding to the Mesozoic-Tertiary transition, enriched in humic organic matter and typical of subtropical climates.

The U mineralization is epithermal and was probably originated by ascending mineralized solutions, which were mobilized by thermal and hydraulic effects associated with the Pyrennaic phase of the Alpine Orogeny.

The probable physico-chemical processes present during the deposition of the U ore are pointed out, and it is suggested that the present hydrothermal manifestations in the province of Cáceres, similar to the ones from Salamanca, would represent residual geothermal phenomena, responsible for the formation of the studied mineralizations.

The physico-chemical characteristics of these thermal waters would be more or less like the ones from the mineralizing solutions, once they have deposited their metallic load, transported by solution.

## 1. INTRODUCCIÓN

En trabajos anteriores (PÉREZ DEL VILLAR y RODA, 1984; PÉREZ DEL VILLAR y MORO, 1988; MINGARRO et al., 1988; PÉREZ DEL VILLAR, 1988 y PÉREZ DEL VILLAR y MORO, a, b, c en este vol.) se han descrito las características aeromagnéticas, aerorradiométricas, geológicas y geoquímicas de la zona del Complejo Esquisto-Grauváquico (C.E.G.), donde se encuentran las mineralizaciones de U del área Acehuche-Ceclavín. Igualmente, se han descrito las características metalogénicas de estas mineralizaciones, y establecido las semejanzas entre ellas y otras del mismo tipo, situadas en contextos geológicos semejantes de Europa y América del Norte.

Con este trabajo se pretende establecer, a modo de hipótesis, un modelo que explique la génesis de las mineralizaciones de U estudiadas, así como su posible relación, directa o indirecta, con el batolito de Cabeza de Araya, el cual está próximo a ellas, es en parte fértil en U y en el que se encuentran mineralizaciones intrabatolíticas de dicho elemento (PÉREZ DEL VILLAR, 1988).

Para ello se han tenido en cuenta, además, los datos obtenidos por MANGAS y ARRIBAS (1984), ARRIBAS (1985), MARTÍN-IZARD (1985) y SAINT-ANDRE (1986) para las mineralizaciones del mismo tipo de la provincia de Salamanca, así como otros datos geológicos, paleogeográficos y geotérmicos regionales.

## 2. SUMARIO DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y METALOGÉNICAS DE LAS ROCAS ENCAJANTES Y LAS MINERALIZACIONES ESTUDIADAS

Las principales características de las mineralizaciones de U que se encuentran en el C.E.G. del área Acehuche-Ceclavín se resumen de la siguiente manera:

— Las anomalías aeroradiométricas de U eq. están situadas en la zona delimitada por las fallas de Plasencia y del río Alagón. Están alineadas en dirección N120E y en las proximidades de una anomalía magnética que, con la misma dirección, se ha interpretado como debida a la existencia de una fractura de cizalla siniestra, situada inmediatamente al N del contacto entre el batolito de Araya y el C.E.G. Esta fractura, hacia el O, transcurre por el pasillo existente entre el citado batolito y el de Zarza la Mayor (PÉREZ DEL VILLAR, 1988).

— El mapa aeroradiométrico de U eq. pone también de manifiesto la existencia de conexiones entre las anomalías correspondientes a las mineralizaciones intra y peribatolíticas. Estas conexiones se verifican mediante pasillos anómalos, más o menos continuos y en dirección NNE (PÉREZ DEL VILLAR, 1988 y PÉREZ DEL VILLAR y MORO, 1988).

— No existen anomalías de U eq. fuera del tramo de pizarras más próximo al granito. La anomalía más distante es la correspondiente al indicio del Piojo, situado a unos 4 km del contacto granito-pizarras.

— Las mineralizaciones de U se encuentran en las pizarras del C.E.G., independientemente de que éstas estén o no afectadas por el metamorfismo térmico inducido por el batolito de Cabeza de Araya, el cual es, en parte, fértil en U (PÉREZ DEL VILLAR, 1988).

— En relación con el sistema de desgarres tardihercínicos NNE, se desarrolló, en los materiales del C.E.G., un sistema conjugado de cizallas frágiles que, con dirección N120E y buzamientos inferiores a 30°, suelen estar rellenas por pequeños diques de cuarzo (PÉREZ DEL VILLAR y RODA, 1984 y PÉREZ DEL VILLAR, 1988).

— En el área estudiada, las mineralizaciones peribatolíticas de U se disponen en dichas fracturas subhorizontales, concretamente en la familia que buza hacia el NE, y en grietas de tensión asociadas genéticamente con ellas. En menor proporción, rellenan también pequeñas fracturas subverticales y subparalelas a la esquistosidad regional ( $S_1$ ).

— La morfología lenticular de dichas mineralizaciones está en consonancia con el carácter discontinuo de las fracturas y grietas de tensión en las que se encuentran.

— Al igual que los yacimientos de U de la provincia de Salamanca, los que aquí se han estudiado son subsuperficiales, alcanzando una profundidad máxima de unos 120 m.

— La paragénesis uranífera está constituida por pirita-marcasita, pechblenda-coffinita y carbonatos. Posteriormente, probablemente después de la reapertura de dichos filoncillos, se depositó calcita blanca, espática y con textura en peine.

— La mineralización uranífera es, a su vez, claramente posterior al cuarzo que rellena las fracturas subhorizontales, el cual suele estar previamente brechificado.

— Con posterioridad al emplazamiento de la mineralización, se desarrolló una fase de fracturación distensiva que reactivó las fracturas tardihercínicas subverticales NNE y N120E. Como consecuencia de esta fase tectónica, se produjo una compartimentación en bloques, los cuales, al bascular, se deslizaron a favor de las fracturas subhorizontales. Estos movimientos tardíos fueron probablemente los responsables de la brechificación y removilización parcial de la paragénesis uranífera, así como de la dispersión observada en las medidas de la dirección y del buzamiento de las fracturas subhorizontales (PÉREZ DEL VILLAR, 1988).

— La estructura bandeada y/o finamente laminada que presenta la paragénesis uranífera es propia de un depósito en zonas de remanso de los fluidos mineralizadores, lo que está de acuerdo con la subhorizontalidad de las fracturas que ocupa la mineralización. Este fenómeno ha sido descrito también por ARRIBAS (1985) y MARTÍN IZARD (1985) en los yacimientos de Fe y Alameda de Gardón, y por PÉREZ DEL VILLAR (1988) en el de Retortillo, todos ellos en la provincia de Salamanca.

— Las características mineralógicas y texto-estructurales de las mineralizaciones de Acehuche-Ceclavín, así como las características de la pechblenda, permiten correlacionar esta fase mineralizadora con la segunda de la mina Fe, definida por MARTÍN CALVO et al., (1988), o con la última de ARRIBAS (1985) y MARTÍN IZARD (1985).

— Desde el punto de vista geoquímico, las pizarras encajantes se caracterizan por contenidos elevados en  $U_3O_8$  ( $\bar{x} = 24$  ppm), la inexistencia de correlación entre el C org. y el U, y el carácter lábil, en condiciones oxidantes, ácidas o alcalinas, de aproximadamente el 50% de este último elemento.

— Por lo que se refiere a la mineralización, el U se encuentra asociado significativamente con el Pb e Y, por lo que parte del primero se ha considerado de origen radiogénico, mientras que el segundo, transportado como un complejo aniónico semejante al del U, se encontraría, como traza, en los minerales primarios de U o en los carbonatos acompañantes.

— Aún a falta de datos sobre las inclusiones fluidas de los carbonatos que acompañan a la pechblenda (investigación en curso), las características mineraló-

gicas de las mineralizaciones de Acehuche-Ceclavín permiten clasificarlas como epitermales. Además, la gran semejanza existente entre éstas y la de la mina Fe permite extrapolar también, a las primeras, los datos microtermométricos obtenidos, por MANGAS y ARRIBAS (1984), en los carbonatos acompañantes de la segunda.

— Respecto a la edad de las mineralizaciones estudiadas, a falta de datos geocronológicos, por carecer de muestras adecuadas, resulta igual de razonable extrapolar los obtenidos por SAINT-ANDRE (1986) —37 M.a.— para las pechblendas de la mina Fe y Alameda de Gardón, por lo que las mineralizaciones de Acehuche-Ceclavín se pueden considerar contemporáneas con aquellas. Es decir, del Oligoceno Inferior.

### 3. HIPÓTESIS GENÉTICA

#### 3.1. Sucesión de los procesos geológicos relacionados, directa o indirectamente, con la génesis de los yacimientos de U estudiados

Los procesos geológicos que, ordenados en el tiempo, pudieron influir, directa o indirectamente, en la formación de los yacimientos de U del área Acehuche-Ceclavín, serían los siguientes:

a) Durante la sedimentación de los materiales del C.E.G. se originaría una concentración singenética de U, a favor de los tramos más pelíticos y ricos en materia orgánica húmica, propios de un ambiente de depósito poco energético y anóxico.

b) Los procesos de deshidratación, recristalización, carbonización y grafitización incipiente, relacionados con la diagénesis y el metamorfismo, provocarían la liberalización del U acomplexado por la materia orgánica, y la desorción del adsorbido por los minerales de la arcilla y geles. Paralelamente, la materia orgánica evolucionaría a carbón y materia grafitoidea, por pérdida de  $\text{CH}_4$ , principalmente, y en menor proporción,  $\text{CO}_2$  (PÉREZ DEL VILLAR y MORO, en este vol. b).

La presencia de materia grafitosa y la ausencia de hematites en las pizarras del C.E.E., así como la existencia de piritita diagenética y la recristalización metamórfica de dicho sulfuro, indican que ambos procesos se desarrollaron en un medio con baja  $P_{\text{O}_2}$  y alta  $P_{\text{S}_2}$ . Así, el ambiente eminentemente reductor en que tuvieron lugar dichos procesos impediría que el U sufriera una removilización importante. En consecuencia, se puede pensar que durante la primera fase de meta-

morfismo dinamotérmico, o inmediatamente después de ella, el U pudo precipitar, como pechblenda y/o coffinita submicroscópicas, a favor de las zonas de debilidad de la roca, tales como las superficies de esquistosidad ( $S_1$ ). De esta manera se explicaría que parte del U contenido en las pizarras sea fácilmente lixiviable, y que no exista correlación alguna entre este elemento y el C org. de las pizarras.

c) Tras el desarrollo de la esquistosidad regional ( $S_1$ ) hizo intrusión el batolito granítico de Cabeza de Araya, en parte fértil en U. Los efectos de esta intrusión granítica sobre las rocas encajantes serían, de un lado, la fracturación y microfisuración de estas últimas, y de otro, la creación en ellas de un gradiente térmico importante, con la zona fría situada a una cierta distancia del límite más externo de la aureola de metamorfismo de contacto.

Como consecuencia de la tectonización y microfisuración, las rocas encajantes actuarían como un medio más permeable, que facilitaría la percolación de aguas oxidantes, capaces de removilizar y transportar, hacia zonas más profundas, el U libre de las pizarras. Por su parte, el gradiente térmico permitiría la movilización del U, por termodifusión iónica y sin renovación de fluidos (efecto Soret), para concentrarse en las zonas más frías del sistema. A su vez, el gradiente térmico y densimétrico de los fluidos daría lugar a corrientes convectivas laminadas, descendentes por el lado frío del sistema y ascendentes por el caliente, pudiendo originar así un aumento de la concentración de U, en la base del circuito, por el llamado efecto termogravitacional.

Este mecanismo, invocado por CONTESQUE et al. (1974) para explicar la formación de algunos yacimientos peribatolíticos, podría haber sido el responsable de, al menos, una reconcentración geoquímica importante de U en las pizarras, que, situada a cierta distancia de los batolitos graníticos, explicaría la formación posterior de los yacimientos peribatolíticos.

d) Los desgarres tardihercínicos de dirección NNE, probablemente de edad pérmica y considerados por PÉREZ DEL VILLAR (1988) como los máximos responsables de las mineralizaciones intrabatolíticas de U, pudieron originarlas también en las pizarras más próximas al batolito de Cabeza de Araya. En este sentido, el mapa aerorradiométrico de U eq. de la región muestra la existencia de conexiones entre las anomalías intra y peribatolíticas (PÉREZ DEL VILLAR, 1988 y PÉREZ DEL VILLAR y MORO, 1988). No obstante, mientras que en el dominio granítico las mineralizaciones uraníferas están encajadas en las fracturas NNE subverticales y en las subhorizontales asociadas a ellas (PÉREZ DEL VILLAR, 1988), en el C.E.G. sólo se han encontrado en el segundo tipo de fracturas. Además, la edad admitida para las mineralizaciones peribatolíticas no permite relacionarlas con dicha etapa tectónica, al menos que dichas mineralizaciones procedan de otras, más antiguas, hasta el momento desconocidas, tal y como ocurre en la región de La Vendée (CATHELINÉAU, 1982).

Por todo ello, no se descarta la posibilidad de que, en las pizarras del C.E.G. más próximas al batolito de Cabeza de Araya, existen mineralizaciones de U, más o menos importantes, asociadas directamente con los desgarres NNE, como ocurre en los granitos adyacentes. La ausencia de este tipo de filones en las pizarras del C.E.G. puede ser más aparente que real, lo que sería debido, por una parte, a la malla y verticalidad de los sondeos realizados durante la investigación, y por otra, el escaso desarrollo que previsiblemente pueden tener estas mineralizaciones en dichos materiales. La segunda razón estaría relacionada con el comportamiento mecánico de las pizarras frente al cizallamiento NNE, que sería más plástico que el de los granitos. Ello impediría el desarrollo de zonas de brecha lo suficientemente potentes y permeables como para dar lugar a mineralizaciones susceptibles de detectarse mediante los sondeos verticales realizados.

e) Tanto el batolito de Cabeza de Araya como los materiales del C.E.G. están atravesados por diques básicos que, con dirección NNE y del Jurásico Medio (SCHERMERHORN et al., 1978 y SCHOTT et al., 1981), suelen llevar asociadas, en superficie y en ambos dominios, pequeñas concentraciones de minerales secundarios de U. Ante tan escasos datos resulta difícil invocar una etapa de removilización del U relacionada con el emplazamiento de dichos diques.

f) De acuerdo con las correlaciones establecidas entre la mina Fe y las mineralizaciones aquí estudiadas, éstas se habrían formado en el Oligoceno Inferior, en relación con la fase pirenaica de la orogenia alpina.

## 3.2. Modelo Metalogénico

### 3.2.1. Roca fuente del uranio

De acuerdo con PÉREZ DEL VILLAR y MORO (1990b, en este vol.), el tramo de pizarras del C.E.G., donde se encuentran las mineralizaciones de Acehuche-Ceclavín, contienen una concentración de U suficientemente importante ( $\bar{x} = 24$  ppm de  $U_3O_8$ ) como para ser la roca fuente del U concentrado en dichas mineralizaciones. En este sentido, cabe recordar que aproximadamente el 50% del U contenido en dichas rocas es fácilmente lixiviable en condiciones oxidantes, ácidas o alcalinas.

Por el contrario, el contenido medio en U (4 ppm) de la facies granítica más próxima a las mineralizaciones peribatolíticas es notablemente inferior al de las pizarras del C.E.G., y está ubicado, en su mayor parte, en la estructura de los minerales accesorios de dicha facies, apatito, monacita y circón, por lo que es difícilmente lixiviable (PÉREZ DEL VILLAR, 1988).

### 3.2.2. Liberación y disolución del uranio

Las características texturales de la paragénesis uranífera estudiada, semejantes a las de la mina Fe y Retortillo, son muy parecidas a las de los depósitos minerales originados en campos geotérmicos actuales (ARRIBAS, 1985), por lo que las mineralizaciones de Acehuche-Ceclavín, al igual que las de la provincia de Salamanca, podrían haberse formado como consecuencia de la actividad hidrotermal desarrollada durante la fase tectónica de fracturación alpina, invocada en el apartado anterior (ARRIBAS, 1985 y MARTÍN IZARD, 1985).

Por otra parte, son numerosos los autores que han dedicado su atención al estudio de los isótopos del O, H y C en las mineralizaciones hidrotermales de baja temperatura, demostrando que, en la mayoría de los casos, las soluciones que las originaron fueron de origen meteórico, recalentadas en profundidad, y cuya carga iónica la extrajeron de las rocas a través de las cuales percolaban. En este sentido, ARIBAS (com. personal) ha determinado que los carbonatos de la paragénesis uranífera de mina Fe están enriquecidos en  $^{12}\text{C}$ , con valores de  $\delta^{13}\text{C}$  propias de la materia orgánica. Igualmente, CATHELINÉAU (1982) sugiere, a partir de datos del mismo tipo, obtenidos en los carbonatos de las mineralizaciones extratolíticas de la región francesa de La Vendée, que las soluciones mineralizadoras pudieron tener una componente meteórica importante.

En consecuencia, y a falta aún de datos isotópicos de los elementos citados (investigación en curso), se puede pensar que las aguas hidrotermales que dieron lugar a las mineralizaciones aquí estudiadas fueron de origen meteórico, ya que, en la zona estudiada, no existen manifestaciones ígneas terciarias con las que se puedan relacionar, ni parece razonable admitir la existencia de aguas connatas en una formación metamórfica como es el C.E.G.

Por todo ello, los procesos de liberación, disolución y transporte del U pudieron estar relacionados, en una primera fase, con el descenso de aguas meteóricas, a través de las pizarras del C.E.G.

Las reacciones químicas que permitieron la disolución de los minerales de U dispersos en las pizarras y/o de las mineralizaciones preexistentes se pueden esquematizar de la forma siguiente:

a) Oxidación de los minerales de  $\text{U}^{4+}$  por las aguas meteóricas descendentes que, en general, suelen ser bicarbonatadas y oxidantes.

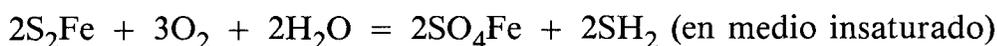
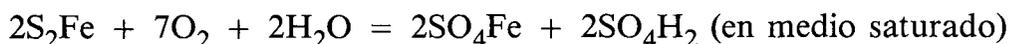


b) Hidratación del catión complejo  $\text{UO}_2^{++}$ , en ausencia de aniones acompañantes, según la reacción:

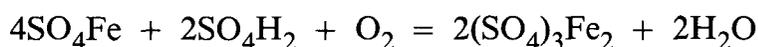


La shoepita es virtualmente insoluble, en ausencia de aniones acomplejantes, en aguas con pH comprendido entre 6 y 8, aumentando su solubilidad con la acidez del medio.

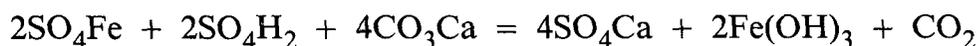
c) La acidez necesaria para solubilizar la shoepita sería aportada por la piritita diseminada en las pizarras que, al oxidarse, dejaría  $\text{SO}_4\text{H}_2$  libre, según las reacciones siguientes:



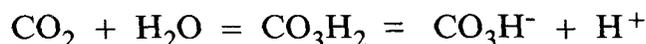
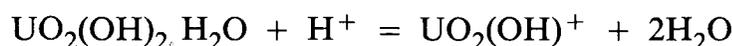
— El  $\text{SO}_4\text{H}_2$  disociado y el  $\text{O}_2$  transformarían el  $\text{SO}_4\text{Fe}$  en  $(\text{SO}_4)_3\text{Fe}_2$ , de acuerdo con la siguiente reacción:



d) Si en la roca encajante existen carbonatos, como es el caso que aquí se estudia, la reacción que tendría lugar más probablemente sería la siguiente:



Esta reacción regularía, por un lado, el pH del medio, y por otro, la  $[\text{SO}_4^-]$  y la  $\text{P}_{\text{CO}_2}$ . Así, si la reacción de neutralización no fuese total, por exceso de  $\text{SO}_4\text{H}_2$ , la solución podría adquirir valores de pH comprendidos entre 5 y 7, intervalo de valores que permitiría las reacciones siguientes:



$\text{UO}_2(\text{OH})^+ + \text{CO}_3\text{H}^- + \text{H}_2\text{O} = \text{UO}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}^=$ , complejo cuyo campo de estabilidad varía desde medios oxidantes ligeramente ácidos hasta alcalinos y en condiciones ambientales de P y T (HOSTETLER y GARRELS, 1962).

Por el contrario, de acuerdo con NGUYEN-TRUNG (1985) los complejos sulfatados de  $\text{UO}_2^{++}$  son estables en soluciones más ácidas ( $\text{pH} < 5$ ) y en un intervalo de temperatura comprendido entre  $30^\circ$  y  $200^\circ\text{C}$ .

Según este esquema y considerando que los carbonatos dispersos en las pizarras del C.E.G. son, probablemente, de origen inorgánico, difícilmente se podría explicar el enriquecimiento en  $^{12}\text{C}$  que presentan los carbonatos de este tipo de mineralizaciones (ARRIBAS com. personal y CATHELINAEU, 1982).

En principio, las posibilidades de explicar el aporte de  $\text{CO}_2$  o  $\text{CO}_3\text{H}^-$  enriquecido en  $^{12}\text{C}$  son dos: la primera, por oxidación de la materia carbonosa y/o grafitoidea existente en las pizarras del C.E.G., y la segunda, considerando que las aguas meteóricas percolantes estuviesen ya enriquecidas en  $^{12}\text{CO}_2$  o  $^{12}\text{CO}_3\text{H}^-$ .

La única posibilidad de explicar la oxidación de la material grafitoidea existente en los materiales del C.E.G. es invocando la desintegración del  $\text{U}^{238}$ . No

obstante, la dificultad que entraña la destrucción de la materia orgánica tan evolucionada, incluso invocando dicho proceso, y el hecho de que el grafito y materia grafitoidea suelen estar enriquecidos en  $^{13}\text{C}$ , por estarlo en  $^{12}\text{C}$  el  $\text{CH}_4$  liberado durante la grafitización (HOEFS y FREY, 1976), hacen que esta primera posibilidad sea, en principio, descartada.

La segunda alternativa pasa por admitir que, sobre los materiales del C.E.G. y con anterioridad a la formación de las mineralizaciones uraníferas, se desarrollaron suelos hidromorfos ricos en materia orgánica.

En este sentido, las investigaciones realizadas por MOLINA et al. (1989), sobre el paleosuelo más antiguo desarrollado sobre los materiales del basamento hercínico, en el borde SO de la cuenca del Duero, demuestran la existencia de perfiles de alteración monosialítica, según la terminología de PEDRO (1966 y 1968), los cuales son propios de climas subtropicales. Además, este paleosuelo suele estar fosilizado por la llamada serie siderolítica (CORROCHANO, 1977 y BUSTILLO y MARTÍN SERRANO, 1980) que ha sido interpretada, por aquellos autores, como procedente del desmantelamiento, transporte y sedimentación del citado paleosuelo, dada la coherencia mineralógica que existe entre ambas formaciones. El medio de sedimentación de dicha serie, según MOLINA et al. (1989), serían zonas pantanosas, con poco drenaje y donde se acumularía gran cantidad de materia orgánica.

Por otra parte, la presencia en la serie siderolítica de alunita, datada por BLANCO et al. (1982) en 58 M.a., caolinita, y costras silíceas indican que el medio de sedimentación fue oxidante y ácido, con pH comprendido entre 4 y 6, dada la coexistencia de alunita y caolinita. En estas condiciones, el  $\text{CO}_2$ , procedente de la combustión parcial de la materia orgánica, estaría disuelto en el agua en forma de  $\text{CO}_3 \text{H}^-$  y enriquecido en  $^{12}\text{C}$ . Los radiales  $\text{SO}_4^-$ , procedentes de la oxidación de los sulfuros de las rocas del basamento, habrían precipitado en forma de alunita, sulfato con un producto de solubilidad extraordinariamente bajo.

Por todo ello, se puede deducir que durante el tránsito Mesozoico-Terciario se desarrollaron, sobre el Macizo Ibérico, suelos y ambientes continentales de depósito capaces de originar aguas bicarbonatadas, ligeramente ácidas y enriquecidas en  $^{12}\text{C}$ .

Por otra parte, el estudio geoquímico de las aguas superficiales y subterráneas realizado por KAY y BATH (1982) en la región de Altnabreac (Escocia), donde existe un esquema geológico similar al de la zona que aquí se estudia, pero recubierto actualmente por turberas bien desarrolladas, puede apoyar la idea que preside este trabajo. Así, en dicha región, los autores citados encuentran que los valores de la  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $[\text{H}_3]$ , del pH y Eh y los iones disueltos en las aguas subterrá-

neas son indicativos de que el agua de recarga, ácida después de un tiempo prolongado de residencia en la zona de turba ( $\approx 10$  años), y donde la  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CO}_2$ ) es de  $-30\text{‰}$  aproximadamente, se neutralizaría durante su percolación a través de la roca infrayacente. Este fenómeno ocurre por la conversión del  $\text{CO}_2$  disuelto en especies bicarbonatadas y la disolución del carbonato existente en las fracturas de la roca, cuyos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  están comprendidos entre  $-5$  y  $-8\text{‰}$ . De este modo explican que la  $\delta^{13}\text{C}$  de los  $\text{CO}_3\text{H}^-$  disueltos en las aguas subterráneas sea inferior a  $-14\text{‰}$ .

En estas condiciones, la oxidación y disolución del U disperso en las pizarras del C.E.E. pudieron alcanzar profundidades importantes si se tiene en cuenta el tiempo, los cambios del nivel de base, y particularmente la existencia de importantes zonas de fractura en el C.E.G. En este sentido KAY y BATH (1982) encuentran que todas las aguas recogidas en la región de Altnabraec, hasta 300 m de profundidad, son oxidantes para un tiempo de residencia de 10.000 años, edad calculada por el método del  $^{14}\text{C}$ . No obstante, estos autores piensan que, para mayores tiempos de residencia, las aguas evolucionarían hacia más reductoras.

### 3.2.3. *Ascenso de las soluciones y formación de la mineralización*

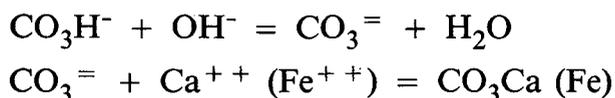
Los procesos físico-químicos que pudieron tener lugar durante esta fase se han resumido de la forma siguiente:

a) La fase pirenaica de fracturación originaría, durante la etapa compresiva, la formación de importantes focos caloríficos que calentarían las soluciones de origen meteórico, y durante la distensiva, la reapertura de las fracturas subverticales y subhorizontales (fracturación hidráulica), por donde ascenderían y penetrarían las soluciones mineralizadoras. Además, es muy probable que las fracturas reactivadas fuesen focos de emisión de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , los cuales se habrían originado como consecuencia de la descomposición parcial de los carbonatos existentes en las pizarras del C.E.G. y la grafitización total de la materia carbonosa, a lo largo de dichas zonas de fractura.

b) La caída de presión a que estuvieron sometidas las soluciones durante su ascenso pudo ser la causa de la descomposición del complejo  $(\text{CO}_3)_2\text{UO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}^-$ .

c) El  $\text{SH}_2$  necesario para reducir el complejo  $\text{UO}_2(\text{OH})^+$  pudo ser de origen endógeno y aportado a través de las propias zonas de fractura, o bien originado por la reducción de los  $\text{SO}_4^-$ , en presencia de  $\text{CO}_2$ , C y  $\text{H}_2\text{O}$ . A su vez, el  $\text{SH}_2$  reduciría al  $\text{Fe}^{3+}$  para dar  $\text{S}_2\text{Fe}$ .

d) La interacción entre las soluciones hidrotermales y las rocas encajantes pudieron ser la causa de la neutralización de las soluciones y de la extracción del calcio necesario para la precipitación de los carbonatos según las reacciones siguientes:



En consecuencia, durante el ascenso de las soluciones se produciría la precipitación de la piritita-marcasita, pechblenda-coffinita, en función de  $[\text{SiO}_4^{4-}]$ , y de los carbonatos, según este mismo orden y de acuerdo con el producto de solubilidad de cada una de las fases minerales citadas.

Mediante el modelo metalogénico propuesto se explicarían, además, las texturas varvadas que presenta la mineralización, cuando ésta rellena fracturas y grietas de tensión subhorizontales.

Las soluciones hidrotermales que alcanzaran la superficie tendrían probablemente, después de haber descargado su carga metálica, características físico-químicas semejantes a las que actualmente presentan las aguas termales de Retortillo y Ledesma, en Salamanca, y Baños de Montemayor y Ceclavín, en Cáceres.

En este sentido, de acuerdo con las investigaciones realizadas por el I.G.M.E. (1986 y 1987), las características físico-químicas de las aguas termales anteriormente mencionadas, excepto las de Ceclavín, por estar actualmente bajo el pantano de Alcántara, son muy semejantes entre sí y responden a aguas bicarbonatadas sódicas, ricas en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$  y reductoras. La fase gaseosa es rica en  $\text{N}$  (96% en volumen),  $\text{CH}_4$  (2%) y  $\text{He}$ , pobre en  $\text{O}_2$  (0,7%) y  $\text{CO}_2$  (0,15%), y con indicios de  $\text{SH}_2$ . La temperatura del agua en superficie es de aproximadamente  $42^\circ\text{C}$  y la calculada para las fases líquida y gaseosa es de  $100^\circ$ , en Retortillo, y de  $100$  y  $200^\circ$  respectivamente, en Bañor de Montemayor. Estas temperaturas están en consonancia con las obtenidas por MANGAS y ARRIBAS (1984) a partir de las inclusiones fluidas de los carbonatos acompañantes de pechblenda de mina Fe.

Por otra parte, el hecho de que las mineralizaciones de U de Acehuche-Ceclavín se encuentren aproximadamente sobre la falla que, con dirección N100-110 E, se localiza al N del batolito de Araya, y que ha sido deducida por magnetometría, puede deberse a que la actividad geotérmica de la zona estuviese canalizada por dicha fractura. En este sentido, conviene decir que los baños termales de Ceclavín estaban situados al O de esta población y en las proximidades de dicha anomalía magnética.

Por último, cabe pensar que las fuentes termales anteriormente citadas constituyan las manifestaciones residuales de aquella actividad hidrotermal terciaria, mantenida activa por el calor radiogénico producido por la desintegración del U concentrado en esas zonas.

## REFERENCIAS

- ARRIBAS, A. (1985): Origen, transporte y deposición del uranio en los yacimientos en pizarras de la provincia de Salamanca. *Est. Geol.*, 41; 3-16.
- BLANCO, J.A., CORROCHANO, A., MONTIGNY, R., y THUIZAT, R. (1982): Sur l'âge du début de la sédimentation dans le bassin tertiaire du Duero (Espagne). Attribution au Paléocène par datation isotopique des alunites de l'unité inférieure. *C.R. Acad. Sc. Paris* 295; 259-262.
- BUSTILLO, M.A., y MARTÍN SERRANO, A. (1980): Caracterización y significado de las rocas silíceas y ferruginosas del Paleozoico de Zamora. *Tecniterrae*, 36; 1-16.
- CATHELINEAU, M. (1982): Les gisements d'uranium liés spatialement aux leucogranites sud-armoricains et à leur encaissant métamorphique. Relations et interaction entre les minéralisations et divers contextes géologiques et structuraux. *Sci. Terre. Mem* 42; 375 pp.
- CORROCHANO, A. (1977): *Estratigrafía y sedimentología del Paleógeno de la Provincia de Zamora*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca (Inédita).
- CONTESEQUE, P., DANDURAND, J.L., FORTUNE, J.P., SCHOTT, J., y TOLLON, F. (1974): On three factors essential to the formation of ore deposits: Geochemical preconcentration, fracturation and thermal gradient. *Fourth IAGOD Symposium*, Vol. II, 269-278. Varna.
- HOEFS, J., y FREY, M. (1976). The isotopic composition of carbonaceous matter in a metamorphic profile from the Swiss Alps. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40: 945-951.
- HOSTETLER, P.B., y GARRELS, R.M. (1962): Transportation and precipitation of uranium and vanadium at low temperatures, with special reference to sandstone-type uranium deposits. *Econ. Geol.* 57; 137-167.
- I.G.M.E. (1986): *Estudios geoquímicos de isótopos y gases en distintas zonas con manifestaciones termales del territorio nacional* (Informe inédito).
- I.G.M.E. (1987): *Investigación de diversas áreas de interés geotérmico. Prov. de Salamanca*. (Informe Inédito).
- KAY, R.L.F., y BATH, A.H. (1982): *Groundwater geochemical studies at the Altnabreac research site*. Radiactive Waste Disposal Research Series EMPU82-12. Environmental Protection Unit. Harwell (Reino Unido) 83 pp.
- MANGAS, J., y ARRIBAS, A. (1984): Características físico-químicas de los fluidos asociados con las mineralizaciones de uranio de mina Fe (Salamanca) VII *Congr. Intern. de Min. y Metal. Barcelona*, 435-451.
- MARTÍN-CALVO, M., COMA MOLIST, F., y RANZ BUQUERIN, I. (1988): Contribución al análisis geológico, mineralógico y metalogénico del yacimiento de uranio «mina Fe», Saelices el Chico, Salamanca. *Bol. Geol. Min.*, 99(1); 102-119.
- MARTÍN-IZARD, A. (1985): *El origen de los yacimientos de uranio en las pizarras del Complejo-Esquistos-Grauváquico*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. 365 pp. (Inédita).

- MINGARRO, E., PÉREZ DEL VILLAR, L. y MARÍN, C. (1988). La Télédétection appliquée a la prospection d'uranium: Le cas du batholite de Cabeza de Araya et ses roches encaissantes (Prov. de Cáceres, Espagne). *Second European Worschop on Remote Sensing in Mineral Exploration*. 85-104.
- MOLINA, E., VICENTE, A., CANTANO, M., y MARTÍN-SERRANO, A. (1989): Importancia e implicaciones de las paleoalteraciones y de los sedimentos siderolíticos del paso Mesozoico-Terciario en el borde Suroeste de la cuenca del Duero y Macizo Hercínico Ibérico. *Stud. Geol. Salmanticensia*. Vol. especial N° 5, 177-186.
- NGUYEN-TRUNG, C. (1985): *Géochimie théorique et expérimentales des oxydes d'uranium dans les solutions aqueuses de 25 a 700°C sous une pression de 1 a 6000 bars. Synthèse hydrothermale des certains minéraux d'uranium VI y IV. Géologie et Géochimie de l'uranium*. These I.N.P.L. Nancy, 479 pp.
- PEDRO, G. (1966): Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'alteration de roches superficielles (cycle alumino-silicique). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 262; 1828-1931.
- PEDRO, G. (1968): Distribution des principaux types d'alteration chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* 10; 457-470.
- PÉREZ DEL VILLAR, L., y RODA, J. (1984): Investigaciones de uranio en los materiales del C.E.G. en el área Garrovillas-Ceclavín (Prov. de Cáceres). *VII Congr. Intern. de Min. y Metal. (Barcelona)*. Vol. I, 285-310.
- PÉREZ DEL VILLAR, L., y MORO, C. (1988): *Estudio de la distribución del K, Th y U en el batolito de Cabeza de Araya mediante prospección aerorradiométrica y litogeoquímica: implicaciones petrogenéticas y metalogénicas*. En: «Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico». Libro homenaje a L.C. García de Figuerola. Ed. Rueda, 457-469 pp.
- PÉREZ DEL VILLAR, L. (1988): *El uranio en el batolito de Cabeza de Araya y en el C.E.G. del borde septentrional (Prov. de Cáceres): prospección, geoquímica, mineralogía y metalogenia*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca, 470 pp. (Inédita).
- PÉREZ DEL VILLAR, L. y MORO, C. (1990a. en este vol.): Características geológicas, morfológicas y mineralógicas de los indicios uraníferos del Complejo Esquisto-Grauváquico en el área Acehuche-Ceclavín (prov. de Cáceres): El yacimiento de La Espigadera.
- PÉREZ DEL VILLAR, L., y MORO, C. (1990b. en este vol.): Estudio geoquímico comparativo entre las rocas encajantes y las mineralizaciones de uranio del Complejo Esquisto-Grauváquico en el área Acehuche-Ceclavín (prov. de Cáceres).
- PÉREZ DEL VILLAR, y MORO, C. (1990c. en este vol.): Los yacimientos peribatolíticos de uranio encajados en metasedimentos. Comparación con los del área de Acehuche-Ceclavín.
- SAINT-ANDRE, B. (1986): *Rapport confidentiel de fin de contrat sur les datations U-Pb sur mineralisations uranifères en provenance du secteur de la mine de Fe: provincia de Salamanca, Espagne*. I.A.E.A. Technical Commitee Meeting. Uranium Deposits Magmatic and Metamorphic Rocks. Universidad de Salamanca, 33 pp.

- SCHERMERHORN, L.J.C., PRIEM, H.N.A., BOELRIJK, N.A.I.N., HEBEDA, E.H., VERDURMEN, E.A., y VERSCHURE, R.N. (1978): Age and origin of the Messejana dolerit fault-dike system (Portugal and Spain) in the lighth of the opening of the North Atlantic Ocean. *J. Geol.* 86; 299-309.
- SCHOTT, J.J., MONTIGNY, R., y THUVIZAT, R. (1981): Paleomagnetisme and potasium-argon age of the Messeja dike (Portugal-España): angular limitations to the rotation of the Iberian peninsula since Middle Jurassic. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 53; 457-470.

*Recibido el 25-Septiembre-1989*

*Aceptado el 12-Febrero-1990*