

LA BIOGRAFÍA DEL URANIO.

Desde la nube protosolar hasta el comienzo de la atmósfera oxigénica

L. GARZÓN - A. CAVERO

Las propiedades geoquímicas del uranio y de sus minerales nos han permitido describir coherentemente las características que presenta dicho elemento en la evolución de la materia, desde la nebulosa protosolar hasta la formación y posterior evolución de la Tierra. Se considera la formación de los depósitos más primitivos, infiriéndose que fueron de carácter detrítico. Las radiaciones ionizantes emitidas por estos depósitos y la existencia de episodios críticos en ellos ha sido considerada. La baja concentración de O_2 hasta hace unos 2.4 Ga fue la causante de la reducida extensión de los depósitos de uranio, y de la escasa diversidad de su tipología y la de sus minerales. Uranio, evolución, depósitos, minerales, radiación, criticidad

INTRODUCCIÓN

Como es sabido, los elementos químicos se formaron en los procesos de nucleosíntesis que tuvieron lugar en el curso de la creación y posterior evolución del universo. Inicialmente se formaron el H y el He y pequeñas cantidades de Li y otros. Esta nucleosíntesis, llamada primordial, fue de gran rendimiento en H y He, pero de un alcance muy limitado. Posteriormente, y a partir de los átomos citados, se formaron los demás elementos en el interior profundo de las estrellas, llegándose hasta los elementos del grupo del hierro, y aún más allá del uranio en la Tabla periódica, en las explosiones de supernovas (Schramm y Fowler, 1971).

En éstas y en los procesos terminales de otras estrellas, se formó la materia interestelar, cuyos eventuales colapsos gravitatorios originaron los sistemas planetarios, de los cuales solamente comenzamos a conocer el nuestro. En la materia interestelar ya se encontraba presente el uranio, que evolucionó desde sus comienzos hasta la nebulosa protosolar, con la formación muy probable de óxidos UO , UO_2 . Posteriormente se formaron el Sol y los planetas. En la Tierra, que es el planeta que más nos interesa considerar, el uranio, junto con otros elementos, experimentó un aumento considerable de su concentración, distribuyéndose entre las diversas zonas en las que se estratificó el planeta, a causa principalmente del calor de la radiactividad de elementos radiactivos de vida corta y

de del U, Th y ^{40}K , de vida mucho más dilatada.

A partir de aquí se originaron los depósitos de uranio DU gracias a ciertas características geoquímicas. La historia de estos depósitos comienza poco después de emerger las primeras rocas. Se trataba de depósitos detríticos en los que el mineral UO_2 , uraninita, era predominante. Los procesos de sedimentación incrementaron tanto la concentración que debieron de presentarse episodios de criticidad con bastante frecuencia.

La radiación ionizante procedente de los DU y estos episodios críticos tuvieron una enorme importancia en la evolución, en general. Los DU muy parecidos entre sí, mantuvieron su tipología a través de los ciclos geológicos, hasta que tuvo lugar un cambio de atmósfera, de anóxicas a oxigénicas.

La presencia de concentraciones importantes de O_2 libre ejerció una enorme influencia en el comportamiento de los DU, así como en la proliferación de sus especies mineralógicas, cuyo número se acerca a 200. Este punto de inflexión en la línea evolutiva del uranio ocurrió hace unos 2.3 Ga, a partir de cuya época dicho comportamiento fue muy parecido al actual, por lo que no experimentó cambios importantes salvo los propios debidos al decaimiento radiactivo y concomitante disminución del enriquecimiento en el isótopo fisionable.

El estudio de los elementos químicos debería hacerse evolutivamente y en

relación con las características de los entornos correspondientes, con especial énfasis en el terráqueo (Garzón, 1992). Las dificultades inherentes a este tratamiento multidisciplinar se verían compensadas por la riqueza de los múltiples aspectos a considerar.

En este sentido el uranio es un elemento singular, pues aunque comparte con algún otro (Mn, Fe, Th) una interesante biografía, se muestra, en algunos aspectos, como un elemento único. En particular por lo que se refiere al hecho de que, masas mineralizadas de pechblenda se comportaron como reactores naturales en Oklo, hace unos 2 Ga, y muy probablemente mucho tiempo antes lo hicieron también masas mucho más pequeñas de uraninita, con mucha mayor profusión.

Por todo ello, hemos considerado que podría ser de interés estudiar estos procesos evolutivamente, desde la nube protosolar hasta los actuales tiempos geológicos, aquí en la Tierra. Dada la amplitud del tema, nos hemos visto obligados a simplificarlo, esforzándonos en mantener un adecuado rigor expositivo.

DESARROLLO

FUNDAMENTOS

El especial comportamiento del uranio, que hemos resumido en el apartado anterior, se debe a una serie de características que brevemente pasamos a considerar.

1. El radio del ión U^{4+} es significativamente mayor que los radios de los iones que forman las redes de los silicatos. Por esta razón, cuando un magma de silicatos en cuyo seno se encuentran en disolución otros iones y/o cationes, por ejemplo, y en nuestro caso, los de U^{4+}/Th^{4+} , éstos se concentran en los fluidos remanentes.

2. Debido a la escasa abundancia del O_2 libre en tiempos anteriores a hace unos 2.4 Ga, la UO_2 era químicamente estable, por lo que los DU del Arqueano fueron de tipo placer, estando localizados en los cratones. Posteriormente, es decir, cuando la atmósfera se hizo oxigénica, la UO_2 se oxidó y movilizó a favor de unos complejos de uranilo extraordinariamente solubles en agua. La subsiguiente precipitación del UO_2 y/o su reducción originó una abundante tipología de depósitos, no conocidos previamente, que se dispersaron mucho más ampliamente que los anteriores.

3. El enriquecimiento en el isótopo fisiónable fue superior en el pasado que en la actualidad.

4. Existió un campo gamma y una emisión de partículas procedentes principalmente de la desintegración del ^{222}Rn emitido por la superficie, hacia la atmósfera, de los DU. La intensidad de ambos fenómenos fue superior en el pasado que en la actualidad.

LA BIOGRAFÍA DEL URANIO:

I. DESDE LA NUBE PROTOSOLAR HASTA EL MANTO TERRESTRE

Las características 1 y 2 permiten explicar las etapas comprendidas entre la nebulosa protosolar y la aparición de los primeros DU, junto con los agregados (figura I).

Por salirse de los límites que nos hemos trazado para este trabajo, no vamos a considerar los procesos que llevaron a la nebulosa solar hasta la formación del Sol y de los planetas, en particular la de la Tierra. Únicamente mencionaremos que en el proceso de formación de los planetas interiores tuvo lugar un primer y elevado enriquecimiento en los elementos más pesados que el Ne, pues en el caso del U se pasó de una concentración del orden de 10-4 ppm (Schramm and Flower, 1971) a unas pocas unidades de ppm. Téngase en cuenta que todo el uranio presente en la nebulosa protosolar se distribuyó entre el Sol y los planetas interiores.

Una cuestión muy importante en planetología se refiere a la estructura que adquirieron los planetas una vez

formados, esto es, si hubo o no estratificación, y en caso positivo, cuántas zonas resultaron y qué características tuvieron. Sin entrar en pormenores parece que los planetas estructural y químicamente más parecidos entre sí son la Tierra y Marte, si bien parece que este último desarrolló una estructura menos diversificada que la Tierra. Este aspecto puede llegar a ser muy importante para explicar la evolución química en el planeta rojo. Con esto nos situamos en la tercera etapa de la biografía del uranio, esto es, la correspondiente a su dispersión y/o disolución en el manto.

Como es conocido los elementos químicos minoritarios de la Tierra se distribuyeron entre las diversas zonas más de acuerdo con sus características físico-químicas que con su peso específico. Los óxidos de uranio, a los que nos referimos previamente, debieron de concentrarse preferentemente en el manto, porque de todas las fases existentes (núcleo, siderosfera, manto, litosfera) aquélla fue probablemente la única en la que pudieron disolverse, gracias a la elevada constante dieléctrica de los silicatos que lo forman.

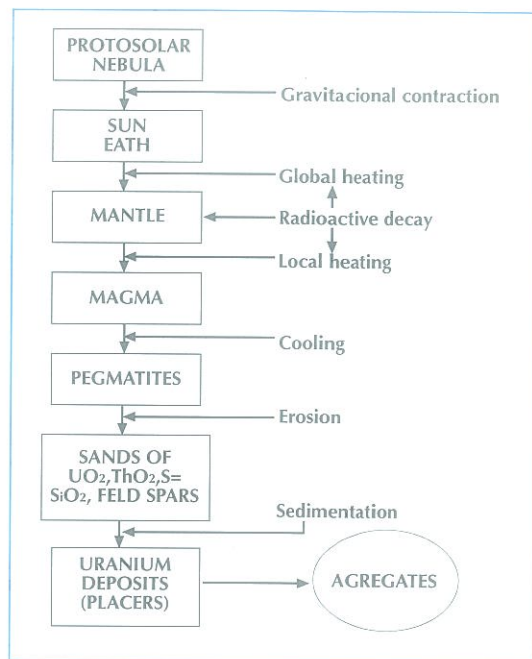
Por tanto se puede razonablemente admitir que el uranio se encontrase como UO_2 en equilibrio con U^{4+} . El aumento de la concentración del U y Th en el manto con respecto a sus valores en la nebulosa protosolar fue muy grande, solamente superada por muy pocos elementos.

Esta suposición encuentra un apoyo empírico en el análisis de los meteoritos.

LA BIOGRAFÍA DEL URANIO:

II. DESDE EL MANTO A LOS DEPÓSITOS DE URANIO

Precisando más las ideas debemos señalar que la disolución del U^{4+} tendría lugar en cualquier porción líquida que pudiera formarse en el seno del manto "sólido". Aunque pudieran considerarse otras alternativas, se puede razonablemente admitir que la fusión de una porción del manto ocurriera gracias al calor producido por la radiactividad del U, Th y ^{40}K . A causa de su movilidad y de la presión reinante, el magma ascendería desde la cámara magmática, a través de la chimenea volcánica, hacia la superficie exterior de la Tierra, para formar un volcán y/o originar una erupción. En cualquier caso, tendríamos un sistema fundido que se iría enfriando en su movimiento ascendente. Los procesos de cristaliza-



Fl. La biografía general del uranio, desde la nebulosa protosolar hasta la formación de los depósitos del Arqueano y eventual formación de los agregados con elevadas concentraciones de mineral.

ción fraccionada que sucedieron a continuación son bien conocidos, por lo que únicamente señalaremos que se explican principalmente por la característica 1, aunque pueda también ser imponente la elevada energía de activación en la migración de los iones, que restringiría su incorporación en las redes de ciertos minerales trazas, llamados accesorios (figura II).

Creemos interesante señalar el hecho de que una característica como el radio iónico fuera responsable de que el U/Th experimentasen un nuevo aumento en su concentración, desde unas pocas ppm en el manto hasta algunas decenas por cien en el seno de las pegmatitas contenidas en las masas graníticas.

Este proceso de litificación hubiera tenido un límite por el agotamiento en U/Th del manto sino hubiera sido porque los procesos que ocurrían en la corteza oceánica (formando basaltos en vez de granitos), servían para reponer las pérdidas del manto (en los continentes), reposición que tenía lugar en las zonas de subducción. La formación de basaltos se debió al enfriamiento brusco del magma; por consiguiente, el aumento de la concentración de uranio debió ser inferior en estas rocas que en los granitos continentales (Condie, 1994).

Los procesos de litificación se iniciaron en la Tierra hace unos 3.8 Ga. Anteriormente este proceso no pudo presentarse debido a la temperatura reinante, y al intenso bombardeo a que

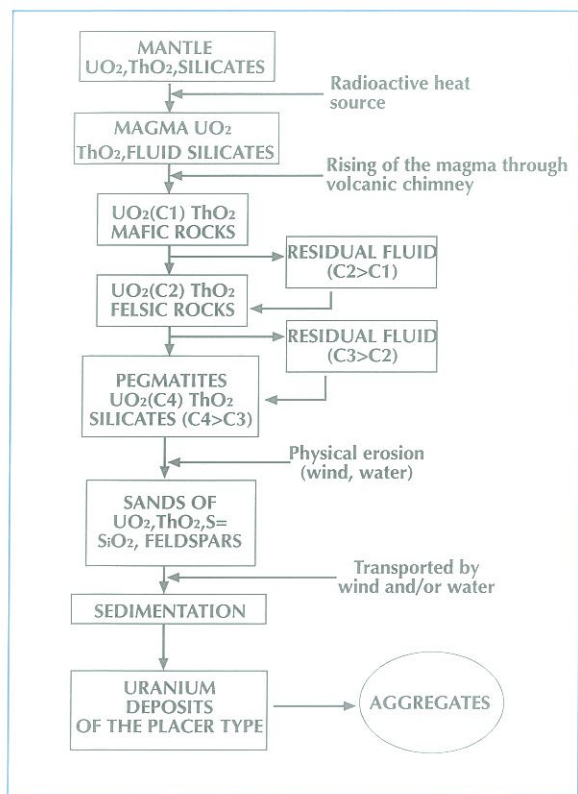


Fig. La biografía detallada del uranio desde el manto terrestre hasta la formación de los depósitos y agregados.

se vio sometida por parte de meteoritos y/o cometas. (Las huellas, cerradas en la Tierra posteriormente por la actividad tectónica, aún se conservan en la Luna y en otros planetas).

Una vez las tierras emergidas (arcos de islas volcánicas), se inició el ciclo erosivo, por otra parte sobradamente conocido, porque aún está teniendo lugar en este planeta. No obstante, existe una característica muy notable que establece una profunda diferencia entre los ciclos erosivos, según que acaecieran anteriormente a hace unos 2.4 Ga o con posterioridad. Nos estamos refiriendo a la característica nº 2 del uranio, en realidad de la UO_2 .

En ausencia de O_2 libre la UO_2 mantuvo su integridad, lo que también sucedió con otros compuestos metálicos como los sulfuros, por ejemplo de hierro.

A continuación vamos a pasar revista brevemente a los ciclos erosivos. En ausencia de O_2 , la erosión de los macizos graníticos la llevaron a cabo agentes físicos, como el viento y el agua, por disolución y/o trituración, al congelarse este líquido.

En estos procesos se formaban arenas, de cuarzo, feldespatos, sulfuros, óxidos metálicos y UO_2 , ThO_2 ; los que, por las razones señaladas, mantenían su integridad química. El viento y las corrientes de agua arrastraron esas are-

nas y las clasificaron de acuerdo con sus tamaños y pesos específicos. Siendo la diferencia de éstos bastante acusada, pues la UO_2/ThO_2 son unas 4 veces más densas que el cuarzo, es razonable suponer, teniendo en cuenta que los procesos se repetían a lo largo de esta línea de separación, que al cabo del tiempo, tuviera lugar una acumulación de UO_2 y/o ThO_2 . De esta manera se formaron los depósitos de Uranio/Torio del Arqueano, depósitos que se caracterizaban por dos aspectos: ser del tipo placer y contener un mineral predominante o incluso único: la uraninita/torianita. (Rutten, 1968).

Llegados a este punto hemos creído conveniente referirnos a una paradoja. Comencemos recordando que la concentración de Th tanto en la corteza como en las principales rocas es de 3 a 4 veces superior a la del uranio; así debió ocurrir en el pasado remoto. Por consiguiente los depósitos detrítico formados entonces, de acuerdo con los procesos que hemos estudiado, deberían contener UO_2 y ThO_2 en la proporción indicada, es decir, serían más depósitos de Th que de U. En los depósitos actuales la proporción de Th suele ser muy pequeña, lo que es razonable. Pero existen depósitos de uraninita que, por diversas causas se han conservado, y en ellos la concentración de ThO_2 es pequeña en relación con la del UO_2 , de un 5%. Que en los depósitos actuales de U apenas exista Th se explica porque al formarse en época oxigénica los caminos del U y Th, que antes de esa época habían coincidido, divergieron debido a que el ThO_2 no se oxidó y sí lo hizo el UO_2 dispersándose a continuación y alejándose del ThO_2 (éste se acumuló en los placeres en forma de monacita). ¿Cómo resolver este problema?. Dos posibles soluciones hemos considerado. Una de ellas, que en el curso de la denudación, lixiviación y arrastre de los granos de mineral, el ThO_2 formara monacita, separándose del UO_2 ; la otra es que el Th se transformara en U-233 por la absorción de neutrones producidos en las fisiones del ^{235}U . En esta biografía supondremos que se dio el primer caso. En un trabajo posterior, analizaremos las posibilidades del segundo.

En los procesos de acumulación de la uraninita pudieron formarse volúmenes con cierta individualidad que pu-

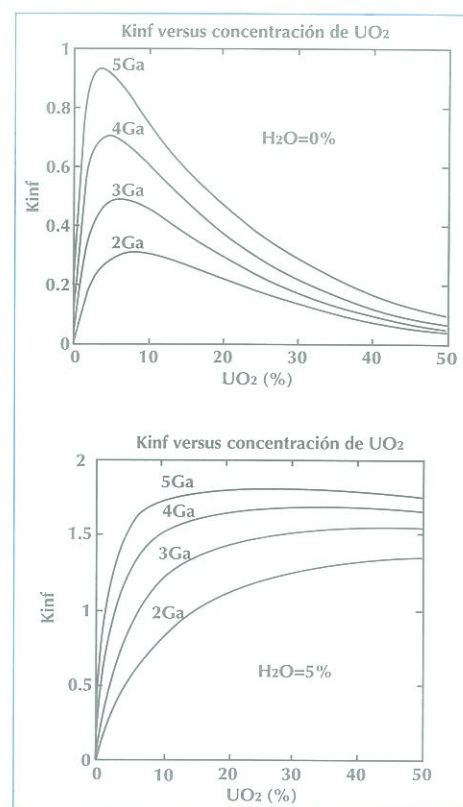


Fig. Variación de la constante de multiplicación infinita con la concentración de UO_2 tomando la edad como parámetro. Nótese la influencia del H_2O .

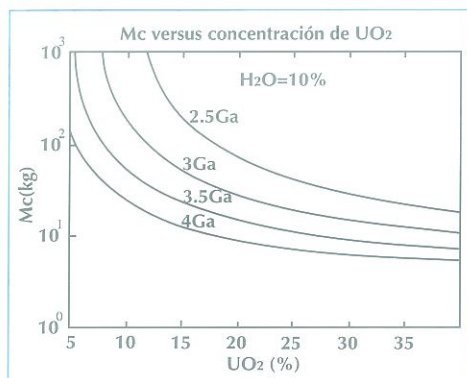
dieron comportarse como los núcleos de reactores nucleares. Llamaremos "agregados" a estas masas mineralizadas. Otra vía que explicaría la formación de agregados pudo transcurrir de acuerdo con el siguiente esquema: Primeramente se formaría una masa de UO_2 con una concentración baja, digamos c_1 , pero suficiente para que el calor desprendido por la radiactividad llegara a fundirla. A partir de aquí tendría lugar su enfriamiento y diferenciación subsiguiente, tras de lo cual, un ciclo erosivo podría aumentar el valor inicial c_1 a c_2 lo que podría permitir que se automantuviera una reacción de fisión nuclear.

De lo que hemos dicho se infiere que los depósitos de uranio se encontrarían en las tierras emergidas, es decir, en los escudos o cratones más antiguos.

Recuérdese que los escudos más importantes son los del Canadá, África del Sur y Australia occidental. Les siguen en importancia el Fenoscandia, India, Urales y Sierra Jacobina (Grandstaff, 1989).

Las radiaciones ionizantes y los DU

Un depósito de uranio es una fuente energética de efectos múltiples. En general, en los minerales de uranio



FIV. Variación de la masa crítica con la concentración de UO_2 tomando la edad como parámetro y una concentración de H_2O del 10%

presentes en los depósitos, los isótopos del uranio se encuentran en equilibrio con sus descendientes, emitiéndose partículas α , β y fotones gamma.

Las partículas alfa y beta, por su pequeño recorrido al atravesar la materia, no llegan a alcanzar la atmósfera; en cambio, sí lo hacen los fotones gamma. A un metro de distancia del suelo y bajo ciertas suposiciones, se puede obtener una expresión para la dosis gamma debida al uranio

$$D(\gamma) = 7 \cdot 10^3 \cdot C \mu\text{rad/h},$$

siendo C la concentración de UO_2 en % en el macizo. Para un depósito de uranio la modelización podría no ser pertinente, sobre todo si la potencia del depósito no fuera de unos cuantos decímetros. En cualquier caso la expresión anterior nos permitiría tener una aceptable aproximación.

La dosis gamma disminuye con la altura sobre el DU, casi linealmente. Se tiene en cuenta esta circunstancia considerando un estrato de atmósfera, de altura igual a la de la capa de mezcla, cuyo valor es típicamente de unos 1000 m. A esta altura el valor de $D(\gamma)$ es de un 3% del correspondiente a 1 m, por lo que el valor medio para el estrato considerado, viene dado por:

$$D(\gamma) \sim 4 \cdot 10^3 \cdot C \mu\text{rad/h}.$$

Además de los fotones gamma, la atmósfera estaba poblada por partículas alfa, beta y fotones, cuyo origen se debía principalmente a las desintegraciones del radón y descendientes; el radón se desprendía de la superficie del DU distribuyéndose bastante uniformemente dentro de la citada capa. De las partículas, sólo consideramos las alfa, por ser las más energéticas. Se puede obtener una expresión aproximada para estimar la concentración de radón

dentro del estrato considerado. La expresión es:

$$N(\text{Rn}) \sim 5 \cdot 10^4 \cdot C \text{ Bq/m}^3$$

teniendo C el mismo significado anterior. Se puede estimar que en el aire que llena los poros de la corteza la concentración de Rn es unos tres órdenes de magnitud superior. Se puede comprobar que la dosis entregada al aire en condiciones normales es aproximadamente igual a $1 \mu\text{rad/h}$ por cada Bq/m^3 . Por consiguiente, la dosis debida al radón en el aire atmosférico sería:

$$D(\text{Rn}) = 5 \cdot 10^{-4} \cdot C \mu\text{rad/h}.$$

En el aire de los poros, unas 103 veces mayor. Unas dosis tan elevadas debieron de producir transformaciones químicas importantes, debido a la gran ionización producida por las partículas alfa al atravesar la materia.

Los agregados como reactores nucleares. Resultados.

Un agregado es una masa mineral, m , que contiene UO_2 , ganga y agua, en concentraciones de c , G y w respectivamente ($c + G + w = 100$).

En el seno de un agregado se producían neutrones merced a las fisiones en el ^{235}U . Debido a que los elementos mayoritarios de la ganga (Si , O , Al ,...) son absorbentes neutrónicos débiles y aceptables moderadores, la tasa de producción de neutrones $\sigma_{15} N_5 \phi$ (σ_{15} , sección eficaz de fisión para neutrones térmicos; N_5 concentración atómica del ^{235}U ; ϕ flujo neutrónico) pudo exceder a la de las absorciones y fugas, en cuyo caso la k_{eff} (relación entre los neutrones de dos generaciones sucesivas) pudo hacerse mayor que la unidad. La tasa de las absorciones es $\sum \sigma_{ai} N_i$ (σ_{ai} , sección eficaz de absorción del elemento i , incluido el uranio). Las concentraciones se pueden poner en función de la densidad del agregado, la cual se conoce a partir de su composición.

Los cálculos neutrónicos (Teoría de la difusión para un sólo grupo de neutrones térmicos), muestran que k_{∞} (constante de multiplicación para un medio muy extenso) es muy sensible a las variaciones de w , pudiendo ocurrir que se haga menor que la unidad para valores de w de algunas décimas por ciento.

Veremos más adelante que esta conducta fue la responsable de que el agregado se autocontrolase por el agua y que, por ello, se comportara como una fuente calorífica oscilante. Un re-

sumen de los resultados obtenidos se muestra en las figuras 3, 4 y 5.

El autocontrol de los agregados. Oscilaciones térmicas

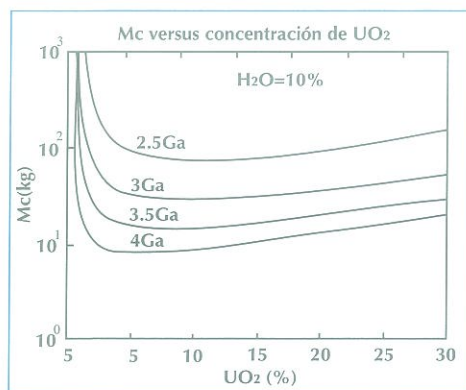
Para concretar un poco más, supongamos que en, o próximo a un DU, se encontrase un agregado cuya composición fuese tal que su masa superase el valor de la masa crítica. En tales condiciones su temperatura T oscilaría entre un valor máximo, de algunos centenares de grados y un valor mínimo próximo a la temperatura ambiente.

Vamos a partir de una determinada concentración de agua, w . Por ser $m > M_c$, $K_{\text{eff}} > 1$. En consecuencia, la densidad neutrónica, n , el flujo neutrónico, ϕ , y la energía desprendida, E , aumentaban exponencialmente, haciéndolo también T ($n = n_0 \exp(k_{\text{ex}} t / \lambda)$ ($k_{\text{ex}} = K_{\text{eff}} - 1$) y $\phi = nv$ (v , velocidad media de los neutrones); $E = \sigma_f (5) N_5 \phi$.

El agua se evaporaba y/o emigraba hacia el exterior del agregado, disminuyendo w . Este proceso tendría un límite que se alcanzaría cuando, debido a esa disminución, se hiciese $K_{\text{eff}} < 1$; a partir de esta situación disminuirían n , ϕ , E , haciéndolo también T ; el agregado se enfriaría y cuando T se hiciese igual o próxima al ambiente el agua retornaría a sus lugares de origen (por difusión y/o condensación); aumentaría w , llegando un momento en que $K_{\text{eff}} > 1$, con lo cual se completaba un ciclo. En resumen, el valor de K_{eff} oscilaba entre un valor máximo, superior a 1 y un valor mínimo inferior a 1. El agua fue la causante de estas oscilaciones y por tanto se puede decir que actuó como las barras de regulación de los reactores comerciales.

Podemos considerar un DU con diversas porciones de agua que contenían en disolución y/o dispersión los materiales procedentes de las transformaciones acaecidas en la atmósfera a causa de los procesos de ionización, previamente estudiados. En esas disoluciones, por tanto, se encontraría una abigarrada diversidad de moléculas, entre otras los monómeros bioquímicos (aminoácidos y nucleótidos). Las porciones de disolución se hallarían sobre el propio terreno, empapándolo; en irregularidades de la superficie, como oquedades, grietas, charcas, etc.

Las oscilaciones térmicas del agregado se propagarían al espacio circundante, pudiendo alcanzar alguna o algunas porciones de disolución. Por consiguiente, la zona próxima al agregado estaría sometida a oscilaciones de temperatura, si bien la amplitud de las mismas decrecería con la distancia al



FV. Variación de la masa crítica con la concentración de H_2O tomando la edad como parámetro y una concentración de UO_2 del 20%.

agregado. Al cabo de un cierto tiempo, en dicha zona, podrían aparecer moléculas de biopolímeros.

El periodo de calentamiento, como corresponde a una reacción (la nuclear, de fisión) extraordinariamente rápida, se puede considerar como un proceso adiabático; en cambio, el de enfriamiento debió de tener lugar mucho más lentamente, lo mismo que sucede con el enfriamiento de un objeto incandescente.

La duración del primer período debió, por tanto, ser muy breve y hubiera sido prácticamente instantáneo de no mediar la inercia propia de los sistemas térmicos, favorecida en este caso por la presencia de agua líquida; en cambio, el tiempo de enfriamiento debió de ser bastante mayor, del orden de algunas horas, dependiendo de la temperatura máxima alcanzada. Este último tiempo nos lo proporciona la experiencia diaria; así pues, un ciclo completo duraría aproximadamente un día.

En relación con la amplitud de las oscilaciones, señalaremos que la existencia de agua de hidratación de ciertos iones (agua química), además del agua de imbibición (agua física), determinó que la temperatura máxima alcanzada por el agregado excediera la del punto de ebullición del agua, T_e , a la presión reinante (prácticamente la misma que la actual). Si ésta fue la atmosférica, lo que ocurriría cuando el agregado aflorase totalmente, la temperatura de ebullición del agua física sería de 373 K. Dicho exceso de temperatura fue debido a que el contenido de agua química pudo bastar por sí solo para que el valor de Keff se mantuviera superior a la unidad.

En tal circunstancia la temperatura subiría por encima de T_e hasta que la proporción de agua química remanente fuera de algunas décimas por ciento, en cuyo caso Keff < 1 y la T comenza-

ría a disminuir. Por consiguiente, el exceso de T sobre T_e dependería de la clase de cationes hidratados, pudiéndose afirmar que, en general, se precisan temperaturas de algunos centenares de grados para eliminar el agua de los hidratos salinos.

Con respecto al número de ciclos es muy difícil hacer una estimación. Considerando la energía absorbida por el fluido de trabajo y por ciclo, y la producida por la reacción nuclear, se pueden hacer unas estimaciones acerca del número de éstos, obteniéndose valores del orden de 10^5 , es decir, y en cualquier caso, el número de ciclos no debió de ser un factor limitativo en la síntesis de biopolímeros.

Queda por aclarar el mecanismo de iniciación de la reacción nuclear.

En todos los sistemas automultiplicativos de neutrones se consigue iniciar la reacción incorporando al sistema una fuente de neutrones.

En los sistemas naturales esta fuente fue diversa: los neutrones cósmicos, las fisiones espontáneas en el ^{238}U y las reacciones (α , n) entre las partículas alfa procedentes de las series radiactivas y los elementos ligeros, presentes en la ganga del mineral.

CONCLUSIONES

- Los depósitos de uranio anteriores a hace unos 2 Ga fueron de análoga tipología, del tipo placer, y con uraninita como mineral predominante.

- En estos depósitos existieron volúmenes mineralizados con elevadas concentraciones de mineral, masas modestas y tamaños de pocos cm, que se comportaron como reactores nucleares. Autocontrolados por el agua constituyeron focos caloríficos cuyas temperaturas oscilaban con una amplitud de algunos centenares de grados centígrados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Draganic, Y.G., Draganic, Z., D. and, Z. D. y Adolf, J. P.: 1993, Radiation and Radioactivity on Earth and beyond, CRC Press, Boca Ratón.
2. Carle, G., Schwartz, D. y Huntington, J.: 1992, Exobiology in Solar System Exploration, NASA SP 512.
3. Condie, K. C.: 1994, Archean Crustal Evolution, Editorial Elsevier, Amsterdam.
4. Garzón, L.: 1975, An. Fis., 71, 75- 81. 1992, El radón y sus riesgos, Servicio de Publicaciones, Universidad de Oviedo, España. 1993, Uranium deposits and the origin of life, 10th

International Conference on the origin of life, Barcelona, Tierra aparte de España. 1994, Historia de la materia. Del big-bang a la vida, Ediciones Nobel, Oviedo, España. 1995, El origen de la vida. Una nueva Teoría, SNE, 144, 65-71.

4. Grandstaff, D. E.: 1989, Precambrian Research, 13, 1- 26.

5. Rutten, M. G.: 1968, Aspectos geológicos del origen de la vida sobre la Tierra, Editorial Alhambra, S.A., Madrid, España.

6. Schramm, D.N. y Fowler, W.A.: 1971, "Synthesis of Superheavy Elements in the r-Process", Nature, 231, 103-106.



Ángeles CAVERO CAVERO es licenciada en Medicina por la Universidad de Oviedo. Orientada a la salud ambiental, su línea de trabajo se refiere a la incidencia del radón sobre la calidad de vida.



León GARZÓN RUIPÉREZ es catedrático de Energía Nuclear de la ETSIMO. Ha publicado un centenar de trabajos de investigación y varios libros (entre otros, "De Mendelejev a los Superelementos"; "El Radón y sus riesgos"; "Historia de la materia"; "El origen de la vida"). Es medalla de Física de 1977, figura en el "Who is Who in the world". Ha sido nombrado Físico Europeo con el nº 92. En la actualidad desarrolla una teoría nuclear del origen de la vida.