

" EL ORIGEN DE LA VIDA. UNA NUEVA TEORÍA "

León Garzón

AULA CLUB , 17 noviembre 1994

León GARZÓN es licenciado en Ciencias Físico-Químicas y doctor en Ciencias Químicas. Es Catedrático de Energía Nuclear en la Universidad de Oviedo y diplomado por la Escuela de Isótopos en Harwell y la Escuela de Operación de Reactores de la AERE en el Reino Unido. Está en posesión de la Medalla de Física otorgada por la Real Sociedad Española de Física.

Publicamos, en esta entrega de los "Jueves Nucleares", el texto de la conferencia pronunciada por el Profesor Garzón en el Aula Club de la SNE.

Los depósitos de uranio del Precámbrico fueron los ambientes más apropiados para la emergencia de la vida. Los microfósiles más antiguos aparecen en las mismas formaciones que dichos depósitos.

INTRODUCCIÓN

Los microfósiles más antiguos hallados hasta el presente proceden de células cuya existencia se remonta a hace 3500 Ma ($1 \text{ Ga} = 10^3 \text{ Ma} = 10^9 \text{ a}$), unos 1000 Ma después de la formación de la Tierra (Shopf, 1983, 1987, 1993).

Cualquier Teoría del origen de la vida debe explicar, de una manera sencilla y realista, la evolución de la materia, desde un estado que pueda razonablemente considerarse como inicial (el Big Bang o el de las moléculas de la Tierra primitiva) hasta un estado final, que no es otro que el de la célula mencionada anteriormente. Dicha evolución ha seguido un camino a lo largo del cual han ido apareciendo sucesivamente bloques estructurales de creciente complejidad y orden. Este aumento local de orden (que implica una disminución de entropía del correspondiente sistema) va acompañado por un aumento del desorden (o caos) en el resto del universo, con lo cual se preserva el principio del crecimiento global de la entropía.

Con objeto de resumir las ideas actuales acerca de la Teoría general del origen de la vida, hemos incluido las figuras I y II, en las que se muestran las diversas etapas que verosimilmente jalonaron el camino evolutivo hacia la emergencia de la vida desde el origen del Universo o de las moléculas interestelares, respectivamente.

Mucho se está progresando en el estudio de los posibles mecanismos correspondientes a las últimas etapas, a pesar de lo cual quedan aún por resolver varios problemas, siendo uno de los más importantes el de la síntesis abiótica de biopolímeros, que corresponde a la etapa 6 de la figura I. Recordemos que los biopolímeros más importantes son las proteínas y los ácidos nucleicos (ADN, ARN). Proceden de los aminoácidos y nucleótidos respectivamente (Orgel, 1988).

En este trabajo desarrollamos una Teoría cuya hipótesis de trabajo considera que los ambientes más idóneos para la síntesis de biopolímeros fueron los depósitos de uranio (DU) anteriores a nosotros en tiempos comprendidos entre hace 2 Ga y 4 Ga. Además, existen razones que permiten suponer que los citados ambientes favorecieron la síntesis de los monómeros bioquímicos, circunstancia que confiere a dichos ambientes un papel muy relevante en la Teoría del origen de la vida, aquí en la

Tierra. Adelantaremos que nuestra Teoría es la única con apoyo empírico (Garzón, 1993).

EL PROBLEMA DE LA SÍNTESIS DE BIOPOLÍMEROS

La reacción de polimerización se puede escribir así:



en la que los M_i representan las moléculas de los monómeros y P la del polímero. El enlace entre dos moléculas M_i tiene lugar cuando se forma una molécula de agua por eliminación de un grupo OH y un grupo H de cada una de ellas.

Debemos señalar, en primer lugar, que los monómeros son sólidos, con temperaturas de fusión de pocos centenares de grados centígrados y, en general, solubles en agua. Por consiguiente para que la reacción [1] tenga lugar es necesario que los monómeros se hallen en disolución (acuosa), pues cualquier otra alternativa (por ejemplo su disolución en alcohol etílico) no sería realista. Esa exigencia constituye un serio inconveniente para explicar que, en los ambientes propuestos, la mencionada reacción se desplazase hacia la derecha. En efecto, pues se puede comprobar que la disolución de un polímero es inestable, transformándose (por hidrólisis) espontáneamente en la mezcla de los monómeros correspondientes.

El hecho de que la reacción [1] sea endoérgica no debió ser un factor limitativo, puesto que se dispuso de suficiente energía.

Los experimentos realizados demuestran (de acuerdo con las previsiones que proporciona el estudio de la entalpía libre de reacción) que los mayores índices de polimerización se consiguen sometiendo la disolución de los monómeros a la alternancia de períodos secos y húmedos, habiéndose fijado en 130°C la temperatura que, como mínimo, debe alcanzarse la mezcla de monómeros para que se pueda formar el polímero (Orgel, 1988).

LAS HIPÓTESIS

Consideraremos brevemente las diversas hipótesis que se han propuesto acerca de la naturaleza de los ambientes en los que presumiblemente tuvo lugar la eclosión de la vida. Del océano, donde Haldane situaba el caldo primordial, se pasó a considerar pequeñas charcas templadas, en remansos de manera o en mares someros. Se han sugerido, también, las surgencias termales de los fondos oceánicos; los cristales

de pirita, los microcristales de arcilla y otros mecanismos.

La hipótesis, en ciertos aspectos, más afín a la muestra es la de S.Fox (Fox y Dose, 1972), según la cual los volcanes favorecieron las condensaciones térmicas entre monómeros, una vez seca su disolución. Estas reacciones, por otra parte, no tienen lugar por debajo de 130°C , hecho que para Orgel es un serio inconveniente al considerar que, excepto en los propios volcanes, parece improbable que tanto en la superficie de la tierra primitiva como en la actual, la temperatura alcanzada excediese los 80°C . Sin embargo, si se invoca la presencia de catalizadores, las exigencias de temperatura pudieron haber sido menores. Debemos señalar que, en general, los volcanes no constituyen fuentes térmicas oscilantes.

LA TEORÍA DEL AUTOR

Nuestra hipótesis fundamental consiste en admitir, lo que por otra parte es muy verosímil, que, en general, los DU en tiempos t anteriores al actual ($2 \text{ Ga} < t < 4 \text{ Ga}$), se comportaron localmente como reactores nucleares de fisión. Su autocontrol por el agua ocasionó oscilaciones térmicas que, obviamente, pudieron dar lugar a la alternancia de períodos secos y húmedos, necesaria para la polimerización de los monómeros bioquímicos.

El desarrollo de la Teoría comprende los siguientes aspectos. Características de los DU del Precámbrico; Cálculos neutrómicos. Resultados; Acumulación de mineral de uranio; Oscilaciones térmicas; Síntesis de biopolímeros; Los DU y los microfósiles del Precámbrico.

CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DE LOS DU DEL PRECÁMBRICO

Aunque, como es sabido, el Precámbrico abarca el intervalo de tiempo

FI - Esquema simplificado de la Historia de la Materia, con especial énfasis en la aparición de la vida.

1. HIDRÓGENO
2. ELEMENTOS BIOGÉNICOS
3. MOLÉCULAS INTERESTELARES
 NH_3 , H_2O , CH_2O , CO , HCN , HC_2N , H_2S , PN , etc
4. MOLÉCULAS TIERRA PRIMITIVA
5. MONÓMEROS BIOQUÍMICOS
6. BIOPOLÍMEROS
 $4,5 \times 10^9$ años
7. CÉLULA ANCESTRAL
 $4,0 \times 10^9$ años
8. MICROFÓSILES PRECÁMBRICOS
 $3,5 \times 10^9$ años
9. PRIMATES Y HOMBRES

que se extiende desde hace 600 Ma hasta la formación de la Tierra (hace 4600 Ma), en lo sucesivo nos referiremos, por las razones que daremos oportunamente, al comprendido entre 2 Ga y 4 Ga. Los tiempos anteriores a 4 Ga no los consideramos debido a que durante ese período (eón Hadeano) las condiciones que reinaron en la Tierra, por ser muy extremas, no debieron permitir la aparición de la vida.

Geoquímicas

Los escudos o cratones precámbricos son las formaciones más antiguas del planeta (las rocas de Isua en Groenlandia, tienen 3,8 Ga de antigüedad).

Una característica muy importante del uranio, que se explica por sus propiedades geoquímicas, es su asociación a esas formaciones, de tal manera que puede afirmarse que más del 90% de las reservas mundiales de ese elemento se encuentran en ellas, particularmente en los escudos canadiense, australiano y de África del

Sur. Por razones termodinámicas el uranio no se encuentra en la Naturaleza en estado nativo, sino formando una enorme diversidad de especies mineralógicas (superior al centenar), lo cual es una consecuencia de la multiplicidad de sus estados de oxidación y de la existencia de otros iones, de los que el $U_2O_7^{2-}$ y UO_2^{2+} son los más importantes.

La inmensa mayoría de las especies mineralógicas existentes en la actualidad se pueden considerar como el resultado de la evolución química de un ancestro común: la uraninita, UO_2 .

Esta especie mineralógica era prácticamente la única existente en la corteza terrestre en tiempos anteriores a hace 2 Ga. Con posterioridad, la atmósfera se hizo oxigénica gracias a la función dorofílica de ciertos microorganismos, y la uraninita se oxidó y movilizó desde sus lugares de origen hasta su incorporación al mar o a ciertas áreas continentales, en las que, a favor de condiciones apropiadas, se pudieron formar depósitos sedimentarios. Uno de éstos es el famoso depósito de Oklo (Gabón), que se compor-

tó como un reactor nuclear natural hace precisamente 2 Ga y se mantuvo en operación durante 500 Ma (Garzón, 1975). Se considera como un ejemplo único y probablemente no tuvo relación con el origen de la vida debido a que la presencia de oxígeno libre debió impedir la evolución química, pues cualquier molécula que se formara en esa evolución acabaría transformándose en CO_2 y H_2O . Por el contrario, en los depósitos anteriores a hace 2 Ga, la uraninita no pudo ser movilizada químicamente y, en consecuencia, pudo acumularse a favor de los sucesivos ciclos igneos y erosivos. Muchos de estos depósitos han llegado hasta nosotros debido a que en los ciclos igneos y erosivos posteriores que tuvieron lugar en atmósferas oxigénicas (hace menos de 2 Ga), el mineral debió de quedar protegido de la acción del oxígeno por los recubrimientos.

Nucleares

Un depósito de uranio consiste en una mezcla de mineral de uranio, ganga y agua. Recordemos que el uranio contiene, fundamentalmente, dos isótopos, el U-235 y U-238, los cuales son radiactivos. Debido a que el período de semidesintegración es menor para el primero que para el segundo, la relación entre sus concentraciones atómicas N_5 / N_8 ha ido variando en el transcurso del tiempo, habiendo sido, de hecho, mayor en el pasado que en la actualidad (que es de un 0,72%).

Aunque químicamente ambos isótopos son prácticamente idénticos, sus diferencias nucleares son muy importantes en varios aspectos. Hablaremos a continuación de estas diferencias. El U-235 se fisiona cuando absorbe neutrones (multiplicándolos), más eficientemente cuanto menor es su energía; en cambio, el U-238 solamente se fisiona con neutrones rápidos, de energía superior a un cierto valor y (además, con poca eficiencia). Es un gran absorbente (estéril) para los neutrones de ciertas energías, por lo que se pierden a los efectos de fisionar el U-235. Por estas razones un explosivo nuclear (un multiplicador rapidísimo de neutrones) debe contener una proporción de U-235 cercana al 100% y, por tanto, pequeñas cantidades de U-238. En un sistema como éste los neutrones de fisión (que son rápidos) mantienen su energía porque apenas son frenados por estos átomos pesados. Con una proporción mayor de U-238 las absorciones estériles retiran neutrones y el sistema deja de ser automultiplicativo.

Otra alternativa a ese reactor rápido consiste en mezclar el uranio con un material que frene los neutrones y sea débilmente absorbente. De esta manera, al aumentar la eficiencia de la reacción de fisión en el U-235, se

F II - Contribución de moléculas interestelares y de los cometas en la evolución prebiológica. Formación de monómeros y polímeros bioquímicos.



necesita menos cantidad de este elemento para obtener la automultiplicación neutrónica. Un material que reúne aquellas características se llama moderador. Sus átomos deben ser livianos, siendo deseable, además, que su absorción neutrónica sea débil. Un magnífico moderador es el agua, aunque su absorción es algo mayor que la del agua pesada (óxido de deuterio).

La gran mayoría de los reactores comerciales constan de un combustible precisamente UO_2 , enriquecido entre el 2 y el 4%, unos materiales estructurales poco absorbentes y un moderador, que es el agua (reactores PWR y BWR).

Una de las características más importantes de un reactor nuclear (y, en general, de un sistema multiplicativo de neutrones) es la constante de multiplicación, que es el cociente entre las poblaciones neutrónicas de dos generaciones sucesivas. Se representa por K_α o K_{eff} , según que el medio multiplicativo sea muy extenso (infinito) o finito. Para este último caso el estado del sistema es subcrítico, crítico o supercrítico según que sea $K_{\text{eff}} < 1$, $K_{\text{eff}} = 1$, $K_{\text{eff}} > 1$ respectivamente. En el primer caso, la reacción de fisión acaba desapareciendo (si no existen fuentes neutrónicas extrañas); en el segundo, se mantienen estacionarios la densidad neutrónica, el flujo neutrónico y la energía desprendida. En cambio, en el tercer caso tiene lugar un aumento unidireccional e irreversible de las magnitudes mencionadas.

La situación estacionaria ($K_{\text{eff}} = 1$) no puede mantenerse a menos que se vaya reponiendo el combustible a medida que se va "quemando". Esto se consigue dotando al reactor con una masa de combustible superior a un cierto valor (la masa crítica, M_c) y neutralizando continuamente el exceso (reactividad) con un absorbente apropiado (barras de regulación) (Glasstone y Sesonke, 1980).

Volviendo a los depósitos de uranio se sabe que, con la excepción de algunos que ya fueron explotados exhaustivamente las concentraciones medias de los DU del Precámbrico, son del orden del 1% (expresado en UO_2).

Sin embargo, adelantaremos que, desde un punto de vista teórico, pueden existir (y de hecho se han encontrado), masas mineralizadas con concentraciones medias anormalmente elevadas (entre el 5 y el 50%) de UO_2 . Los llamaremos aglomerados (Roubault, 1958; Dodson, 1972). Obviamente un aglomerado puede considerarse como el núcleo de un reactor nuclear siempre y cuando sea $K_{\text{eff}} > 1$, condición que implica que su masa sea igual o mayor que M_c .

Obviamente, un aglomerado es una mezcla de mineral de uranio, ganga y agua. La característica más importante del mineral (que supondremos es

UO_2) es su enriquecimiento, e , y su concentración media.

Poniendo $J = N_5 / N_8$, se puede demostrar que $e = 100 J (1+J)^{-1}$; $J = 0.0072 \exp (0.822 t)$, siendo $J_0 = 0.0072$ el valor actual de N_5 / N_8 y J el correspondiente a un tiempo de t Ga anterior a nosotros. La concentración, c , es superior a la actual en el factor $(\exp \lambda_8 t + J_0 \exp \lambda_5 t) / (1+J_0)$

Precisamente, basándose en esta característica, Watheril e Ingrand (1953) y Kuroda (1956) sugirieron la posibilidad de que algunos DU del pasado remoto podrían haberse comportado como reactores nucleares. Hubieron de transcurrir unos 20 años para que, con el descubrimiento del fenómeno de Oklo, se confirmaran aquellas previsiones (Naudet, 1975; Hagemann, 1976).

Aunque dos o más agregados de la misma edad (y concentración) posean el mismo enriquecimiento, diferirán, sin embargo, en la composición de la ganga (y en el porcentaje de agua). Las variaciones conciernen a los porcentajes de los diversos elementos, pues el número y la clase de estos suele mantenerse de unas gangas a otras, las cuales, por otra parte, son muy parecidas para los DU (y aglomerados) que consideramos, y en especial para los anteriores a hace 2 Ga. En efecto, pues los posteriores, al ser sedimentarios (químicos), debido a la mayor diversidad de estos ambientes, pueden presentar gangas más diversas. Por razones geológicas tomaremos como ganga representativa de los aglomerados un granito tipo, del que, obviamente se conoce su composición (Granier, 1973). Las características más notables de la ganga se refieren a que es un aceptable moderador y, en general, poco absorbente. Estas características se explican, por un lado, porque casi un 90% de su masa se debe a los elementos O, Si, Al y, por otro, porque los porcentajes de los venenos neutrónicos (B, Cd, Gd) son prácticamente irrelevantes en lo que concierne a su absorción neutrónica.

El agua se halla como agua física (de imbibición) y agua química (de cristalización). Desempeña un papel esencial, tanto por sus propiedades físicas como nucleares.

CÁLCULOS NEUTRÓNICOS. RESULTADOS

Hemos construido un modelo que permite calcular, con suficiente aproximación, las magnitudes del sistema (supuesto uniforme) en función de los parámetros característicos del aglomerado. Las magnitudes que más interesan en este trabajo son K y M_c . Los parámetros son la composición del aglomerado y su edad t Ga. Los porcentajes de UO_2 , c , de la ganga,

G , y del agua, w , satisfacen la relación: $c + G + w = 100$.

Hemos utilizado la Teoría más sencilla que, aunque consienta indeterminaciones del + 25%, posee la ventaja de su sencillez. No nos detendremos en explicar los cálculos neutrónicos; diremos únicamente que es una Teoría de un sólo grupo de neutrones, lo que se justifica porque existe un moderador (que los ralentiza, termalizando) (Glasstone y Sesonke, 1980).

La influencia más espectacular es la del agua, pues para $w=0$ es $K < 1$, cualesquiera que sean los valores de c y de t , bastando cantidades pequeñas de ese líquido (del orden del 1%) para que pueda ocurrir $K > 1$ (figura III).

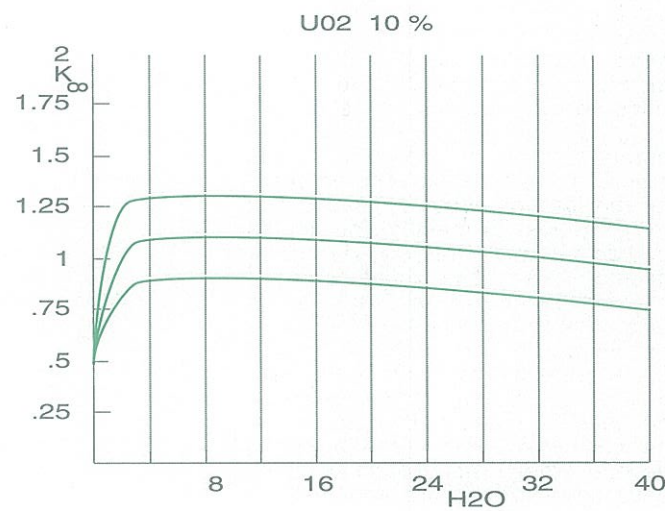
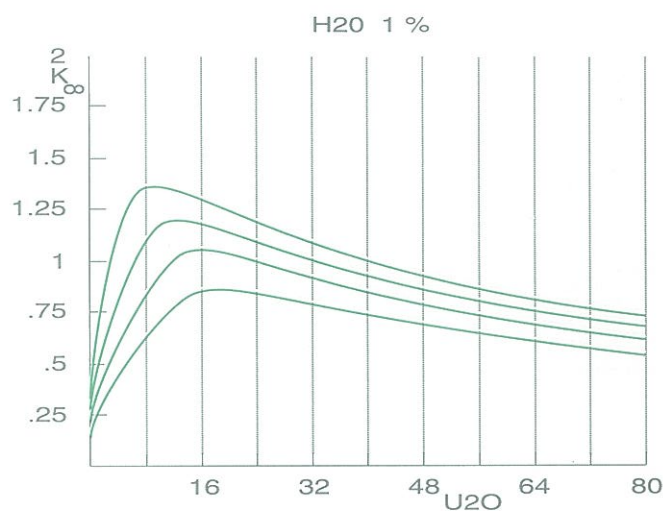
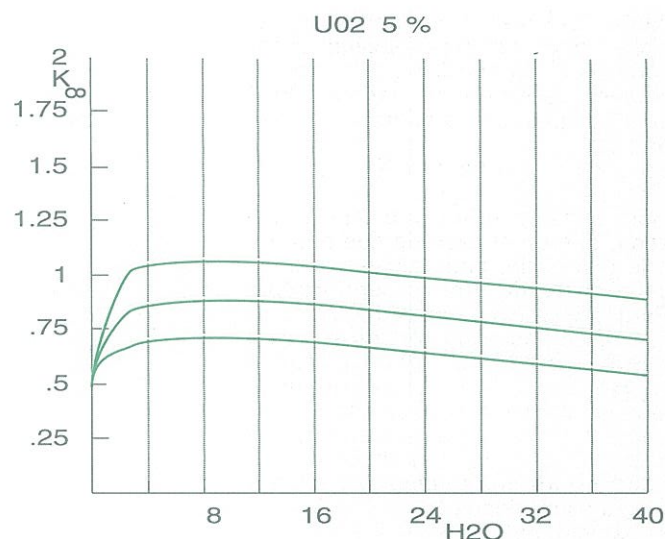
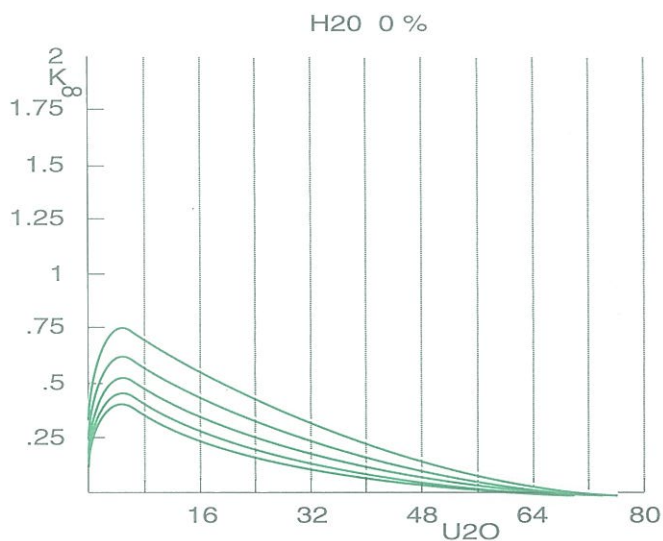
Las variaciones de K con w se han representado en la figura IV.

La magnitud más importante es M_c que, por definición, es la masa del aglomerado cuando $K_{\text{eff}} = 1$. Un sistema cerrado, estrictamente crítico, no puede ser estable, porque la condición $K_{\text{eff}} = 1$ no puede mantenerse debido al consumo de combustible. Por consiguiente la masa del aglomerado, lo mismo que la de cualquier reactor nuclear debe ser superior a M_c , en cuyo caso $K_{\text{eff}} > 1$, y el sistema también es inestable: la reacción se hace divergente. Veremos más adelante que el agua interviene como elemento de regulación, lo mismo que las barras en los reactores nucleares. Con todo, M_c es un valor de referencia imprescindible en este estudio.

La figura V muestra que los valores de M_c son tanto menores cuanto mayores son t y c . Por consiguiente, los fenómenos locales de criticidad debieron ser tanto más frecuentes cuanto más nos adelantamos en el pasado terráqueo.

ACUMULACIÓN DEL MINERAL DE URANIO.

La entalpía libre de formación del UO_2 es comparativamente la más baja de todas las de los compuestos de uranio que presumiblemente se pudieron formar, en cantidades apreciables, en el enfriamiento de un magma. Por consiguiente, al cristalizar éste, debió de formarse preferentemente el citado mineral y, a causa del carácter geoquímico del U^{4+} , debió de concentrarse principalmente en la fase pegmatítica, teniendo lugar una primera acumulación de UO_2 . En el siguiente ciclo erosivo, este mineral, junto con la toriarita (ThO_2), debieron de experimentar, a causa de sus elevadas densidades, una ulterior acumulación (detrítica) en los placeres, proceso que continuó, aunque sólo con el ThO_2 , una vez que la atmósfera se hizo oxigénica. Estas circunstancias explican que la relación Th/U



F III -Variación de K_{∞} con la concentración de UO_2 para contenidos de H_2O iguales a cero (gráfico superior) y a 1% (gráfico inferior). El parámetro de la familia de curvas es la edad del depósito, que varía por saltos de 0,5 Ga (curvas superiores) a 4,5 Ga (curvas inferiores). Se observa la gran influencia del contenido de H_2O en los valores de K_{∞}

F IV -Variaciones de K_{∞} con la concentración de H_2O para el 5% de UO_2 (gráfica superior) y el 10% de UO_2 (gráfica inferior). El parámetro de la familia de curvas es la edad del depósito, que varía por saltos de 0,5 Ga, desde 2,5 Ga (curvas inferiores) a 3,5 Ga (curvas superiores).

haya ido aumentando a partir de entonces.

La existencia de aglomerados, por otra parte, se presenta con relativa frecuencia en el mundo mineral, incluso aunque se trate de elementos menos abundantes que el uranio.

Citaremos, como ejemplos, los casos del mercurio, oro y carbono (diamante). Para el uranio la bibliografía recoge suficientes casos (Roubault, 1958; Dodson, 1972), siendo, quizá, el más espectacular el del DU de Oklo, donde se localizaron 16 aglomerados de grandes dimensiones (Naudet, 1975). Finalmente, señalaremos el hecho de que la relación N_5/N_8 , que ha sido determinada con suficiente precisión para varios depósitos continentales es constante dentro del intervalo 0.001-0.002. Este resultado sugiere que una fracción comprendida entre 1/1000 y 2/1000 de la cantidad total de uranio

contenida en un estrato de un espesor geológicamente adecuado (por ejemplo 1000 m) ha sido consumido en reacciones de fisión, probablemente con episodios críticos. Draganić et al. han estimado en 100 millones el número de estos episodios dentro de un estrato continental de 1000 m de espesor (Draganić et al., 1993).

OSCILACIONES TÉRMICAS.

Para fijar las ideas vamos a considerar que en una zona del depósito se llegó a acumular una masa superior a la crítica, bien en un único aglomerado o en varios más pequeños, pero cuya masa total superaba también el valor crítico. En estas condiciones, el aglomerado debió de comportarse como el núcleo de un reactor nuclear.

Con $K_{eff} > 1$, el sistema debió de hacerse supercrítico y, de no haber mediado otros factores, hubiera tenido lugar la fusión del aglomerado. Sin embargo, tanto la experiencia proporcionada por los reactores de Oklo, como las previsiones teóricas apoyan la idea según la cual el aglomerado, como núcleo de reactor, fue autocontrolado por el agua.

Partamos de un cierto valor, w , del contenido de agua del aglomerado, para el que $K_{eff} > 1$. En estas condiciones el flujo neutrónico, 0 , y la energía desprendida aumentan exponencialmente; el agua se evapora llegando a hervir a $T=373K$ o más, según que el aglomerado aflore o no a la superficie; w disminuye y cuando ocurre $w < 1\%$ se hace $K_{eff} < 1$, con lo que 0 y T disminuyen; el agua de las proximidades regresa a sus lugares de origen por difusión y/o condensación, aumentando w ,

haciéndose $K_{eff} > 1$, cerrándose así el ciclo. La temperatura máxima alcanzada es la de ebullición a la presión exterior, pudiendo superar los 100°C si el aglomerado no afloraba a la superficie.

En el caso de que al aglomerado tuviese, además, agua de cristalización, la temperatura máxima alcanzada, aún en el caso de que aflorara a la superficie, pudo alcanzar varios centenares de grados centígrados. Para que tal cosa ocurriera el contenido inicial de agua de cristalización debió ser tal que para él fuera $K_{eff} > 1$. En cualquier caso tendríamos un ciclo térmico, con una temperatura máxima y una temperatura mínima. Dicho de otra manera, la temperatura del aglomerado experimentó oscilaciones.

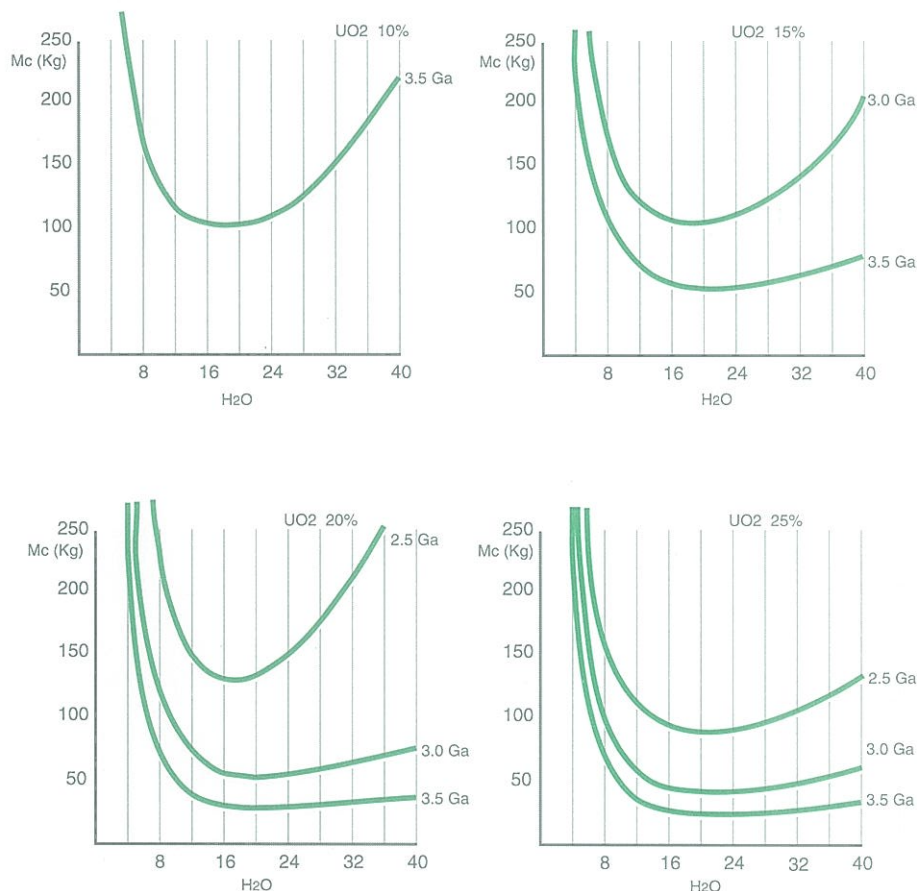
El estudio matemático de estas oscilaciones es muy difícil de abordar, incluso numéricamente, debido a que, como acabamos de ver, intervienen muchas variables que se influyen mutuamente. Hemos estimado el período de calentamiento, pues se puede tratar analíticamente suponiendo que el proceso es adiabático, lo que resulta verosímil si se tiene en cuenta que los procesos implicados son muy rápidos. En cambio, no hemos podido estimar el período de enfriamiento. Para flujos razonables, como los que existieron en Oklo, hemos estimado en una hora el período de calentamiento.

El de enfriamiento, desde unos centenares de grados, hasta unas pocas decenas se puede estimar en un día, de modo que un ciclo completo sería de ese orden. Dicha estimación se basa en la experiencia adquirida en el enfriamiento de cuerpos más comunes, como una pieza de hierro. Posiblemente se ha sobreestimado el valor anterior, lo que, carece de importancia, pues lo que interesa es el número de ciclos que realizó un aglomerado de tamaño medio. Tampoco podemos estimar este número. De nuevo la única referencia disponible al efecto es el ya citado reactor de Oklo, cuyo tiempo de funcionamiento se extendió a lo largo de 500 Ma. Para los demás casos, aunque los tiempos de funcionamiento fueran muy inferiores al citado, probablemente el número de ciclos fue suficiente para que tuviera lugar la síntesis de biopolímeros.

SÍNTESIS DE BIOPOLÍMEROS.

Como ya hemos indicado, la síntesis abiótica de biopolímeros consiste en la polimerización de los monómeros bioquímicos; en particular de los aminoácidos para formar proteínas y de los nucleótidos para formar los ácidos nucleicos (ADN, ARN).

Vamos a demostrar que los DU fueron los ambientes más favorables para



FV -Variaciones de la masa crítica con la concentración de H_2O para los valores de UO_2 que se indican. El parámetro de la familia de curvas es la edad del depósito, la cual se muestra en cada caso. Obsérvese que la masa crítica disminuye con la concentración de UO_2 y la edad.

las mencionadas síntesis. Pero antes parece obligado preguntarse por la procedencia de los monómeros correspondientes en los mencionados ambientes. Antes de dar respuesta a esta cuestión dedicaremos unas líneas a exponer la doctrina generalmente aceptada acerca de la formación de los monómeros a partir de las moléculas existentes en la Tierra primitiva. Se trata de procesos relativamente sencillos que, en general, han recibido confirmación experimental en diversos experimentos, cuyo paradigma es el de Miller y Urey (Miller, 1953).

No es cuestión de explicar las reacciones que pudieron tener lugar para que, con el concurso de la energía, las moléculas sencillas se transformaran en otras más complejas. Se acepta generalmente que la fuente de energía que intervino en estas reacciones procedía de las descargas eléctricas, repartidas por toda la Tierra. Se han considerado, además, otras fuentes de energía, sin que se

hayan tomado en cuenta la de la radiactividad de la corteza terrestre y, sobre todo, la local procedente de los DU. En estos ambientes, la energía procedente de la desintegración de las series del uranio es la más intensa de todas las demás y a ella hay que añadir la procedente de la fisión nuclear.

Sin embargo, existen razones que permiten suponer que los procesos de ionización fueron los que intervinieron más activamente en la síntesis de monómeros (y otras sustancias) a partir de las moléculas de la Tierra primitiva. Teniendo en cuenta la diferente intensidad de ionización de los fotones gamma y partículas (α y β) se infiere que debió de ser el Rn-222 el principal responsable de los mencionados cambios químicos. Como se recordará, el Rn-222 , elemento gaseoso de la serie del U-238, emigra desde sus lugares de origen hacia la superficie terrestre, de donde se desprende e incorpora a la atmósfera

y/o al agua, en el seno de cuyos medios se dispersa y/o se disuelve, emitiendo partículas alfa al desintegrarse (Garzón, 1992). Estas partículas alfa son las que ionizan las moléculas del medio.

Las moléculas ionizadas reaccionan mucho más fácilmente que las neutras porque no necesitan absorber energía (se llama de activación). De aquí que, en los ambientes de los DU, las partículas ionizadas, y, en particular, las partículas alfa, constituyeran el factor dominante en la síntesis de monómeros, a pesar de lo cual apenas se ha concedido importancia a este mecanismo, siendo, por ello, muy escasos los trabajos realizados al respecto (Garrison et al., 1951; Oparin, 1973; Martell, 1992). Ninguno de estos estudios concierne a los DU. El último se refiere a los ambientes existentes en el seno de los acuíferos, que al ser contener elevadas concentraciones de Ra-226 y Rn-222, originan flujos importantes de partículas alfa que, por ionización, podrían favorecer la síntesis de monómeros. Sin embargo, la polimerización de éstos para formar biopolímeros, estaría probablemente impedida por causa de la presencia de agua.

Considerando los ambientes propios de los DU, la formación de los monómeros tendría lugar tanto en la atmósfera como en porciones de agua de volumen indeterminado existentes en el área del depósito. En el primer caso, los productos formados se irían depositando en la superficie por la acción de la gravedad y/o de la lluvia, acabando por incorporarse al medio acuoso.

Resulta razonable suponer que, a causa del enorme reservorio de moléculas biogénicas, la concentración local de éstas se mantuviera prácticamente invariable durante prolongados periodos de tiempo. Como, por otra parte, la intensidad de ionización sobre el DU tampoco debió experimentar variaciones importantes, la tasa de producción de monómeros y otras sustancias debió también permanecer constante, así como su incorporación al ambiente acuoso. A causa de la acumulación en este medio, debió de alcanzarse una concentración de los productos muy superior a la de la atmósfera.

Aparte de los monómeros cabe razonablemente suponer que existieran otras moléculas, algunas de elevadas masas moleculares, como es el caso de Kerogeno, que es una mezcla muy compleja de carbón e hidrocarburos y que ha sido localizada en el depósito de Oklo (Nagy et al., 1993). La diferente solubilidad de los monómeros y de estas otras sustancias pudo facilitar su separación.

Consideraremos a continuación la síntesis de los biopolímeros. Las oscilaciones térmicas, dan lugar, según dijimos a oscilaciones del contenido

de agua del aglomerado y, por consiguiente, a las de su entorno más próximo, siendo éstas tanto menos acusadas cuanto mayor sea su distancia al aglomerado.

En el primer caso puede resultar difícil imaginar la síntesis de biopolímeros. Sin embargo, debido a que sus poros se hallan intercomunicados, se tendría una red, parcial o totalmente ocupada por el agua, en la que los monómeros podrían estar disueltos. Las sucesivas evaporaciones del agua (periodos secos) y condensaciones (periodos húmedos) pudieron favorecer la síntesis de biopolímeros. En el segundo caso, fuera del aglomerado, podemos admitir la presencia de volúmenes indeterminados de agua líquida, ocluidos o en oquedades, y con tal de no estar demasiado alejadas del aglomerado se hallarían sometidas al flujo calorífico oscilante. Durante los periodos secos podrían haberse formado los coacervados (Fox y Dose, 1972; Fox, 1988; Yanaguna et al., 1988). A partir de aquí se habrían originado los primitivos microorganismos a través de una serie de procesos, todavía no bien establecidos, y que considero caen fuera de los límites de este trabajo.

De acuerdo con la Teoría desarrollada, resulta muy verosímil que los primeros microorganismos aparecieran en los ambientes que hemos considerado, los cuales, por otro lado, y a causa de las radiaciones ionizantes podrían haber destruido los microorganismos a medida que iban apareciendo. Sin embargo vemos a ver que existen fundadas razones para admitir que la destrucción de las células debió, en todo caso, ser un acontecimiento bastante improbable. Dichas razones son las siguientes:

- 1) Las curvas de supervivencia de cultivos de células muestran que para dosis inferiores a 150 rads no aparecen deterioros serios (Latorre Travis, 1979).
- 2) La existencia de bacterias en ambientes radiactivos mucho más agresivos que los que estamos considerando (Hoyle, 1984; Segerer et al., 1993).
- 3) La característica que presenta el oxígeno de exaltar la radiosensibilidad de las células (y tejidos) junto con la práctica inexistencia de aquella sustancia hasta hace unos 2 Ga.

Por consiguiente hasta esa época (es decir hace menos de 2 Ga) el deterioro de los organismos por la radiación ionizante debió de ser muy inferior a épocas posteriores, oxigénicas. Con todo, debemos señalar que, en cualquier caso los microorganismos pudieron acomodarse en lugares menos agresivos, incluso dentro del área del depósito, y/o blindarse fácilmente contra la acción de las partículas más dañinas (las alfa), dado que, como es

sabido, son detenidas por espesores muy pequeños (de pocos cm de aire o de pocos um de tierra o agua).

LOS DEPÓSITOS DE URANIO Y LOS MICROFÓSILES DEL PRECÁMBRICO

De acuerdo con lo expuesto en el apartado 6, las exigencias de concentración de UO_2 para formar una masa crítica disminuyen con la edad del depósito debido al correspondiente aumento del enriquecimiento del uranio. Es decir, la aparición de la vida se presenta como un acontecimiento tanto más probable cuanto más nos remontamos hacia el pasado. Pero habida cuenta de que, en nuestro caso, el sustrato de la vida fue el planeta Tierra, nos encontramos con un límite remoto que se sitúa en el momento en que se consolidó como tal, hace 4,6 Ga. Ahora bien, como el eón Hadeano duró unos 0,8 Ga, y durante el mismo no pudo probablemente emerger la vida, según dijimos anteriormente, el límite práctico hay que situarlo en unos 4 Ga anterior a nosotros.

En cambio, la estimación del límite próximo es, en principio, más incierto debido a que los pequeños enriquecimientos debieron compensarse con elevadas concentraciones de mineral y grandes masas críticas, factores cuya concurrencia resulta tanto menos probable cuanto menor es la edad del depósito. Estudiando las variaciones de M_C hemos estimado que, en principio, el límite teórico próximo es de 1,1 Ga, para la aparición de la vida. Por consiguiente existiría, en principio, una "ventana" (entre los límites citados) para este acontecimiento. Sin embargo, no es fácil dar un sentido realista al límite próximo, debido por una parte, a la posible propagación sobre el planeta de los microorganismos aparecidos en un determinado lugar y, por otra parte, al hecho de que en una atmósfera oxigénica los monómeros bioquímicos probablemente no pudieron formarse, ya que cualquier molécula en presencia de oxígeno acabaría transformándose en CO_2 y H_2O . Por consiguiente la "ventana" se hace más estrecha, entre hace unos 4 Ga y 2 Ga, con un intervalo de 2 Ga.

En el apartado de geoquímicas señalamos que el uranio se encuentra preferentemente en los escudos precámbricos que, como es conocido, cubren una gran proporción de los continentes. Por otra parte, y quizá por la estabilidad asociada a dichos escudos, es importante señalar que los microfósiles que han sido descubiertos se hallan localizados también en dichas formaciones. Quiere decirse, por tanto, que, en general, existe una correlación bastante aceptable entre las áreas donde han aparecido

esos microfósiles y los DU más antiguos.

Una mayor aproximación a esta conclusión se obtiene considerando las áreas donde preferentemente se han encontrado microfósiles. Estas áreas corresponden a Canadá, África del Sur y Australia.

En Canadá los microfósiles han aparecido en la formación Gunflint Iron, perteneciente a rocas precámbricas de hace 2 Ga. El célebre depósito de uranio de Blind River se encuentra en la misma área. Se puede comprobar, en un mapa geológico de la región del Lago Superior, que dicha formación (Gunflint Range) se halla muy próxima a Port Arthur (unas 12 millas), donde existe un DU en explotación.

En África del Sur, particularmente en el Dominion Reef (edad 1,8 Ga) se han encontrado microfósiles. También en este caso los microfósiles y el uranio aparecen en las mismas áreas. A pesar de su localización tan distante, los depósitos uraníferos de Gunflint y de África del Sur guardan entre sí un gran parecido, lo que podría explicarse por haber tenido un origen análogo y haber experimentado cambios tectónicos parecidos (Ruten, 1968).

El caso de Australia es muy interesante debido a que existen varias formaciones donde han aparecido microfósiles, tratándose, además, de un país con grandes reservas de uranio, localizadas preferentemente en unas determinadas áreas. Se puede comprobar la buena coincidencia entre unas y otras, destacando, por su mayor novedad, el caso de los fósiles encontrados en Marble Bar y la formación Pilbara (Schopf, 1983, 1987, 1993), donde se ubican DU. Precisamente el nombre de esa formación ha servido para nombrar un mineral, la pilbarita, cuyo contenido en uranio es muy elevado (del 24%) (Roubault, 1958).

CONCLUSIONES

Los DU constituyen fuentes energéticas localmente muy intensas, con valores de los flujos correspondientes, superiores a los que se han venido considerando hasta ahora para el planeta en su conjunto.

Desde el punto de vista de la evolución química hasta la formación de los monómeros bioquímicos, la manifestación energética más relevante es la ionización producida, principalmente, por las partículas alfa emitidas por el radón y descendientes en el seno de los medios aéreo y acuoso de los DU. Sin embargo, la conclusión que más nos interesa señalar se refiere a que los DU anteriores a hace unos 2 Ga fueron los ambientes más idóneos para la síntesis de los biopolímeros.

Esta hipótesis se basa en que, de acuerdo con la física nuclear y la geodinámica, los DU del Precámbrico debieron presentar, localmente, episodios de criticidad, en cuyo caso su autocontrol por el agua dio lugar a focos térmicos oscilantes que al actuar sobre las disoluciones de los monómeros tuvieron que ocasionar la alterancia de períodos secos y húmedos necesarios para la polimerización de los monómeros. Las condiciones para que se presentara la criticidad se reducen a la existencia de masas mineralizadas en aglomerados de tamaños y concentraciones adecuadas, las cuales son cada vez menos restrictivas a medida que se consideran depósitos más antiguos. La existencia de aglomerados es un fenómeno frecuente en mineralogía, que no tuvo por qué ser una excepción en el caso de los DU.

Los microfósiles más antiguos se han localizado en formaciones que coinciden con las de los DU. Esta circunstancia constituye un apoyo a nuestra Teoría. La ventana temporal, dentro de la cual pudo emerger la vida, se sitúa entre hace 2 Ga y 4 Ga.

BIBLIOGRAFÍA

- **Draganç, S.C., Draganic, Z.D., Adloff, J.P.:** 1993, *Radiation and Radioactivity on Earth and beyond*. CRC Press, Boca Raton.
- **Dodson, R.G.:** 1972, in: *Some environments of formation of Uranium deposits*. Uranium prospecting Handbook, The Institution of Mining and Metallurgy, Edited by Bowie, Davis and Ostle, London.
- **Fox, S.W.:** 1988, *The emergence of life*, Basic Books, New York.
- **Fox, S.W., and Dose, K.:** 1972, *Molecular evolution of life*, Freeman, San Francisco.
- **Garrison, W., Morrison, D., Hamilton, I., Benson, A., and Calvin, M.:** 1951, *Science* **114** y 416.
- **Garzón Ruipérez, León:**
 - 1975, *An. Fis.* **71**, 68-74.
 - 1975, *An. Fis.* **71**, 75-81.
 - 1992, *El radón y sus riesgos*. Servicio de Publicaciones Universidad. Oviedo.
 - 1993, *Uranium deposits and the origin of life*, 10th International Conference on the origin of life, Barcelona.
- **Glasstone, S. and Sesonske, A.:** 1980, *Nuclear Reactor Engineering*, Van Nostrand, NY.
- **Gramier, C.L.:** 1973, *Introduction a la Prospection Géochimique des gîtes métallifères*, Masson et Cie, París, 2 - 4.
- **Hagemann, R.:**
 - 1976, *Revue Générale Nucléaire*, **2**, 122-126.
 - 1976, *Revue Générale Nucléaire*, **2**, 133-134.
- **Hoyle, F.:** 1984, *El Universo Inteligente*, Gijalbo, S.A., Barcelona.
- **Kuroda, P.K.:**
 - 1956, *J. Chem. Phys.* **25**, p.781.
 - 1956, *J. Chem. Phys.* **25**, p.1295.
- **Latorre Trevis, E.:** 1979, *Radiobiología médica*, Editorial A.C., Madrid, España.
- **Martell, E.A.:**
 - 1992, *J. Mol. Evol.* **35**, 346-355.
 - 1993, *7th Issol Meeting Abstracts* **76**, Barcelona, Spain, July 4-9.
- **Mason, B.:** 1960, *Principios de Geoquímica*, Ediciones Omega, Barcelona, España.
- **Mason, S.F.:** 1992, *Chemical evolution*, Clarendon Press, Oxford.
- **Miller, S.L.:** 1953, *Science* **17**, 528-529.
- **Muller, W.J.:**
 - 1983, *Physics Letters A* **96**, 319.
 - 1985, *J. Theor. Biol.* **115**, 429-453.
 - 1993, *7th Issol Meeting Abstracts*, Barcelona, Spain, July 4-9.
- **Nagy, B., Bauthier-Lafaye, F., Holliger, P., Nossman, D.I., Leventhal, J.S. and Rigali, M.J.:** 1993, *Role of organic matter in the Proterozoic Oklo natural fission reactors*, Gabon, Africa, *Geology*, **21**, 7 p.655.
- **Naudet, R.:** 1975, *Revue Générale Nucléaire*, **1**, 45-50.
- **Oparin, A.I.:** 1973, *Origen de la vida sobre la Tierra*, Editorial Tecnos, Madrid.
- **Orgel, L.E.:** 1988, *Los orígenes de la vida*, Alianza Universidad Madrid.
- **Oró, J.:** 1991, *Origen y evolución de la vida. Nuestros orígenes*, Fundación Principado de Asturias, 169-199.
- **Roubault, M.:** 1958, *Géologie de l'Uranium*, Masson et Cie, París, p. 381.
- **Rutten, M.G.:** 1968, *Aspectos geológicos del origen de la vida sobre la tierra*, Editorial Alhambra, S.A., Madrid.
- **Schopf, W.J.:**
 - 1983, *Earth's Earliest Biosphere*, Princeton University Press, New Jersey.
 - 1993, *Science* **260**, 640-645.
- **Schopf, W.J. and Packer, B.M.:** 1987, *Science* **237**, 70-73.
- **Seegerer, A.M., Burggraf, S., Fiala, G., Huber, G., Huber, R., Pley, U. and Stetter, K.O.:** 1993, *Origins of life* **23**, Nº 1, 77-90.
- **Wetherill, G.W. and Inghram, M.G.:** 1953, *Proc. Conf. Nuclear Processes in Geologic-Settings*: Washington, D.C., National Research Council, p. 30-32.
- **Yanagawa, H., Ogawa, Y., Kojima, K. and Ito, M.:** 1988, *Origins of life* **18**, 179-207.
- **Yockey, H.P.:** 1981, *J. Theor. Biol.* **91**, 13-31.