

ORIGEN DEL OXÍGENO ATMOSFÉRICO TERRESTRE

El oxígeno atmosférico ha sido y es fundamental para el origen y evolución de la vida sobre la Tierra.

La atmósfera actual está formada por N_2 (78%), O_2 (21%), Ar (0.93%), CO_2 (0.03%) y cantidades variables de H_2O y otros componentes menores. Debemos decir que más del 99.5% del Ar es ^{40}Ar que, como sabemos, proviene de la desintegración radiactiva del ^{40}K .

La atmósfera primitiva, por ejemplo hace 4500 Ma, carecía de oxígeno, siendo su composición diversamente interpretada. Así, el modelo de Oparin-Urey, sugiere una composición predominantemente compuesta por CH_4 , con menores porcentajes de NH_3 , H_2 , He y H_2O . Por el contrario, el modelo de Abelson define una atmósfera primitiva formada por CO_2 , CO, H_2O , N_2 y otros componentes menores. Hoy en día se considera a la atmósfera primitiva formada principalmente por vapor de agua y CO_2 , con H_2S , CO, H_2 , N_2 , CH_4 , NH_3 , HF, HCl, NH_3 y Ar.

Esta atmósfera primitiva fue formada por tres posibles fuentes: gases residuales liberados durante la acreción de la Tierra, gases de origen extraterrestre y gases liberados durante los procesos volcánicos.

En relación al grado de crecimiento de la atmósfera, a través de los tiempos geológicos, hay dos modelos. El modelo de Fanale, de crecimiento rápido, y el modelo de Rubey, de crecimiento lento. Por la evolución del ^{40}Ar se puede decir que el modelo rápido es el más verosímil ya que, como sabemos, éste isótopo radioactivo ha crecido casi expo-

Por Vicente Sánchez Cela

Origen del oxígeno atmosférico terrestre

nencialmente en la atmósfera terrestre desde el origen de la Tierra, hace alrededor de 4500 Ma y principalmente en los primeros 1250 Ma.

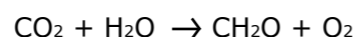
Los estudios geológicos-geoquímicos de las formaciones rocosas de la corteza son buenos indicadores de la evolución del oxígeno atmosférico a través de los tiempos geológicos. Según Kasting (1), la evolución del O₂ en la atmósfera terrestre puede dividirse en tres etapas: reducida, oxidante y aerobia, cuyas principales formaciones geológicas están definidas por depósitos de uraninita, capas rojas y depósitos con formas de vida desde anaeróbicas a aeróbicas. Es esta última etapa la más interesante en relación con el origen del oxígeno y de las diferentes formas de vida (procariontas-eucariotas).

ORIGEN DEL O₂ EN LA ATMÓSFERA

Hoy en día se consideran dos mecanismos, en diferente proporción, como productores de O₂. La fotosíntesis como principal mecanismo y la fotodisociación como un productor secundario de O₂. De los estudios geológicos, geoquímicos e isotópicos consideramos que en los primeros tiempos geológicos hubo, además de los citados, otro mecanismo asociado a la trans-

formación-desintegración del K₂O del manto superior y que tuvo lugar durante el origen y crecimiento de la corteza granítica terrestre.

Fotosíntesis: Los primitivos organismos de la Tierra usaron la luz solar como energía para convertir H₂O y CO₂ en carbohidratos al mismo tiempo que liberan oxígeno a la atmósfera (fig. 1A).



Este proceso orgánico tuvo principalmente lugar por la acción conjunta de las plantas verdes y cianobacterias (algas verde-azuladas). Ésta es la razón por la que se cree que esta forma de fotosíntesis fue "inventada" por ciertos organismos anaerobios desde hace 3800 Ma, los cuales atrapaban la energía solar directamente. Estos primitivos organismos fueron esqueletos a partir del carbón del CO₂ atmosférico. La contribución

del oxígeno originado por fotosíntesis, en comparación a otros mecanismos, se plasma en la fig. 2. Como puede apreciarse, la fotosíntesis fue importante en dos etapas, entre 2400 y 1900 Ma, y entre 1500 y 500 Ma.

Fotodisociación: Este proceso orgánico implica la rotura de las moléculas de agua por la luz

ultravioleta del Sol (ondas cortas entre 1500 y 2100 Å). Las ligeras moléculas del hidrógeno tienden a escapar del campo gravitatorio terrestre, mientras el oxígeno es retenido. Una pequeña proporción es convertida en ozono (O₃), el cual se concentra en la atmósfera superior formando una capa más o menos continua. Este ozono absorbe la luz ultravioleta, actuando como una barrera muy importante para el desarrollo de las diferentes formas de vida sobre la Tierra (fig. 1B).

DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA DEL ⁴⁰K

Es un mecanismo adicional en la producción de oxígeno que tiene lugar durante la transformación del manto superior en corteza granítica, que conlleva procesos de desintegración radiactiva del ⁴⁰K.

Este mecanismo está relacionado con la transformación de minerales del manto superior con potasio de alta densidad (ej. K-holandita) en otros de la corteza de baja densidad (ej. ortosa), ambos con la misma fórmula química de KAlSi₃O₈ (en equivalentes químicos 6SiO₂*Al₂O₃*K₂O).

El proceso de desintegración radiactiva está basado en la conversión de ⁴⁰K en ⁴⁰Ar + ⁴⁰Ca. Debido a que el potasio está asociado al oxígeno, la transformación del ⁴⁰K podría tener la forma siguiente (fig. 1C):



Como sabemos, asociado a este proceso radiactivo tiene lugar la formación simultánea de ⁴⁰Ca, cuyas implicaciones geológicas-geoquímicas consideramos de gran importancia y que será motivo de un próximo trabajo.

Dentro de los modelos dominantes sobre el porcentaje en potasio del manto superior de la Tierra, este mecanismo de producción de oxígeno sería insignificante. Pero en un modelo

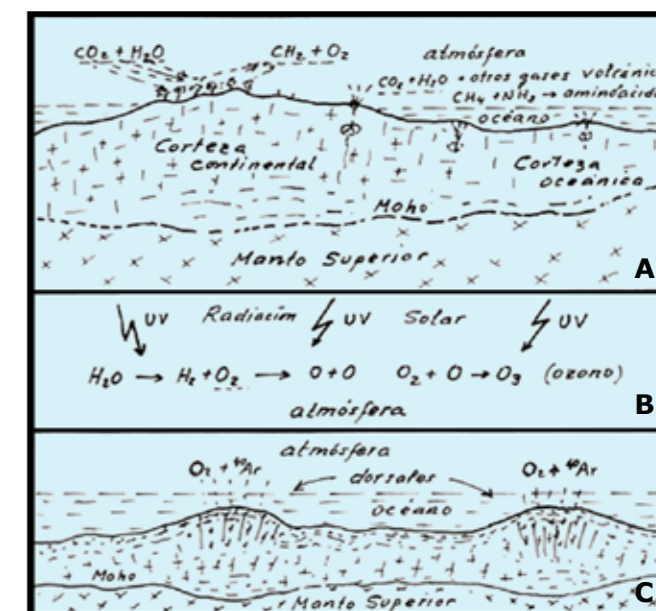


FIG. 1.- MECANISMOS DE PRODUCCIÓN DE OXÍGENO ATMOSFÉRICO:

A) Fotosíntesis, principal mecanismo que ha ido creciendo a través de los tiempos geológicos, principalmente desde el Mesozoico.

B) Fotodisociación que, aunque es un productor menor de oxígeno, tuvo lugar desde los primeros tiempos geológicos hasta la actualidad.

C) Desintegración del ⁴⁰K, que también es un productor menor de oxígeno y que tuvo lugar principalmente en los primeros 1250 Ma.

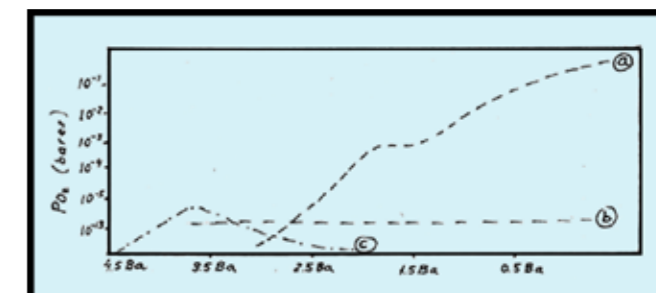


FIG. 2: CONTRIBUCIÓN DE LAS DIFERENTES FUENTES AL CRECIMIENTO DEL OXÍGENO ATMOSFÉRICO:

a) fotosíntesis, b) fotodisociación y c) desintegración del ⁴⁰K.

Origen del oxígeno atmosférico terrestre

del manto superior con mucho más potasio, la producción de oxígeno debería ser tomada en cuenta, principalmente, en los primeros 1250 Ma (período de semidesintegración del ^{40}K).

El principal reto de este modelo adicional, en la producción de oxígeno, radica en demostrar que el manto terrestre es bastante más rico en potasio que los modelos dominantes actuales. El porcentaje de K_2O del manto superior es actualmente deducido de rocas ígneas consideradas como representantes del manto superior: peridotitas, donde el porcentaje de este óxido oscila entre 0.01 y 0.05%. La media es aproximadamente de un 0.025%. En un nuevo modelo de composición del manto superior se deduce un porcentaje más elevado de K_2O , alrededor de un 3%, muy similar a las rocas corticales graníticas (2).

Nuestros argumentos geológicos-geoquímicos sobre un manto superior más rico en K_2O , ya considerados en varios trabajos previos, están principalmente basados en los siguientes datos:

- Evolución de las rocas ígneas a través de los tiempos geológicos.
- Modelos para producir rocas máficas-ultramáficas en la corteza terrestre.
- Significado del gran exceso de ^{40}Ar existente en la atmósfera.

- Exceso de flujo térmico asignado a los elementos radiactivos de vida larga en muchas zonas geológicas activas.

En base a estos datos-argumentos hemos propuesto, ya hace varios años, una nueva composición para el manto superior y que definimos como manto superior densialítico. Creemos que si este nuevo manto superior es considerado, muchos paradigmas de las Ciencias Geológicas deberían ser cambiados.

Muchos geoquímicos han argumentado que, con el bajísimo porcentaje de ^{40}K en el manto superior es muy difícil sostener el modelo propuesto. Sabemos que el potasio tiene tres isótopos cuyos porcentajes son los siguientes:

$$\begin{aligned} {}^{39}_{19}\text{K} &= 93.258 \pm 0.0029 \% \\ {}^{40}_{19}\text{K} &= 0.01167 \pm 0.00004 \% \\ {}^{41}_{19}\text{K} &= 6.7302 \pm 0.0029 \% \end{aligned}$$

Sabemos también que, en base al período de desintegración radiactiva del ^{40}K , este isótopo fue más abundante hace unos 4500 Ma, aproximadamente un 12.5 % más elevado al principio de la formación de la Tierra y antes del comienzo de los procesos geológicos (3).

En base a esto podemos decir que el porcentaje de ^{40}K en aquella época pregeológica fue aproximadamente 0.1458%, un porcentaje a tener en cuenta en los procesos radioactivos-geoquímicos involucrados.

Si consideramos el modelo densialítico (2) para el manto superior, no es difícil deducir que de un 0.1458% de ^{40}K en el manto superior durante su transformación en corteza granítica se puede explicar el exceso en ^{40}Ar de la atmósfera y la formación del O_2 asociado.

Simplemente del estudio sobre el significado del exceso en ^{40}Ar de la atmósfera terrestre se podría ya deducir un mayor porcentaje de ^{40}K en el manto superior. Este exceso varía según los autores de 10000 hasta 30000 veces el ^{40}Ar según los modelos mantélicos, peridotíticos-pirólíticos (4). Este exceso de ^{40}Ar puede ser explicado fácilmente si consideramos un manto superior con más ^{40}K , desde 0.1458% hace 4500 Ma hasta 0.01167% en la actualidad.

Este mecanismo adicional en la producción de oxígeno atmosférico, que comenzó hace 4500 Ma, junto al proceso de fotodisociación, y que operó desde el comienzo de los procesos geológicos

(aproximadamente hace 3900 Ma), pudieron ser fundamentales para la puesta en funcionamiento del principal mecanismo en la producción de oxígeno, la fotosíntesis. Así el bajo-muy bajo porcentaje de oxígeno producido en las primeras etapas de la Tierra facilitaron el origen, evolución y crecimiento de la masa vegetal, desde zonas oceánicas a continentales a través de los tiempos geológicos y el desarrollo, en el tiempo, de la fotosíntesis, fundamental para el origen y evolución del oxígeno y de la vida en la Tierra.

REFERENCIAS

- 1.- Kasting (1987). Precamb. Res., 34, 205-229.
- 2.- Sanchez Cela (2000). Densialite: A New Upper Mantle. Univ. Zaragoza, Spain, 261 pp.
- 3.- DePaolo (2004). Rev. Mineral. Geochem., 55, 255-288.
- 4.- Allegre et al. (1996). Geophys. Res. Let., 23, 3555-3557.

Vicente Sánchez Cela
Miembro del Senatus Científico
Dpto. Ciencias de la Tierra
Universidad de Zaragoza