

## Tafosfera: el registro de las relaciones biogeológicas

J. Morales<sup>1</sup>, M. Nieto-Díaz<sup>2</sup>

### RESUMEN

La presencia y actividad de la Vida han modificado profundamente la Tierra, diferenciándola de todos los demás planetas del Sistema Solar. La interacción entre la Biosfera y la Litosfera ha dejado una huella característica e imborrable en la mayor parte de las capas superficiales de nuestro planeta que se manifiesta en la formación de una capa o geosfera con características diferentes del resto de las capas que componen nuestro planeta. Para esta capa proponemos el término Tafosfera, enfatizando el hecho del enterramiento causante de que materiales originados directa o indirectamente por los organismos pasen a la Litosfera, escapando de la Biosfera. La Tafosfera pretende ser un concepto paleontológico y sedimentológico que plantee un escenario coherente para la comprensión de los procesos tafonómicos que han ocurrido a lo largo de la historia de la Tierra. La Tafosfera se encuentra limitada, por una parte, por su interfase con la Biosfera y, por otra, por las capas de la corteza terrestre que no han sufrido alteraciones biológicas directas. El concepto de Tafosfera suministra un escenario general mucho más coherente y preciso para el conocimiento de la evolución de la Vida y su interacción con la Litosfera que denominaciones procedentes de ámbitos diferentes, tales como «registro fósil» o «corteza terrestre». La Tafosfera incluye la totalidad del Registro fósil, junto con el Registro geológico formado como respuesta a las condiciones bióticas existentes en la superficie terrestre. La entidad del concepto permite distinguir dos génesis diferentes en la formación de la corteza terrestre: una abiótica, en la que los materiales son mayoritariamente basaltos originados en el Manto litosférico y otra biótica, en cuya composición intervienen materiales que, en algún momento de su historia, han residido en la Biosfera.

**Palabras clave:** Tafosfera, Biosfera, Geobiología, Registro fósil.

### ABSTRACT

Life has deeply modified the Earth, making it to differ from any other planet of the Solar System. Biosphere and Lithosphere interaction has changed the surface of our planet leading to the formation of a layer different from any other of the Earth. We propose the term Taphosphere to name this layer, which emphasizes the process of burial responsible of the transference of biologically originated materials from the realm of the Biosphere to the Lithosphere. The Taphosphere aims to be a palaeontological and sedimentological concept establishing a framework for the comprehension of the taphonomical processes recorded throughout the history of the Earth. According to its definition, the Taphosphere is limited, on the one hand, by its interphase with the Biosphere, and, on the other hand, by those layers of the earth crust that have not suffer any direct biologically-mediated alteration. The concept of Taphosphere provides a more precise and coherent framework for the study of the interaction between Life and Lithosphere than previous terms like Fossil Record or Earth Crust. In fact, Taphosphere incorporates the whole Fossil Record plus all the Geological Record formed under the biological conditions of the earth surface. Taphosphere concept also allows distinguishing between two different geneses for the Earth Crust, an abiotic one, formed by basalts of Mantle origin, and a biotic crust including materials that have been part of the Biosphere in a given moment of their history.

**Key words:** Taphosphere, Biosphere, Geobiology, Fossil Record.

<sup>1</sup> Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2 Madrid. E-28006. Email: jorge.morales@mncn.csic.es.

<sup>2</sup> Hospital Nacional de Parapléjicos, SESCAM. Finca La Peraleda, s/n. Toledo. E-45071. Email: mcnd153@mncn.csic.es.

## Introducción

Las premisas determinan en gran medida la interpretación de las observaciones y, consecuentemente, la percepción de la realidad. Dentro del terreno de la Paleontología, una premisa comúnmente aceptada es que el registro fósil es muy escaso e incompleto y que la fosilización es un fenómeno particularmente improbable (véase, por ejemplo, en el terreno científico, Skelton, 1993 y, en el popular, Wikipedia). Esta noción tiene sus raíces en los comentarios de C. Darwin acerca de la «extremada imperfección del registro fósil» (Darwin, 1859). Dado que Darwin realizó estas apreciaciones dentro de la defensa de la evolución por selección natural, generaciones de paleontólogos, poseedores de datos de primera mano y que podrían haber contradicho esta premisa, la han aceptado sin oposición ante la posibilidad de ser tachados de antidarwinistas. Sin embargo, la observación del registro geológico muestra que el proceso de fosilización es un fenómeno común, que se ha producido continuamente a lo largo de la Historia de la Tierra. De hecho, la mutua interacción entre la Biosfera y la Litosfera es, y ha sido, de tal magnitud que ha dejado una huella característica e imborrable en la mayor parte de las capas superficiales de nuestro planeta. La intención de este trabajo es explorar la dimensión histórica de esta interacción y demostrar que la superficie de nuestro planeta es el resultado y la prueba de dicha interacción. Asimismo, introducimos el concepto de Tafosfera para denominar a la capa resultante de la interacción entre la Litosfera y la Biosfera y exploremos su extensión y sus límites así como sus consecuencias para nuestra concepción del estudio de la historia de la vida en la Tierra.

## La relación entre la Vida y el planeta Tierra

La presencia de Vida es quizás el aspecto más particular de nuestro planeta. No sólo su presencia lo hace especial, sino que por sus peculiares características la Vida ha modificado profundamente la Tierra, convirtiéndola en un planeta único y diferente de todos los demás planetas del Sistema Solar. La vida tiene diversas cualidades que permiten distinguirla del componente abiótico del planeta. Una de estas características es la capacidad de los organismos vivos para evolucionar, acumulando y desechando cambios en una información hereditaria basada en grandes moléculas de ácidos nucleicos.

Este sistema, común a todas las formas vivientes de la Tierra, es el responsable último de la extraordinaria diversidad que presenta la Vida. También implica la existencia de una base común compartida por todos los organismos de la Tierra y transmitida a lo largo de la historia geológica del planeta. La Vida también se caracteriza por su capacidad de realizar procesos altamente complejos de síntesis y ruptura de moléculas orgánicas en el interior de las células sin que se altere su organización, a este proceso se le denomina metabolismo. Como resultado directo del metabolismo, los organismos transforman su medio, alterándolo profundamente al tomar determinadas sustancias y desechar otras. Asimismo, el mantenimiento de la vida supone la captación de energía. Esta energía proviene fundamentalmente de la luz solar, que actualmente es la mayor fuente de energía en la superficie terrestre. Gran parte de esta energía vuelve de una u otra manera al espacio, pero una parte importante es retenida en la superficie del planeta por los organismos fotosintéticos, que la incorporan a los ciclos de la Biosfera e indirectamente a todo su ámbito de influencia.

La Vida es un fenómeno común y extraordinariamente abundante en la Tierra. En la actualidad ningún ambiente de la superficie de la Tierra está libre, en mayor o menor medida, de la influencia de la Vida. Los organismos ocupan la mayor parte de la superficie terrestre, incluyendo mares y océanos, casi con independencia de su profundidad, y desde hace sólo unas pocas décadas empezamos a comprender algo de su increíble capacidad para colonizar todo tipo de ambientes extremos (Waterman, 1999; 2001), y, por tanto, de modificarlos. Desde algas como *Cyanidium caldarium* que crecen a temperaturas superiores a 55 °C y pH próximos a 0 (Seckbach, 1994) hasta holoturias que viven en las profundidades oceánicas a presiones que alcanzan las 110 atmósferas (Kato, 1997), por mencionar únicamente ejemplos de organismos eucariotas, aun cuando el mundo bacteriano abarca un espectro mucho más amplio de ambientes (una exploración de este mundo extremo puede iniciarse en la página web <http://www.astrobiology.com/extreme.html>). La influencia de la Biosfera también se extiende por el interior de las capas superficiales de la Litosfera, e incluso se habla de una «Biosfera profunda» para la alteración bacteriana de la estructura cristalina de los basaltos de la corteza oceánica que puede alcanzar profundidades de hasta 550 m, aunque a partir de los 300 m de profundidad decrece en importancia (Thorseth *et al.*, 1992; 1995; Staudigel *et al.*,

2006). Este fenómeno es de tal magnitud que ha sido reconocido en numerosas ofiolitas y rocas verdes (greenstones) con una antigüedad de hasta 3.500 Ma (Furnes *et al.*, 2004).

La interacción de la Biosfera, la Hidrosfera y la Atmósfera entre sí y con la corteza externa de la Tierra es universal y continua; con ciclos contenidos en ciclos, implicados, a su vez, en otros mayores (Cloud, 1983). Los procesos biológicos influyen profundamente, a veces controlando, los detalles de la Atmósfera y de la Hidrosfera y son responsables importantes de la meteorización de las rocas, de la formación del suelo y de numerosos tipos de rocas sedimentarias. El alcance de estos procesos a escala de la superficie planetaria es inmenso. Podemos considerar la Biosfera como un gigantesco mecanismo metabólico de captura, almacenamiento y transferencia de energía que afecta de forma profunda y penetrante a la superficie terrestre. ¿Hasta dónde alcanza la influencia de la Vida sobre el desarrollo de las capas superficiales de la Tierra? Algunos datos recogidos por Fyfe (1998) pueden darnos una idea. Según este autor, teóricamente sería posible que cada átomo de potasio del planeta hubiese podido formar parte de su residencia en una célula viviente. De hecho, se tiende a olvidar cuál es la escala de la biomasa viviente actual, que, según este autor, en la superficie terrestre es del orden de 1.000 km<sup>3</sup> de materia viviente y tres veces esa cantidad en materia muerta. En este sentido, Abelson (en Fyfe, 1998) señala que, con el índice actual del ciclo de biocarbono, si se integrase en el registro geológico, la masa total de células vivientes podría haber sido similar a la masa de la Tierra.

Las evidencias históricas de esta interacción también son abrumadoras. La más conocida es la transformación de la atmósfera por adición de oxígeno procedente del desarrollo de la fotosíntesis orgánica. Pero éste no es un caso único, existen evidencias de otros procesos que han dejado huellas en nuestro planeta igual de significativas. Rosing *et al.* (2006) han explorado recientemente las interacciones entre el planeta Tierra primitivo y su vida emergente, proponiendo la hipótesis de que el nacimiento de los continentes es consecuencia de las fuerzas biológicas de meteorización y de la alteración diagenética de las rocas y que la fuerza necesaria para llevar el proceso fue obtenida vía fijación de la energía solar por los organismos fotosintéticos. Estos autores destacan el llamativo solapamiento entre el advenimiento de la fotosíntesis y el comienzo de la estabi-

lización de los continentes. Esta coincidencia temporal se explica porque los continentes graníticos sobre la Tierra son consecuencia de la inducción de la Vida durante la bonanza energética del Arcaico temprano. En consecuencia, los continentes graníticos podrían considerarse como biomarcadores de la vida fotosintética sobre un planeta silicatado como es la Tierra. Existen muchos otros ejemplos de procesos similares, aunque a menor escala. De hecho, hoy conocemos que pocos procesos geológicos externos escapan a la influencia de la Vida. En otras palabras, la evolución de las capas externas de la Litosfera está completamente condicionada por la Biosfera (fig. 1).

## Tafosfera

La interacción a lo largo del tiempo geológico entre la Biosfera y las capas superficiales de la Tierra se manifiesta en la contribución de los organismos a la formación de una capa o geosfera con características diferentes del resto de las capas que componen nuestro planeta.

Para esta capa proponemos el término Tafosfera. La elección del término Tafosfera no es casual, y viene a enfatizar el hecho fundamental del enterramiento, en el que los materiales originados directa o indirectamente por los organismos escapan definitivamente de la Biosfera. La Tafosfera, por lo tanto, incluye a todo el registro fósil y a las rocas, principalmente sedimentarias, en las que está contenido, pero incluye aquellas rocas en las que los productos sedimentarios (biogénicos o no) han jugado un papel imprescindible en su formación, como es el caso de las rocas graníticas de la corteza continental.

El término Tafosfera no pretende sustituir al común y arraigado concepto de Corteza continental, tanto por no ser coincidente con ella (sólo es la parte de la corteza terrestre formada bajo la influencia de los procesos biológicos), como por el hecho de que el estudio de esta última requiere aproximaciones procedentes de campos muy diferentes de la Geología. La Tafosfera pretende ser un concepto paleontológico y sedimentológico que intenta buscar un escenario coherente para la comprensión de los procesos tafonómicos que han ocurrido a lo largo de la historia de la Tierra.

Según la definición que hemos propuesto, la Tafosfera se encontraría limitada, por una parte, por la interfase con la Biosfera y, por otro lado, por la parte de la corteza terrestre que no ha sufrido altera-

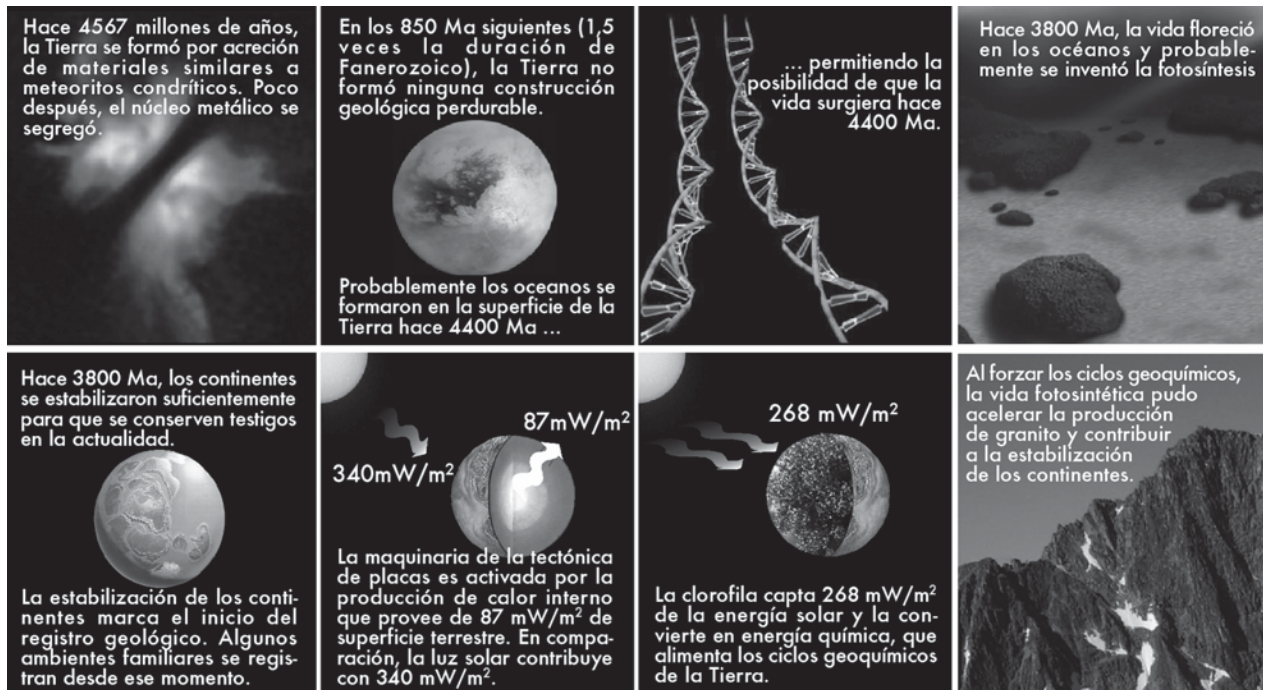


Fig. 1.—Esquema que muestra algunos de los acontecimientos más importantes en la evolución de la Tierra, modificado de Rosing, et al. (2006).

ciones biológicas directas como podrían ser los basaltos oceánicos surgidos del manto o las capas más profundas de la corteza terrestre en cuya diferenciación los materiales originados en la superficie terrestre, o no han intervenido, o han jugado un papel menor.

El límite más superficial queda, por lo tanto, definido por la interfase con la Biosfera. Los productos o efectos de la Biosfera pasan a constituir Tafosfera cuando salen de la Biosfera, es decir, cuando son enterrados y quedan fuera de los ciclos biológicos. Su límite inferior es más difícil de definir. En los océanos este límite inferior estaría formado en la parte más alta de los basaltos de la capa 2. Mientras que la heterogeneidad de la corteza continental impide una definición precisa, acorde con la complejidad de la formación y composición de la corteza continental, temas objeto de intenso debate (Hawkesworth & Kemp, 2006a). La mayoría de los modelos de la generación de la corteza continental implican, al menos, dos estadios de diferenciación: la extracción de magma basáltico del manto y el refundido o cristalización fraccional del basalto, posiblemente aumentado por procesos sedimentarios (Taylor & McClennan, 1985; Rudnick, 1995; Rudnick & Gao, 2003; Hawkesworth & Kemp

2006a, 2006b). La figura 2 resume los tipos dominantes de rocas de la corteza continental según Hawkesworth & Kemp (2006b). De acuerdo con estos autores existiría una corteza superior félsica (31,7%) de composición sedimentaria y granítica, una corteza media (29,6%) con rocas metamórficas de las facies de las anfibolitas y una corteza inferior máfica (38,8%) que comprende rocas metamórficas granulitas. Para Hawkesworth & Kemp (2006a y b), la composición media de la corteza inferior es similar en composición al basalto inmodificado, por lo que puede inferirse que es representativa de los protolitos de los continentes. Por lo tanto, la Tafosfera podría incluir a la corteza superior y media, y su límite inferior se situaría en la interfase entre la corteza media e inferior.

De acuerdo con estos límites, la Tafosfera comprende en los continentes a la capa continental superior y media de composición mayoritariamente granítica y la capa sedimentaria y metamórfica que se encuentra instalada en ella, a veces recubriéndola. En los océanos no existe el equivalente de las capas graníticas de la Tafosfera continental, estando sólo representada por la capa sedimentaria (capa 1) depositada sobre la corteza oceánica basáltica (capas 2 y 3). Así pues, la Tafosfera ocupa toda la



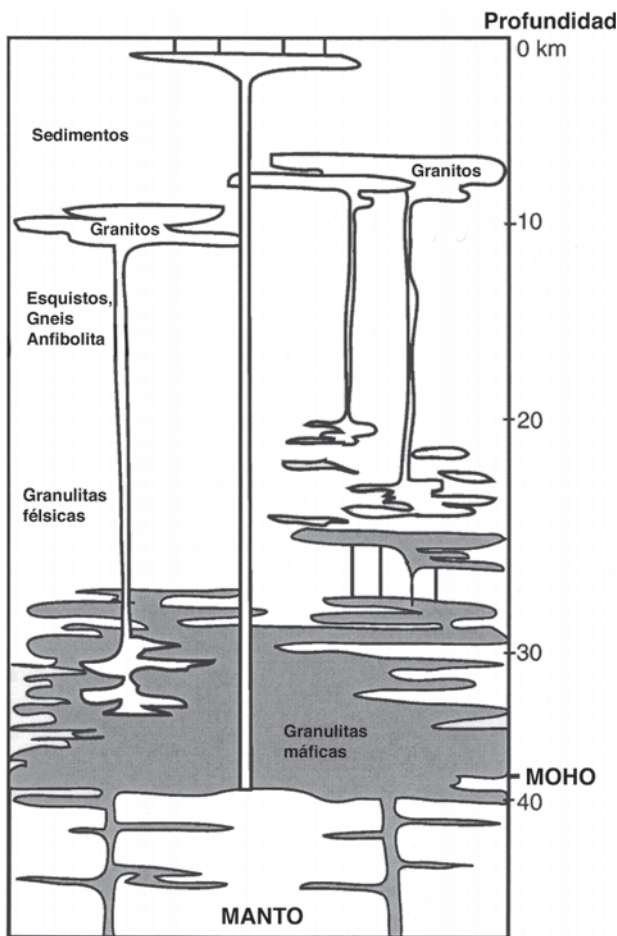


Fig. 2.—Esquema de la composición de la corteza continental según Hawkesworth & Kemp (2006a).

superficie terrestre, pero con historias drásticamente distintas según se trate de los continentes o de los océanos (tabla 1). En estos últimos, la Tafosfera sedimentaria apenas alcanza los 200 Ma de antigüedad, la misma del sustrato basáltico sobre el que se deposita y su desarrollo está fuertemente limitado en comparación al gran desarrollo que alcanza en los continentes. En los continentes la Tafosfera es el resultado de más 3.500 Ma de procesos tafonómicos (o geobiológicos), en los que, como ya se ha mencionado una parte importante está formada por rocas graníticas o relacionadas con el granito, lo que a su vez explica la complejidad de su historia. Pero esta intensa granitización y procesos metamórficos asociados no ha evitado que todavía encontremos afloramientos de rocas sedimentarias con una edad cercana al comienzo del registro geológico, y que el comienzo del Registro fósil sea cada vez más antiguo.

Tabla 1.—Diferencias entre la corteza continental y la corteza oceánica según Keary & Vine (1999). La existencia de diferencias importantes entre la corteza continental y la oceánica es manifiesta y arroja dudas sobre la idoneidad del término corteza para el conjunto de sus dos partes (continental y oceánica)

#### 1. ESTRATIFICACION

- *Continentes*: la estratificación a gran escala está mal definida y es altamente variable, reflejo de una historia geológica compleja. En algunos lugares existe una subdivisión por la discontinuidad de Conrad.
- *Océanos*: la estratificación de la corteza oceánica está bien definida en tres distintas capas (1, 2 y 3) que se encuentran en todas las cuencas oceánicas. No obstante, la naturaleza de estas capas, en particular las capas 2 y 3, puede cambiar bastante rápidamente con la profundidad. En el caso de las capas 2 y 3 esto refleja el complejo desarrollo de su cámara magmática parental.

#### 2. ESPESOR

- *Continentes*: en los continentes tiene una media de 35-40 km, pero es bastante variable, desde unos pocos km en el interior de los rifts hasta cerca de los 80 km en los cinturones montañosos recientes.
- *Océanos*: la corteza oceánica mantiene un espesor más constante de unos 7 km, aunque la capa 1 se incrementa en espesor hacia los márgenes oceánicos.

#### 3. EDAD

- *Continentes*: la corteza continental puede tener una antigüedad de hasta 3.960 Ma, la edad de las rocas más antiguas hasta ahora descubiertas. A gran escala la corteza más antigua consiste en cratones precámbricos o escudos que están rodeados por cinturones orogénicos más jóvenes, tanto activos como inactivos.
- *Océanos*: la corteza oceánica no es más antigua de los 180 Ma, su edad se incrementa progresivamente hacia el exterior de las crestas oceánicas. Los océanos son consecuentemente vistos como factores esencialmente transitorios de la superficie de la Tierra. Alrededor del 50% del área superficial de los océanos ha sido creado durante los últimos 65 Ma (desde el límite K/T), lo que implica que el 30% de la superficie de la Tierra ha sido creado durante el 1,5% del tiempo geológico más reciente.

#### 4. ACTIVIDAD TECTONICA

- *Continentes*: la corteza continental puede estar extensamente plegada y fallada, y contiene evidencias de haber sufrido múltiples acontecimientos tectónicos.
- *Océanos*: la corteza oceánica es muy estable y ha sufrido poca deformación, excepto en los márgenes de las placas.

#### 5. ACTIVIDAD IGNEA

- *Continentes*: se produce muy poca actividad ígnea en la mayor parte de la corteza continental, excepto en los cinturones montañosos de tipo Andino.
- *Océanos*: la actividad ígnea es mucho mayor en los océanos, especialmente en las dorsales oceánicas y en los arcos islas, donde se localizan las áreas con mayor actividad volcánica y plutónica.

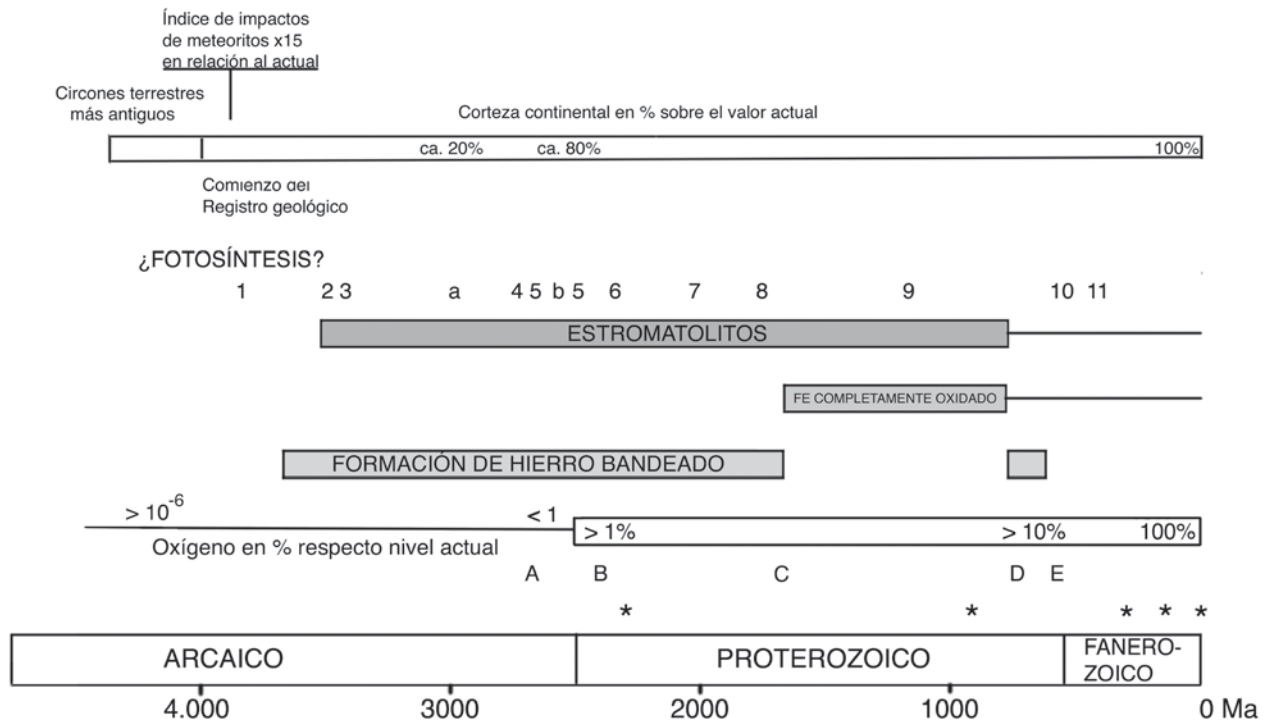


Fig. 3.—Resumen de la evolución biogeológica durante el Precámbrico. A) Esterano evidencia la presencia local de oxígeno. B) Evidencias del incremento de oxígeno en la atmósfera. C) Fin de la formación de hierro bandeado. Fondo oceánico óxico o sulfídico. D) Retorno de la formación de hierro bandeado en asociación con la glaciación neoproterozoica. E) Oxígeno y sulfatos comienzan a aproximarse a los niveles actuales. a) Grandes plataformas carbonatadas. b) Plataformas carbonatadas gigantes. 1) C-isótopos consistentes con la fijación del carbono por Rubisco. 2) Estromatolitos más antiguos. 3) Microestructuras de origen controvertido. 4) Biomarcadores moleculares probablemente sintetizados por cianobacterias. 5) Microfósiles probablemente cianobacterias. 6) Incremento del oxígeno atmosférico. 7) Microfósiles confidencialmente interpretados como cianobacterias. 8) Acritarcos más antiguos. 9) Metazoos más antiguos. 10) Máximo desarrollo del fitoplancton eucariótico. 11) Máximo desarrollo de los acritarcos. Los asteriscos señalan las glaciaciones más importantes registradas. Datos procedentes de Eriksson, *et al.* (2004), Knoll (2003) y Fenchel (2002).

De hecho, durante las últimas décadas, las evidencias de vida en el Precámbrico antiguo inferidas por restos fósiles, interpretados como producto de microorganismos o de su actividad, se han multiplicado exponencialmente, de forma que se postula la existencia de vida en niveles cercanos a los 3.800 Ma, apenas unos pocos cientos de millones de años de las primeras evidencias registradas de rocas (Knoll, 2003; Schopf, 2004). No obstante, la distinción de fósiles y productos biogénicos en las rocas más antiguas del Precámbrico no está exenta de grandes dificultades. La lógica de los hechos induce a pensar que el origen de la Vida tuvo necesariamente que desarrollarse en un medio abiótico, en el que la existencia de agua fue el requisito fundamental, pero no único. Un factor importante para el desarrollo de la vida ha sido, y es, la formación de barro (compuesto por diferentes tipos de arcillas) resultado de la alteración de los materiales magmáticos en medio acuoso. Las arcillas tienen numero-

sas y extraordinarias propiedades, entre ellas la habilidad para absorber y expulsar fluidos, especialmente agua y, por lo tanto, para retener o no un amplio rango de elementos principales y traza. Puesto que las arcillas son el componente inorgánico más abundante de la superficie de la Tierra, ellas efectivamente actúan como un sistema global de reciclado para muchos de los nutrientes y gases que sostienen la vida (Merriman, 2002; Kennedy *et al.*, 2006). No es casual que alguna de las hipótesis más provocativas sobre origen de la Vida en nuestro planeta hayan visto en las arcillas a los protagonistas especiales (Cairns-Smith, 1988).

Pero también esta capacidad de las arcillas y de otros compuestos inorgánicos para interactuar selectivamente con el medio arrojan dudas sobre el reconocimiento de la vida más antigua. Algunos de los problemas son las estructuras abiogénicas que imitan formas microbianas (García-Ruiz *et al.*, 2003); la imitación abiogénica del fraccionamiento

biogénico de algunos isótopos, especialmente del C (Van Zuilen *et al.*, 2002); la contaminación de las rocas antiguas por microorganismos o sustancias orgánicas más recientes (Westall & Folk, 2003). Sin embargo, estos problemas pueden salvarse cuando se usa la asociación de diferentes criterios, que incluyan información relevante sobre el ambiente sedimentario, morfología e información bioquímica de los fósiles (Schopf, 2004; Westal, 2005), lo que no deja de ser una llamada al estudio integral del sistema Tafosfera. La figura 3 viene a resumir de manera sintética algunas de las características más notables de la evolución de la Tafosfera durante el Precámbrico.

## Discusión

Como hemos señalado, la denominación de Tafosfera pretende enfatizar el hecho fundamental del enterramiento, en el que el agua juega un papel imprescindible, y que conduce a que los productos originados por la actividad de los organismos escapen temporal o definitivamente de la Biosfera. El tránsito de los productos orgánicos (organismos completos, sus partes, huellas de su actividad o productos de deshecho) de la Biosfera a la Litosfera para formar parte de la Tafosfera, implica necesariamente la pérdida de las propiedades que definen la vida. Uno de los resultados más evidentes es la formación de fósiles. Por lo tanto, la fosilización es el proceso por el que una parte de los productos de la Biosfera es transferida a la Tafosfera, escapando a la acción de los ciclos biológicos y en ausencia de metabolismo activo. Esto supone que los procesos fisicoquímicos implicados en su posterior evolución están controlados exclusivamente por procesos abióticos y pueden ser incluidos dentro la denominada fase fosildiagénica. Este proceso significa un cambio de sistema, del biótico al abiótico. Como resultado, ninguna de las propiedades que definen a los seres vivos se encuentran en los fósiles, aunque en éstos podamos reconocer formas y/o compuestos que fueron producidos por organismos. Dado que organismos y fósiles son entidades diferentes que se encuentran en sistemas distintos podemos afirmar que no existe continuidad entre ellos, pues el paso de un sistema a otro implica la pérdida de su estado original, aunque los dos sistemas puedan interactuar en un proceso continuo de reciclado (fig. 4).

Es importante recalcar que la Tafosfera no es un concepto de tipo registro, como lo puede ser el de

Registro fósil o el de Registro geológico. Ni siquiera tiene que coincidir en el tiempo con el comienzo del Registro fósil. Según Fernández-López (2000), el Registro fósil es: «*El conjunto de todos los restos y señales de entidades biológicas del pasado que está en la Litosfera. La entidad tafonómica de mayor nivel de organización. Un componente del registro geológico, que es dissociable del registro estratigráfico*». La Tafosfera incluye la totalidad del Registro fósil, junto con el Registro geológico formado como respuesta a las condiciones bióticas existentes en la superficie terrestre. De esta forma, el Registro fósil, junto al resto de componentes o registros (mineralógico, estratigráfico, etc.) asociados, formaría un único conjunto o sistema que puede nombrarse como «Registro geológico de la Tafosfera».

Uno de los aspectos más interesantes del concepto de Tafosfera es su relación con la Biosfera. La influencia de la Tafosfera sobre la Biosfera es un proceso ampliamente documentado y podría inducir a considerar a la Tafosfera como una forma extrema de modificación del ambiente por parte de la Vida con objeto de favorecer o garantizar su propia supervivencia. Por una parte, el desarrollo de la Tafosfera ha contribuido a crear una capa relativamente estable, en la que los procesos geodinámicos internos han perdido paulatinamente influencia, lo que podría interpretarse como beneficioso para el desarrollo de la vida. Aunque, no obstante, es fácil reconocer en el registro paleontológico fenómenos de extinción y cambio orgánico a escala planetaria cuya causa puede relacionarse con procesos geodinámicos internos (sin olvidar aquellos que pueden ser relacionados con causas extraterrestres). Por otra parte, la Tafosfera actúa como almacén de sustancias minerales (orgánicas e inorgánicas), que entran en los ciclos biológicos de manera continua, suministrando compuestos aparentemente esenciales para el mantenimiento de la Biosfera. Sin embargo, fuera de estas influencias resulta difícil percibir si la Tafosfera es esencial para el desarrollo de la Biosfera. Históricamente la respuesta es negativa, puesto que, en algún momento determinado de la evolución de la Tierra, la vida fue capaz de desarrollarse en un medio abiótico. Posiblemente, la alteración o meteorización de las rocas con producción de arcillas es suficiente para sustentar la actual Biosfera, independientemente de que esta transformación se realice sobre materiales procedentes de la Tafosfera o de materiales cuyo origen sea abiótico (volcánicos o basálticos).

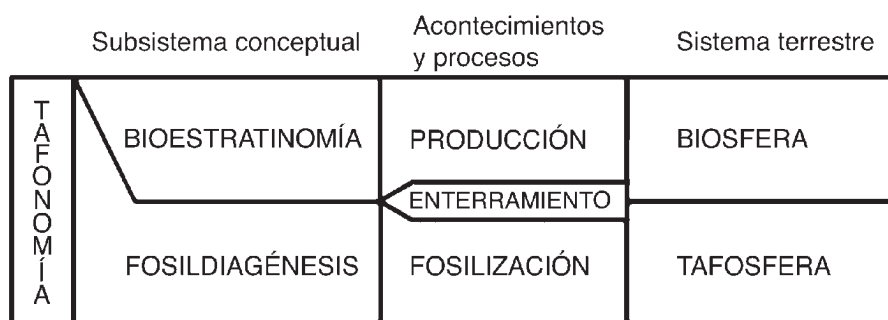


Fig. 4.—Los procesos tafonómicos suelen ser agrupados en dos categorías: bioestratónomicos y fosildiagenéticos. Los procesos bioestratónomicos son los que experimentan las entidades conservadas antes de ser enterradas, mientras que los fosildiagenéticos después del enterramiento (Fernández López, 1998; Fernández López y Fernández Jalvo, 2002). Sin embargo, la separación entre ambos procesos no es tan evidente como *a priori* podría parecer. Un ejemplo claro lo tenemos en la formación del suelo, verdadera interfase entre la Biosfera y la Litosfera, resultado directo de la interacción entre los materiales procedentes de la meteorización y las sustancias orgánicas, controlado por organismos de todo tipo. En realidad la fase bioestratónómica está controlada mayormente por la Biosfera, incluso en las primeras fases del enterramiento. Pensar en una fase bioestratónómica previa al enterramiento como parte del proceso de fosilización podría no tener fundamento, puesto que en dicha fase los organismos siguen actuando, y desde el punto de vista biológico esos ecosistemas son comparables a cualquier otro. Ciertamente la comprensión del proceso de fosilización no puede realizarse sin entender los procesos biológicos relacionados con la muerte y reciclado de los organismos, pero esta fase (bioestratónómica) difícilmente puede considerarse como parte de la fosilización, aunque su investigación sí pueda considerarse como una disciplina tafonómica (Fernández López y Fernández Jalvo, 2002). Una posible solución es considerar que el proceso de fosilización, es, simplemente, el acto por el que una parte de la Biosfera se transfiere a la Tafosfera, escapando a la acción de los ciclos biológicos, y en ausencia de metabolismo activo. Lo que implica que los procesos químicos implicados en su posterior evolución están controlados exclusivamente por procesos abióticos y pueden ser incluidos dentro de la denominada fase fosildiagenética.

También cabe preguntarse si la Tafosfera es una prolongación de la Biosfera en el tiempo. Aunque la Biosfera mayoritariamente está instalada sobre la Tafosfera, no tiene continuidad con ésta y la interacción entre ambos sistemas es independiente de la edad de la Tafosfera. Es decir, la Biosfera actual puede afectar al registro fósil, pero lo hace de manera independiente a su naturaleza, aunque esto no implica que el proceso de interacción no sea selectivo, puesto que los organismos vivos son siempre selectivos a la hora de usar el sustrato. La interacción entre la Biosfera y la Tafosfera es interrumpida casi continuamente por procesos geodinámicos (externos e internos), que cambian las condiciones ambientales hasta el punto de colapsar los ecosistemas y cambiarlos drásticamente, o incluso eliminarlos. Este proceso de cambio es raramente observable a escala humana, en la que la mayoría de los cambios parecen más o menos graduales. Sin embargo, a escala geológica se puede inferir que es absolutamente común, siendo una de las características típicas del registro geológico de la Litosfera. La Tierra ha experimentado numerosos pulsos exógenos y endógenos durante su larga historia. Estas pulsaciones cubren una escala desde el día y la noche (diarios), fases de la luna (mensuales), verano e invierno (anuales), el ciclo de las manchas solares (cf. 11 años), ciclos glaciares e interglacia-

res ( $\pm 0,5$  Ma), fases tectónicas ( $\pm 7$  Ma) y muchos otros con diversas escalas y frecuencias (Pickford, 1996). Las consecuencias de estos pulsos son directas sobre el registro geológico de la Tafosfera y pueden resumirse en la tercera propuesta de Ager (1993) «la acumulación sedimentaria en un sitio cualquiera de la superficie terrestre es solamente un delgado y fragmentario registro de vastos períodos de la historia terrestre».

Si la Tafosfera no puede verse como una continuidad de la Biosfera, la proposición inversa tampoco sería válida. La interacción entre la Tafosfera y la Biosfera es análoga a la que puede experimentar ésta cuando se instala en capas exclusivamente abióticas (por ejemplo coladas volcánicas, basaltos oceánicos, etc.). Pero esto no implica que el Registro fósil no pueda crecer o cambiar cuando sobre él se instala una «nueva Biosfera». Este proceso está bien documentado y podría incluirse en la categoría de «alteración tafonómica» (Fernández López, 2000). En consecuencia, no parece posible pensar que la Tafosfera pueda interactuar o ejercer alguna influencia única o diferenciada sobre la vida, fuera de suministrar a los humanos información sobre el pasado. No obstante, un proceso ampliamente documentado es la cualidad de la Tafosfera de actuar como almacén de sustancias minerales (orgánicas e inorgánicas), que entran en los ciclos biológicos de



manera continua, suministrando compuestos aparentemente esenciales para el mantenimiento de la Biosfera. La idea que finalmente se nos aparece es que, al fin y al cabo, la Tafosfera sólo es un enorme almacén de basura biológica, producto de la actividad metabólica de los organismos, mezclada con restos transformados de los propios organismos y materiales inorgánicos procedentes del reciclado de la propia Tafosfera, y de añadidos de las capas abióticas de la Litosfera y del Manto superior.

## Conclusión

El concepto de Tafosfera propuesto hunde sus raíces en distintas aproximaciones que han intentado recoger la íntima relación entre la Vida y la Tierra. Desde la obra de James Hutton de 1788 «Theory of the Earth» con el denominado «Sistema de la Tierra» (Knoll, 2003) hasta el concepto de Gaia de Lovelock (2000). También se ha empleado el término de Ecosfera, definido como integración de todas las capas bióticas y abióticas (Atmósfera, Hidrosfera y superficie de la Litosfera), lo que posibilita la existencia de un sistema interdependiente integral (Hamblin & Christiansen, 1992), o el muy similar en nombre, pero con contenido diferente del de Hutton de «Sistema terrestre» formado por componentes fisicoquímicos y biológicos, ninguno de los cuales puede ser comprendido de forma aislada, a causa de su estrecha interrelación (Stanley, 2004). Mención aparte merece Osborn (1918) con una visión sorprendentemente moderna, afirmando «Las bacterias de este modo anticipan el mundo de las diatomeas, algas y plantas, y de los productores de carbono, así como de los protozoos y moluscos, jugando un importante papel en la formación de la nueva corteza de la tierra». En esta línea se sitúa también Pickford (1996) cuando, en su crítica a Gaia, señala que «Aunque yo no me adscribo al culto de Gaia que ha emergido del trabajo de Lovelock, yo mantengo que la solución de muchos problemas geológicos es sólo posible si se examina la Tierra como una entidad y no como una serie de subtotaes disjuntos». De forma última, el reconocimiento de esta íntima relación y de su importancia para ambos sistemas ha dado lugar al desarrollo de la Geobiología. Según Knoll (2003), «Los geobiólogos buscan entender el papel de los organismos en el sistema Tierra» preguntándose «cómo y en qué extensión han contribuido los procesos evolutivos a los cambios de estado de los ambientes superficia-

les de la Tierra». Dentro de este contexto, el concepto de Tafosfera significa el reconocimiento de la dimensión histórica de la interacción Tierra-Vida y sus consecuencias.

Desde la definición de Tafonomía por Efremov (1940) como «el estudio de la transición (en todos sus detalles) de los restos animales de la Biosfera a la Litosfera», los paleontólogos han realizado un gran esfuerzo en la comprensión del proceso de fosilización, o de cómo los organismos vivos quedan registrados en la Litosfera. Para Fernández López (2000), «La Tafonomía sólo es un subsistema conceptual de la Paleontología, que aspira a explicar cómo ha sido producido y qué modificaciones ha experimentado el registro fósil». Planteamientos aparentemente diferentes son introducidos por Behrensmeyer *et al.* (2000), cuando afirman que «La Tafonomía actualmente atiende primariamente al entendimiento geobiológico de la Tierra fundamentado en los procesos post mórtem que reciclan los materiales biológicos y afectan nuestra habilidad —positiva o negativamente— para reconstruir las biotas y ambientes del pasado». Podemos entender que *explicar el registro fósil* es lo mismo que entender la *geobiología de la Tierra*, en otras palabras Tafonomía es lo mismo que Geobiología, ¿o son disciplinas diferentes? Si volvemos a Knoll (2003) cuando se pregunta «cómo y en qué extensión han contribuido los procesos evolutivos a los cambios de estado de los ambientes superficiales de la Tierra», podríamos pensar que nos encontramos en dominios diferentes, uno que sólo intenta explicar el registro fósil, otro más amplio que busca conocer el papel de los organismos en la evolución del planeta Tierra. La separación entre ambos dominios es imperceptible y la profusión de términos como geobiología, geomicrobiología, paleontología molecular y otros son manifestaciones del desarrollo de este tipo de investigaciones asociado a la adquisición de técnicas analíticas altamente depuradas y precisas. Sin embargo, el punto de confluencia puede seguir siendo el de la Tafonomía, ahora con una amplitud aún mayor que la habitualmente considerada, en la línea apuntada por Behrensmeyer *et al.* (2000).

En esta línea, el concepto de Tafosfera suministra un escenario general, mucho más coherente y preciso para el conocimiento de la evolución de la Vida y su interacción con la Litosfera, que denominaciones procedentes de ámbitos diferentes, tales como «registro fósil» o «corteza terrestre». La entidad del concepto permite distinguir dos génesis diferentes en la formación de la corteza terrestre; una abiótica, en la que los materiales son mayoritariamente

basaltos originados en el Manto litosférico y otra biótica, en cuya composición intervienen materiales que en algún momento de su historia han residido en la Biosfera.

Interpretaciones más comunes en los estudios tafonómicos han visto los procesos de fosilización como un fenómeno continuo de transferencia de materia orgánica entre la Biosfera y la Litosfera, incidiendo en los procesos post mórtem como factor importante para la comprensión de los mismos. Sin embargo, la naturaleza del registro paleontológico muestra una total independencia de la Biosfera, y participa de la naturaleza del registro estratigráfico, en el que el predominio de hiatos es un denominador común (Ager, 1993; 1999).

#### AGRADECIMIENTOS

A M<sup>re</sup> Dolores Soria Mayor por tantos momentos de amistad y compañerismo, siempre te recordaremos. El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto BTE2003-03001.

#### Referencias

- Ager, D. V. (1993). *The Nature of the Stratigraphical Record*. John Wiley & Sons, 151 págs.
- Ager, D. V. (1999). *The New Catastrophism. The importance of the rare event in geological history*. Cambridge University Press, 231 págs.
- Behrensmeyer, A. K., Kidwell, S. M. y Gastaldo, R. A. (2000). *Taphonomy and paleobiology*. In: Deep Time, Paleobiology's Perspective D. H. Erwin y S. L. Wing, eds.). Paleobiology Supplement to Volume, 26: 103-147.
- Cairns-Smith, A. G. (1988). *Seven clues to the origin of life*. Cambridge University Press, 131 págs.
- Cloud, P. (1983). La Biosfera. *Investigación y Ciencia*, 86: 116-127.
- Darwin, C. (1859). *The Origin of Species*. The Modern Library, NY. 1.000 págs.
- Efremov, J. A. (1940). Taphonomy: new branch of paleontology. *Pan American Geologist*, 74: 81-93.
- Eriksson, P. G., Cantuneanu, O. Nelson, D. R., Mueller, W. U. y Altermann, W. (2004). *Towards a Synthesis*. In: «The Precambrian Earth: Tempos and Events» (P. G. Eriksson, W. Altermann, D. R. Nelson, W. U. Mueller y O. Cantuneanu, eds.). *Dev. Precambrian Geol.*, 12: 739-769.
- Fenchel, T. (2002). *The Origin and Early Evolution of Life*. Oxford U. P., 171 págs.
- Fernández López, S. R. (1998). *Tafonomía y Fosilización*. En: Tratado de Paleontología, Tomo 1 (B. Meléndez, ed.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 51-107.
- Fernández López, S. R. (2000). *Temas de Tafonomía*. Departamento de Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, 167 págs.
- Fernández López, S. R. y Fernández Jalvo, Y. (2002). *The limit between biostratigraphy and fossilization*. En: Current topics on Taphonomy and Fossilization (M. de Renzi, M. V. Pardo Alonso, M. Belinchón, E. Peñalver, P. Montoya y A. Marquez-Aliaga, eds.). Ajuntament de Valencia, 27-36.
- Furnes, H., Banerles, N. R., Muehlenbachs, K., Staudigel, H. y De Wit, M. (2004). Early Life recorded in Archaean Pillow Lavas. *Science*, 304: 578-581.
- Fyfe, W. S. (1998). Energy flow and geosphere interaction archaean to the present: the foundation of the global resource base. *Precambrian Res.*, 91: 5-13.
- García-Ruiz, J. M., Hyde, S. T., Carnerup, A. M., Christy, A. G., Van Kranendonk, M. J. y Welham, N. J. (2003). Self-Assembled Silica-Carbonate Structures and Detection of Ancient Microfossils. *Science*, 302: 1194-1197.
- Hamblin, W. K. y Christiansen, E. H. (1995). *Earth's dynamic systems*. Brigham Young University, 740 págs.
- Hawkesworth, C. J. y Kemp, A. I. S. (2006a). The differentiation and rates of generation of the continental crust. *Chem. Geol.*, 226: 134-143.
- Hawkesworth, C. J. y Kemp, A. I. S. (2006b). Evolution of the continental crust. *Nature*, 443: 811-817.
- Kato, C. (1997). Deep-sea animals living at world's deepest bottom at Mariana Trench Challenger Deep, depth of 11,000 m. *Umi-ushi Letter*, 14: 12.
- Keary, P. y Vine, F. J. (1999). *Global Tectonics*. Blackwell Science, 333 págs.
- Knoll, A. H. (2003). The geological consequences of evolution. *Geobiology*, 1: 3-14.
- Kennedy, M., Droser, M., Mayer, L. M., Pevear, D. y Mrofk, D. (2006). Late Precambrian Oxygenation, Inception of the Clay Mineral Factory. *Science*, 311: 1446-1449.
- Lovelock, J. (2000). *Las edades de Gaia. Una biografía de nuestro planeta vivo*. Tusquets Eds. Metatemas, 29: 1-266.
- Merriman, D. (2002). The magma-to-mud cycle. *Geology Today*, 18: 67-71.
- Osborn, H. F. (1918). *The Origin and Evolution of Life*. G. Bell & Son, 322 págs.
- Pickford, M. (1996). Earth Expansion, Plate Tectonics and Gais's Pulse. *Bulletin du Museum national d'Histoire naturelle*, Paris 4<sup>a</sup> sér. Section C, 18: 451-516.
- Rarity of fossils. En: Wikipedia, the free encyclopedia. ([http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil\\_record](http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_record); last accessed october 2006).
- Rosing, M. T., Bird, D. K., Sleep, N. H., Glassley, W. y Albarede, F. (2006). The rise of continents - An essay on the geologic consequences of photosynthesis. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 232: 99-113.
- Rudnick, R. L. (1995). Making continental crust. *Nature*, 378: 571-578.
- Rudnick, R. L. y Gao, S. (2003). *Composition of the continental crust*. In: The crust. treatise in Geochemistry (R. L. Rudnick, ed.), 3: 1-64.
- Schopf, J. W. (2004). *Earth's Earliest Biosphere: Status of the Hunt*. En: «The Precambrian Earth: Tempos and

- Events» (P. G. Eriksson, W. Altermann, D. R. Nelson, W. U. Mueller y O. Cantuneanu, eds.). *Dev. Precambrian Geol.*, 12: 516-539.
- Seckbach, J. (ed.) (1994). Evolutionary pathways and enigmatic algae: *Cyanidium caldarium* (Rhodophyta) and related cells. In: Developments in Hydrobiology, 91 págs. 349. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Skelton, P. W. (1993). Evolution. The Open Library & Addison-Wesley Pub. Co. 1.064 págs.
- Stanley, S. M. (2005). *Earth System History*. W. H. Freeman & Co., 567 págs.
- Staudigel, H. y Furnes, H. (2006). Microbes and volcanoes: A tale from the oceans, ophiolites, and greenstone belts. *GSA Today*, 16: 4-10.
- Taylor, S. R. y McLennan, S. M. (1985). *The continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publication, 312 págs.
- Thorseth, H., Furnes, H. y Heldal, M. (1992). The importance of microbial activity in the alteration of natural basaltic glass. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 845-850.
- Thorseth, I. H., Torsvik, T., Furnes, H. y Muehlenbachs, K. (1995). Microbes play an important role in the alteration of oceanic crust. *Chem. Geol.*, 126: 137-146.
- Waterman, T. H. (1999). The Evolutionary Challenges of Extreme Environments (Part 1). *J. Exp. Zool.*, 285: 326-359.
- Waterman, T. H. (2001). The Evolutionary Challenges of Extreme Environments (Part 2). *J. Exp. Zool.*, 291: 130-168.
- Westall, F. (2005). Life on the Early Earth: A Sedimentary View. *Science*, 308: 366-367.
- Westall, F. y Folk, R. (2003). Exogenous carbonaceous microstructures in Early Archaean cherts and BIFs from Isua Greenstones Belt: implications for the search for life in ancient rocks. *Precambrian Res.*, 126: 313-330.
- Van Zuilen, M., Lepland, A. y Arrhemius, G. (2002). reassessing the evidence for the earliest traces of life. *Nature*, 418: 627-630.

Recibido el 17 de noviembre de 2006  
Aceptado el 15 de diciembre de 2006