

Influencia de los minerales en el origen de la vida en la Tierra

Ana Luz Morales Guerrero¹, Mayra Cuéllar-Cruz¹

¹Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Col. Noria Alta, C.P. 36050, Guanajuato, Guanajuato, México. Email: mcuellar@ugto.mx

Resumen

El origen de la vida en la tierra y su evolución es uno de los temas más intrigantes para la humanidad. En este ámbito, con el fin de entender los procesos que dieron inicio a la vida, se han formulado diversas teorías acerca de cómo pudo llevarse a cabo el fenómeno de la vida. En la actualidad, son de gran relevancia teorías que sugieren un papel clave de los minerales en la síntesis de las primeras biomoléculas y seres vivos. Diversos grupos de investigación han propuesto que los minerales presentes en la tierra primitiva, pudieron actuar como los primeros catalizadores de las reacciones que dieron lugar a la bioquímica y metabolismo actual e incluso funcionar como los primeros sistemas genéticos. Observando este comportamiento en los minerales, surgió un creciente interés por estructuras cristalinas de silico-carbonatos de elementos alcalinotérreos, los cuales, al formar estructuras similares a la morfología de organismos vivos, denominados biomorfos, se especula que pudieran tener alguna relación relevante en el origen de la vida.

Palabras clave: Minerales, silico-carbonatos, biomorfos.

Introducción

Para comprender la geoquímica de la Tierra, es necesario remontarnos al origen de la formación del sistema solar. Modelos actuales indican que este se formó debido a la inestabilidad gravitacional de densas nubes de materia interestelar que contenían minerales cristalinos¹, los cuales fueron colapsando formando los cuerpos que hoy conforman nuestro sistema planetario². Existen teorías en donde se describe el proceso de formación de la litosfera. Dentro de estos procesos geoquímicos se encuentran el vulcanismo, la desgasificación, la cristalización, entre otros, los cuales en conjunto permitieron que la corteza terrestre fuera evolucionando en su composición mineral, dando como resultado la formación de aproximadamente 1500 especies minerales distintas¹.

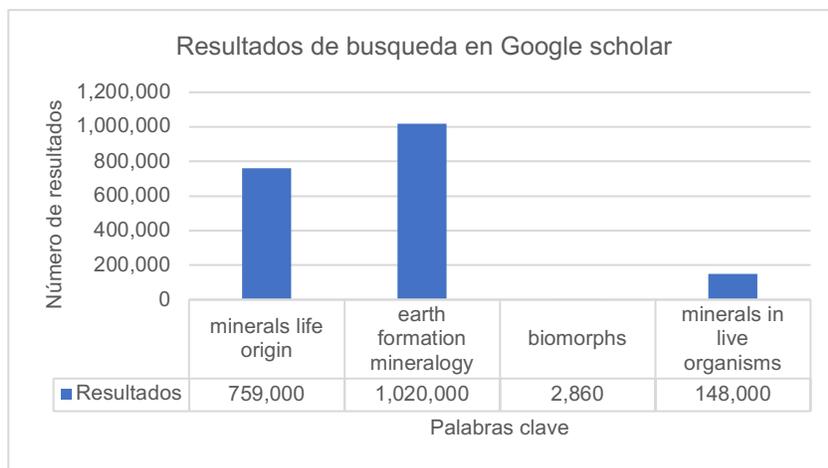
Aunado a estos procesos totalmente abióticos, la geoquímica comenzó a ser modificada por procesos biológicos desde la era Eoarcaica, cambiando la química planetaria y contribuyendo a la formación de los más de 4400 especies minerales conocidas actualmente^{1,3}. Algunos escenarios del origen de la vida nos indican que, no solo el surgimiento de los organismos vivos contribuyó a la formación de esta diversidad de minerales, sino que, el mismo origen de la vida dependió totalmente de la presencia de los minerales preexistentes en el planeta¹. Es posible que estos minerales funcionaran como los primeros catalizadores de las reacciones biológicas o incluso servir como el primer sistema genético⁴.

Experimentos como el desarrollado por Stephen Sowerby y colegas, mostraron como al colocar sustancias de interés biológico como adenina y guanina, en superficies planas de grafito (C) y molibdenita (MoS₂), los compuestos expuestos a estos minerales adoptaban elegantes conformaciones bidimensionales y eran altamente absorbidos por el mineral⁴. Esta capacidad de los minerales, como la calcita, para cambiar la organización de biomoléculas se propone que tuvo un papel esencial en el origen de la vida⁴. Actualmente se conoce que la vida está basada principalmente en el carbono, sin embargo, puede que, en los inicios de la vida, esto no haya sido así y haber estado compuesta de algún otro mineral⁴.

Con la finalidad de evaluar la participación de los minerales en el origen de la vida, el objetivo del presente trabajo fue revisar la participación de los minerales en la estructura del origen pionero, así como su participación en la evolución y mantenimiento de la vida desde la era Precámbrica hasta nuestra época.

Metodología

Para esta revisión se utilizó Google scholar con el objetivo de conocer la influencia de los minerales en el origen de la vida. Las palabras clave para la búsqueda fueron las siguientes: earth formation mineralogy, biomorphs, minerals in live organisms y minerals life origin. Los resultados de la búsqueda se representan en la gráfica 1.



Gráfica 1

Resultados

1) Formación de los minerales en la Tierra

Un mineral es un elemento o compuesto químico que se ha formado debido a procesos geológicos, estas sustancias suelen ser cristalinas y tener una estructura interna organizada que le confiere propiedades específicas⁵. La formación de los minerales implica una serie de procesos químicos, físicos y biológicos, algunos de estos procesos se llevaron a cabo desde antes de la formación del sistema solar, en las nubes pre-esterales donde se encontraban minerales que, debido a la inestabilidad gravitatoria, fueron colapsando, formando aglomeraciones cada vez más grandes que culminaron en la creación de nuestro sol y planetas del sistema solar, entre ellos nuestro planeta Tierra¹.

De forma general, se podría considerar que la formación de los minerales en la tierra y su evolución se ha dado por cuatro etapas. En la primera etapa se llevó a cabo la formación de los Ur-minerales en la nébula pre-solar, como son el diamante, gráfita, moissanita, osbornita, rutilo, corindón, espinela, entre otros. La segunda etapa está conformada por los minerales encontrados en los meteoritos condriticos y corresponden a incrustaciones de calcio y aluminio presentes en meteoritos. La tercera etapa fue en donde se formaron los minerales en el Hadeano, tales como el cuarzo, zircón, titanita, apatita, granate y sulfuros, y la cuarta etapa corresponde a los minerales formados después del Hadeano¹.

2) Participación de los minerales en la vida

La importancia de los minerales en el origen de la vida fue propuesta por primera vez por Bernal en 1949, el consideraba que debido a propiedades como su estructura química ordenada, capacidad de adsorción, resistencia a la luz ultravioleta, para concentrar compuestos orgánicos y servir como base para la polimerización de los mismos, podrían ser candidatos clave en el origen de la vida⁶.

Minerales especialmente interesantes para esta teoría son las arcillas, las cuales están formadas por alteraciones acuosas de compuestos de silicato⁶. Científicos como Schneider han propuesto que algunos procesos de cristalización podrían semejar unidades vivas y dar como resultado fisiologías cristalinas⁶.

De esta manera, existen teorías que proponen que los primeros organismos vivos pudieron no haber estado conformados de carbono, sino de algún otro mineral como son los minerales arcillosos⁴. Estas teorías proponen que los minerales pudieron tener un papel clave en las primeras reacciones bioquímicas y funcionar como los primeros catalizadores, dando origen al metabolismo, además, se propone que pudieron ser el primer sistema genético de la vida en la Tierra⁴.

Cairns-Smith en 1982, propuso a los minerales cristalinos como posibles sistemas genéticos primigenios debido a propiedades como la capacidad de almacenar y replicar información, este autor propone como minerales candidatos a la caolinita⁶. De esta manera, se ha observado que estas arcillas pueden dirigir la selección prebiótica de los D-azúcares y L-aminoácidos⁶.

2.1) Origen del organismo pionero

Una teoría que propone como fue el origen de un organismo pionero a base de minerales, es la propuesta por Wächtershäuser (2006) donde sugiere la formación de un organismo basado de una subestructura inorgánica y una superestructura orgánica (Figura 1). En la subestructura inorgánica (compuesta de centros de hierro, cobalto, níquel, metales de transición con sulfuro, carbonilo y ligandos) se localizaron los centros catalíticamente activos que permitieron la fijación de carbono formando la superestructura orgánica⁷. Este organismo pionero también se propone que posteriormente permitió la celularización y la formación del sistema genético, dando lugar a diferenciación de los dominios Bacteria, Archaea y Eukarya⁷.

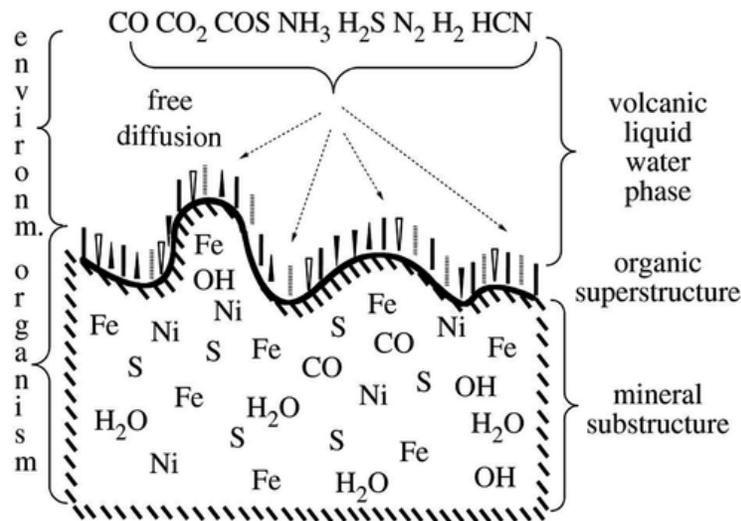


Figura 1. Representación transversal de la organización mínima del organismo pionero. Tomado con permiso de: Wächtershäuser, G. From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya. *Philos. Trans. R. Soc., B* 2006, 361, 1787- 1808.

Este primer organismo, también llamado último ancestro en común o LUCA por sus siglas en inglés, fue un organismo caracterizado por dar el salto del simple uso de RNA al uso de DNA, RNA, ribosomas, enzimas, sistemas membranales complejos, así como un metabolismo fijo^{8,9}.

2.2) Evolución y mantenimiento de los minerales en organismos de todos los reinos

La importancia de los minerales en los organismos vivos, no solo estuvo presente en el origen de la vida, actualmente es importante en todos los organismos, independientemente del reino al que pertenezcan, ya que estos minerales han sido parte importante de su evolución y mantenimiento. Cada organismo se encuentra formado mayormente de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno, y en concentraciones

considerablemente menores contienen elementos como son S, P, Na, K, Mg, Fe, Cu, Zn, Se, Mn, I y F, que resultan esenciales para la vida y su correcto funcionamiento.

El mecanismo por el cual los minerales se incorporaron del medio ambiente y se internalizaron en las células, se ha descrito que fue mediante vesículas, siendo así como se formaron los cristales en los organismos, proceso denominado biomineralización¹⁰. De esta manera, la biomineralización es el proceso mediante el cual los organismos generan materiales para cubrir sus necesidades de protección y soporte. La distribución de minerales biogénicos entre los cinco reinos muestra que son sintetizados por animales, protistas, moneras, plantas y hongos^{11,12}. El proceso de biomineralización se divide en dos mecanismos, i) los biológicamente inducidos y ii) los biológicamente controlados¹³. En el mecanismo biológicamente inducido, la formación de los minerales se lleva a cabo en las superficies celulares, las cuales actúan como centros de nucleación con el subsecuente crecimiento cristalino.

Los minerales cristalinos llevan a cabo funciones en los organismos, por ejemplo, en las bacterias magnetotáticas, cuyos cristales de magnetita le permiten orientarse en el campo terrestre¹⁴. Los cristales más comunes que forman parte de los organismos son los formados por CaCO₃, ya que se encuentran en organismos marinos, en vertebrados y en cascarones de huevo¹⁴.

Se ha identificado que alrededor del 80% de los minerales biológicos son cristalinos, y un 20% amorfos; siendo el calcio quien constituye un 50% de biomineral identificado y un 20% de fosfato. Además, se ha encontrado una amplia distribución de ópalo y óxidos de hierro¹⁵. Algunos de los minerales más importantes en organismos vivos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Principales minerales de origen biogénico^{16,17}

Mineral	Organismo	Función
Carbonato cálcico	Algas, trilobites, moluscos, ascidia, plantas, moneras, protozoarios	Exoesqueleto cristalino, dispositivo de gravedad de exoesqueletos, reservas de calcio
Fosfato cálcico	Vertebrados	Endoesqueletos, dientes, reservas de calcio, precursores de la etapa ósea
Oxalato cálcico	Plantas	Reserva de calcio
Sulfatos del grupo II	Larva de medusa, algas, acanto	Dispositivo de gravedad, soporte celular
Óxidos de hierro	Bacterias, algunos moluscos, animales, plantas	Magnetotaxia, dientes, proteínas de almacenamiento de Fe, almacenamiento de Fe
Dióxido de silicio	Algas, bacterias, caparazones de diatomeas, radiolarios	Exoesqueleto

3) Influencia de los minerales en silico-carbonatos de calcio, bario o estroncio, como modelo del organismo pionero

Los minerales son importantes desde el origen de la vida, así como en la evolución y conservación de los organismos. En este ámbito, algunos minerales de especial interés para la comunidad científica y el objetivo principal de esta revisión son los denominados biomorfos, compuestos de silico-carbonatos de calcio, bario o estroncio, que, por su propiedad de formar estructuras similares a organismos vivos (flores, radiolarios, hojas tallos, gusanos, dobles hélices, etc.), han sido estudiados como un punto clave en el origen de la vida en nuestro planeta¹⁸.

Es la era precámbrica la que se asocia el surgimiento de la vida en la tierra, hace aproximadamente 3600 millones de años¹⁹. De este periodo se han identificado restos fósiles en rocas marinas profundas que pertenecen precisamente a radiolarios, diatomeas, foraminíferos y trilobites que interesantemente, son la mayoría formados por sílice (SiO₂), el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre¹⁴. Este dato muestra que, los biomorfos adoptan estructuras como la de estos organismos formados de sílice, lo que

sugiere la posible relación de los biomorfos en el origen de la vida^{14,18}. Organismos como los radiolarios y diatomeas, están formados por una parte orgánica y otra inorgánica de silicio al igual que los biomorfos, lo cual favorece a la teoría de la unión entre una parte inorgánica y otra inorgánica en el origen de la vida, como en la teoría propuesta por Wächtershäuser del organismo primordial¹⁸.

En estudios pioneros en este tema, se han sintetizado biomorfos de carbonato de calcio, bario y estroncio en presencia de ácidos nucleicos (ADN, ARN y ADN plasmídico), y se ha observado que estas biomoléculas dirigen la morfología de los biomorfos¹⁸. Esto es un hallazgo relevante, ya que, aunque sabemos que los carbonatos de calcio, bario o estroncio son relevantes es la estructura y variedad de morfologías en los organismos, no se ha logrado comprender en su totalidad la forma en que los seres vivos los sintetizan, por lo que, al observar la influencia de los ácidos nucleicos en la síntesis de los biomorfos, nos acercamos más a la comprensión de la síntesis biogénica de los minerales. En la Figura 2 podemos observar biomorfos sintetizados en presencia de ácidos nucleicos, en contraste con los sintetizados en ausencia de estas biomoléculas. Cabe resaltar que los biomorfos de control, obtenidos en ausencia de ácidos nucleicos, presentaron formas diversas, mientras que los obtenidos en presencia de ADN y ARN tuvieron formas únicas y específicas a la biomolécula con la que se sintetizaron, esto demuestra que la presencia de biomoléculas puede dirigir la síntesis de compuestos de carbonato de sílice en formas únicas, lo cual pudo ocurrir en los inicios de la vida en la Tierra¹⁸.

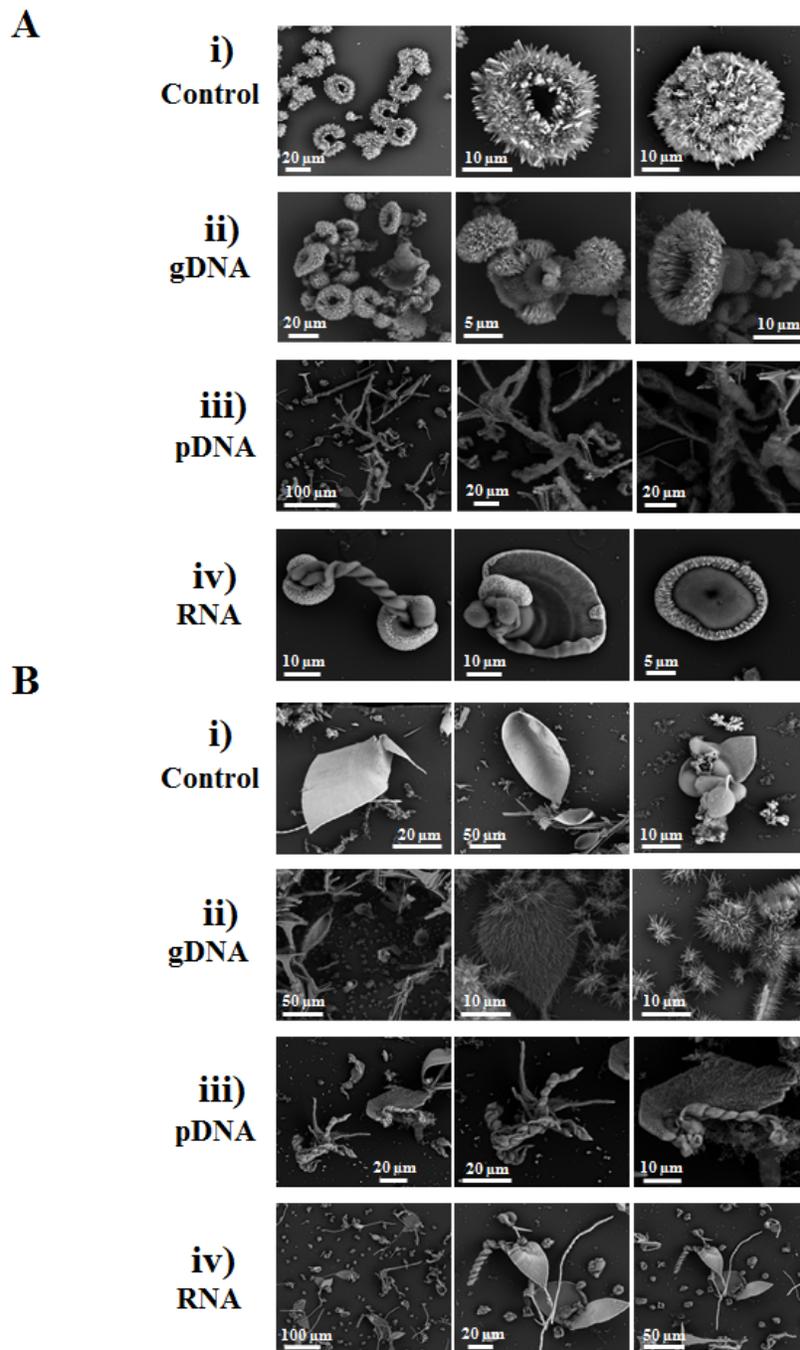


Figura 2. Microfotografías SEM de biomorfos de carbonato de sílice y bario. Control (i), ADN genómico (ii), ADN plasmídico (iii) y ARN (iv) en (A) 37 °C o (B) 50 °C. Tomado con permiso de: Cuéllar-Cruz, M., Islas, S. R., González, G., & Moreno, A. (2019). Influence of nucleic acids on the synthesis of crystalline Ca (II), Ba (II), and Sr (II) silica-carbonate biomorphs: implications for the chemical origin of life on primitive Earth. *Crystal Growth & Design*, 19(8), 4667-4682.

Conclusiones

Los minerales participaron en la síntesis de las primeras moléculas que se sintetizaron en la era Precámbrica, así como en la polimerización, favoreciendo el origen de la vida. Desde ese momento hasta la fecha, los minerales forman parte de la estructura de los organismos que habitan la Tierra.

Agradecimientos

Mayra Cuéllar-Cruz agradece el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del proyecto CF2019-39216, y al proyecto institucional 017/2022 apoyado por la Universidad de Guanajuato. Ana Luz Morales Guerrero agradece la beca otorgada por la Universidad de Guanajuato respecto al Programa XXVII Veranos de la Ciencia 2022.

Bibliografía

- ¹Hazen, R.H., Papineau, D., Bleeker, W., et al. (2008). Mineral evolution. *American Mineralogist.*, 93, 1693–1720.
- ²Wetherill, G. (1990). Formation of the earth. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 18, 205–256.
- ³Papineau, D. (2010). Mineral Environments on the Earliest Earth. *Elements.* 6, 25–30.
- ⁴Hazen, R.M. (2005). Genesis: Rocks, Minerals, and the Geochemical Origin of Life. *Elements.* 1, 135–137.
- ⁵Ruiz de Almodóvar Sel, G. (2013) Los materiales de la tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.* 21–22, 146–154.
- ⁶Brack, A. (2006). Clay Minerals and the Origin of Life, Editor(s): Faïza Bergaya, Benny K.G. Theng, Gerhard Lagaly, *Developments in Clay Science.* 1, 379–391.
- ⁷Wächtershäuser, G. (2006). From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya. *Philos. Trans. R. Soc., B,* 361, 1787–1808.
- ⁸Brunk, C.F., Marshall, C.R. (2021). Whole Organism, Systems Biology, and Top-Down Criteria for Evaluating Scenarios for the Origin of Life. *Life.* 11, 690.
- ⁹Knoll, A. Bambach, R. (2000). Directionality in the History of Life: Diffusion from the Left Wall or Repeated Scaling of the Right?, *Paleontolog. Soc.* 26, 1–14.
- ¹⁰Addadi, L., Weiner, S. (2014). Biomineralization: mineral formation by organisms. *Phys. Scripta.* 89, 098003.
- ¹¹Cuéllar-Cruz, M. (2017). Synthesis of inorganic and organic crystals mediated by proteins in different biological organisms. A mechanism of biomineralization conserved throughout evolution in all living species. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 63, 94–103.
- ¹²Lowenstam, H.A., Margulis, L. (1980). Evolutionary prerequisites for early Phanerozoic calcareous skeletons. *Biosystems.* 12, 27–41.
- ¹³Weiner, S., Dove, P.M. (2003). An Overview of Biomineralization Processes and the Problem of the Vital Effect. *Rev. Mineral. Geochem.* 54, 1–29.
- ¹⁴Cuéllar-Cruz, M. (2021). Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life: Biomorphs as a Study Model. *ACS omega.* 6(13), 8754–8763.
- ¹⁵Édinson-Muñoz, C., Jiménez, A., Martínez-Sánchez, N. (2008). Biominerales. *Revista Ambiental ÉOLO* 9.14 10–10.
- ¹⁶Casas J.S., Sordo, J. (2000). Aspectos básicos de biomineralización, Universidad de Santiago de Compostela. *Revista Galega do Compostela. Revista Galega do Ensino.* 29.
- ¹⁷Margulis, L., Sagan, D. (1995). ¿Qué es la vida?. Colección metatemas.
- ¹⁸Cuéllar-Cruz, M., Islas, S. R., González, G., Moreno, A. (2019). Influence of nucleic acids on the synthesis of crystalline Ca (II), Ba (II), and Sr (II) silica-carbonate biomorphs: implications for the chemical origin of life on primitive Earth. *Cryst. Growth & Design.* 19(8), 4667–4682.
- ¹⁹Viedma, C., Soutullo, B. (2018). Minerales, vida y evolución. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.* 26.3 274-274