

Are biomorphs the first structures that conserved protomolecules in Earth's primitive era?

¿Son los biomorfos las primeras estructuras que preservaron las protomoléculas en la era primitiva en la Tierra?

Karla Montserrat Cuéllar Pérez, Mayra Cuéllar Cruz

Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta
Email:mcuellar@ugto.mx

Resumen

Los silico-carbonatos de metales alcalinotérreos se caracterizan por adoptar morfologías que emulan organismos vivos, característica por la cual son denominados biomorfos. El estudio de estos compuestos es relevante debido a que aun cuando son estructuras inorgánicas, recientemente se ha considerado que posiblemente se asocian a formas primitivas de vida, de esta manera, pueden llegar a estar implicados en el origen de ciertas propiedades químicas de la vida. Se ha descrito recientemente en el grupo de trabajo que los biomorfos pueden interactuar con biomoléculas como son ácidos nucleicos, aminoácidos y proteínas. No obstante, es importante conocer si esta característica permitió que los biomorfos pudieran ser las primeras estructuras inorgánicas que preservaron las protomoléculas en la era primitiva en la Tierra. El objetivo de la presente revisión, es analizar si los biomorfos pueden o no ser considerados como la primera estructura que conservo a las biomoléculas primigenias.

Palabras clave: cristalización, biomorfos, sílico-carbonatos.

Introducción

Nuestro planeta ha pasado por distintas etapas geológicas desde su formación, siendo la era Precámbrica la más extensa de todas, que abarcó desde hace aproximadamente 4,567 hasta 542 millones de años¹. Durante esta etapa primigenia se ha reportado que es en donde se llevó a cabo la síntesis prebiótica de las protomoléculas como son los ácidos nucleicos y las enzimas que en conjunto permitieron las primeras formas de vida¹. Esta síntesis fue posible tanto en las condiciones atmosféricas presentes, así como a los compuestos inorgánicos que desempeñaron un papel específico².

La interacción entre compuestos inorgánicos y fuentes de energía, como la alta radiación solar, se ha reportado que pudo haber conducido a la formación de moléculas orgánicas con un mayor nivel de complejidad⁴. Estudios recientes han propuesto diversas teorías y modelos para explicar cómo surgieron los primeros organismos vivos a partir de compuestos inorgánicos en las condiciones de la Tierra primitiva¹. El ARN es considerada la primera biomolécula sintetizada en la era Precámbrica, ya que desempeña un papel fundamental y esencial en lo que se conoce como el dogma central de la biología molecular (Fig.1)⁵. Esta molécula posee la capacidad única de almacenar y transmitir información genética. La hipótesis del mundo del ARN postula que las primeras moléculas replicadoras y autorreplicadoras fueron moléculas de ARN que se formaron en la atmósfera de la Tierra primitiva⁶. Esta teoría sugiere que el ARN desempeñó un papel crucial en los primeros pasos hacia la aparición de la vida en nuestro planeta⁶.

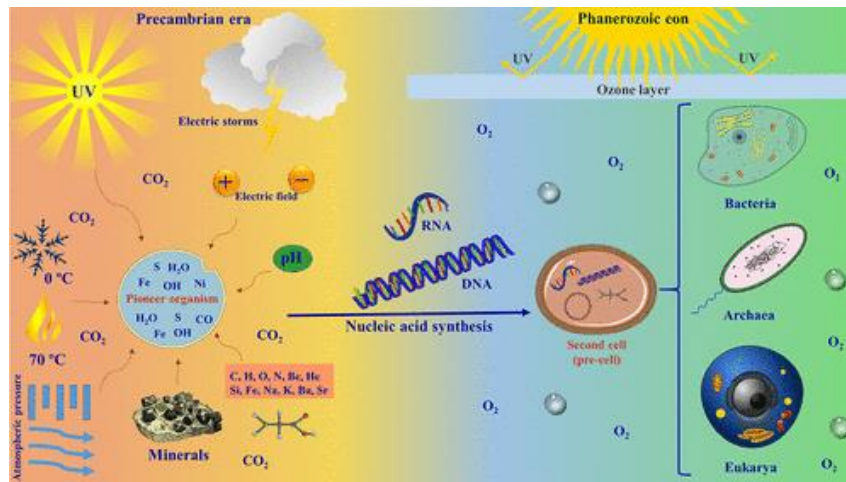


Figura 1. Los minerales desempeñan un papel fundamental en la comprensión del origen de la formación de la Tierra. Durante etapas clave en la aparición de la vida, como el período Precámbrico, se sugiere que los minerales abióticos desempeñaron un papel crucial en la formación y reproducción de las biomoléculas, lo que contribuyó al desarrollo y sustento de la vida. Imagen tomada con permiso de Cuéllar-Cruz, M., (2021) Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life: Biomorphs as a Study Model. ACS Publications. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00497>.

Además de la hipótesis del mundo del ARN, el estudio de los biomorfos y su formación proporciona información valiosa sobre los mecanismos involucrados en la aparición de la complejidad en sistemas abióticos y en los posibles procesos que dieron origen a las primeras formas de vida en la Tierra. El análisis de estas estructuras puede contribuir al entendimiento de los procesos fundamentales que condujeron a la emergencia de la vida del planeta, así como en la comprensión de los mecanismos que promovieron la complejidad biológica. La investigación de los biomorfos y las condiciones que favorecen su desarrollo es esencial para comprender los pasos fundamentales que llevaron a la aparición de la vida en la Tierra³.

Los biomorfos son estructuras, que podrían explicar los procesos que dieron origen a las formas de vida, esto debido a que están compuestos principalmente de sílice, y se forman a través del proceso de cristalización de sílice-carbonato de metales alcalinotérreos⁴ (Fig. 2). Estas estructuras exhiben similitudes morfológicas con organismos vivos y conservan cierta analogía con las primeras formas de vida. En varios trabajos se ha mostrado que los biomorfos presentan morfologías curvas que evocan principios estructurales observados en biominerales naturales, los cuales comparten similitudes en términos de textura y composición química con los microfósiles del Precámbrico⁴. El fenómeno de "autoensamblaje" de los biomorfos ocurre debido a la precipitación de minerales de carbonato a partir de soluciones con alto contenido de sílice, en un intervalo de pH de 9.5 a 12.5, en presencia de una fuente rica en carbono, como el CO₂, y a temperaturas que oscilan entre aproximadamente 4°C y 100°C. Este proceso de formación implica una interacción compleja entre los componentes químicos y las condiciones ambientales, lo cual resulta en la generación de estructuras con características similares a las de los organismos vivos⁴.

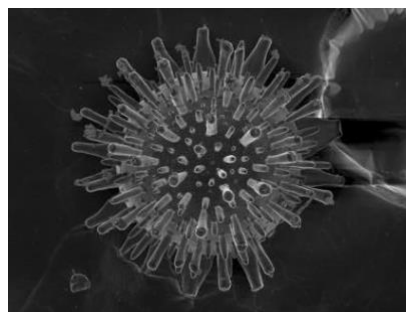


Figura 2. Biomorfos de cal y sílice: observados mediante microscopía electrónica de barrido. Imagen obtenida de Google Photos.

Material y Métodos

Para elaboración de este artículo se revisaron diversas fuentes de información entre ellos, páginas web de Google Academic y artículos científicos de diferentes sitios, todo esto con la finalidad de poder elaborar un compendio más amplio de información precisa y adecuada del tema a desarrollar. Las fuentes de búsqueda para la realización de este texto se muestran en la tabla 1.

La tabla 1 muestra los distintos sitios que se visitaron. Entre ellos los principales fueron Nature communications, Science Advances, ACS Publications y Crystal Growth & Design.

Tabla 1. Hallazgos obtenidos al realizar búsquedas en diferentes fuentes.

Sitio	Nature communications	Science Advances	ACS Publications	Crystal Growth & Design
Fecha	03/07/2023	03/07/2023	03/07/2023	03/07/2023
Palabras clave	Biomorphic, pH, biomineralization, crystalline, nanostructures, nucleases, matrix.	Silica, biominerals, biomorphs, calcium carbonate.	Minerals, silicon, biomolecules, abiotic factors.	Precambrian, RNA, fosiles, biomorphs.
Temas	Local pH oscillations witness autocatalytic self-organization of biomorphic nanostructures	Biomimetic mineral self-organization from silica-rich spring waters	Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life: Biomorphs as a Study Model	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
	Nuclease resistance of DNA nanostructures. * The biofilm matrix		Synthesis of Crystalline Silica-Carbonate Biomorphs of Ba (II) under the Presence of RNA and Positively and Negatively Charged ITO Electrodes: Obtainment of Graphite via Bioreduction of CO ₂ and Its Implications to the Chemical Origin of Life on Primitive Earth	

Resultados

Los artículos revisados reportan que los minerales tienen relevancia en la síntesis de las protomoléculas. Igualmente se resalta la importancia de los minerales, el porque estos participan en la morfología de los biomorfos, el cómo conforman su estructura y como estos biomorfos llegan a proteger los ácidos nucleicos del medio externo.

Importancia de los minerales en la síntesis de las protomoléculas

La importancia de los minerales en la síntesis de las protomoléculas ha sido objeto de investigación en el campo de la astrobiología y el origen de la vida en la Tierra. Estudios recientes han revelado la participación de los minerales en la formación y concentración de los precursores orgánicos necesarios para la aparición de las primeras biomoléculas⁷. Se ha observado que minerales como el MgO y la olivina del manto superior terrestre poseen bandas de estiramiento de enlaces C-H que se asemejan a los modos simétricos y asimétricos de estiramiento de enlaces alifáticos CH₂⁷. Se ha propuesto que la presencia de agua y dióxido

de carbono disueltos en la matriz de estos minerales se convierte en hidrógeno y carbono reducido, que a su vez se combina para formar enlaces C-H en defectos como dislocaciones. Estos enlaces C-H se descomponen al ser calentados, pero pueden reaparecer después de un proceso de recocido. Se ha sugerido que las entidades Cx-Hy-Oz resultantes podrían representar protomoléculas a partir de las cuales se derivan ácidos carboxílicos y dicarboxílicos de cadena corta y ácidos grasos de cadena media⁷. Estas moléculas orgánicas complejas pueden haber sido precursoras de la vida en la Tierra.

Además, otros estudios enfatizan la importancia de los nanomateriales en la síntesis y manipulación de moléculas a escala nanométrica. Los nanomateriales, que incluyen compuestos como fullerenos, nanotubos de carbono y grafeno, pueden ser diseñados y funcionalizados para exhibir propiedades magnéticas, eléctricas, ópticas, mecánicas y catalíticas excepcionales⁸. Estas propiedades únicas hacen que los nanomateriales sean adecuados para promover reacciones químicas y la formación de enlaces químicos en la síntesis de protomoléculas. A través del control preciso del tamaño, la forma y las condiciones de síntesis, es posible ajustar las propiedades de los nanomateriales y optimizar su capacidad para actuar como catalizadores en las reacciones químicas relevantes para la formación de las primeras biomoléculas⁸.

La formación de minerales cristalinos también ha desempeñado un papel fundamental en el origen de la vida en la Tierra. Los minerales han sido responsables de la concentración, alineación y actuación como plantillas y catalizadores en la formación de enlaces entre las primeras biomoléculas, permitiendo la formación de polímeros y el surgimiento de los primeros organismos en la era primitiva⁹. Además, los minerales han protegido a los complejos orgánicos contra la radiación ultravioleta y la hidrólisis, proporcionando un entorno favorable para la preservación de la vida en una etapa temprana de la Tierra, donde la radiación ultravioleta era intensa⁹.

Los ácidos nucleicos influyen en la morfología de los biomorfos

Los ácidos nucleicos desempeñan un papel fundamental en la morfología de los biomorfos, participando en la formación y estructura de estas estructuras abióticas con características similares a organismos vivos (Fig.3). Los ácidos nucleicos, en particular el ADN (ácido desoxirribonucleico) y el ARN (ácido ribonucleico), son grandes polímeros formados por la repetición de unidades monoméricas llamadas nucleótidos¹⁰. La secuencia de nucleótidos en los ácidos nucleicos codifica la información genética que dirige y controla la síntesis de proteínas en un organismo¹¹.

La importancia de los ácidos nucleicos radica en su capacidad para almacenar y transmitir la información genética que determina la especificidad y características biológicas de las proteínas, moléculas fundamentales en los procesos vitales de los seres vivos¹⁰. Se explica que los ácidos nucleicos son muy estables y que su nombre proviene del hecho de que se encontraron por primera vez en el núcleo de las células¹¹. Estas moléculas son esenciales para transmitir la información genética de una célula a otra y asegurar su estabilidad¹¹.

Los ácidos nucleicos proporcionan la base para la síntesis de proteínas y recientemente se han incorporado en la síntesis de los biomorfos, con la finalidad de elucidar si influyen en la morfología que adoptan. Para comprender cómo los ácidos nucleicos participan en la morfología de los biomorfos, se pueden considerar dos aspectos fundamentales: i) la capacidad de los ácidos nucleicos para autorreplicarse y, ii) la influencia de la secuencia de nucleótidos en la organización espacial de las moléculas¹². En cuanto a la capacidad de autorreplicación, los ácidos nucleicos son capaces de duplicarse a sí mismos mediante la replicación del ADN y la transcripción del ARN. Esta capacidad de autorreplicación permite que los ácidos nucleicos estén presentes en grandes cantidades en los biomorfos, lo que contribuye a la estabilidad y persistencia de estas estructuras. La autorreplicación de los ácidos nucleicos puede influir en la morfología de los biomorfos al permitir la formación de estructuras complejas a partir de unidades más simples, similar a cómo la replicación del ADN permite la formación de nuevas células con una morfología definida¹². La secuencia de nucleótidos determina la estructura tridimensional de los ácidos nucleicos, lo que a su vez afecta la interacción con otras moléculas y la conformación de las estructuras supramoleculares. Estas interacciones y conformaciones espaciales pueden influir en la forma y estructura de los biomorfos¹².

Una vez que se incorporaron ADN y ARN en la síntesis de los biomorfos, se encontró que en presencia de estos, los biomorfos adoptan una única morfología. Resultados que muestran que al parecer los ácidos nucleicos favorecen la síntesis de la morfología más estable (Fig. 3)¹.

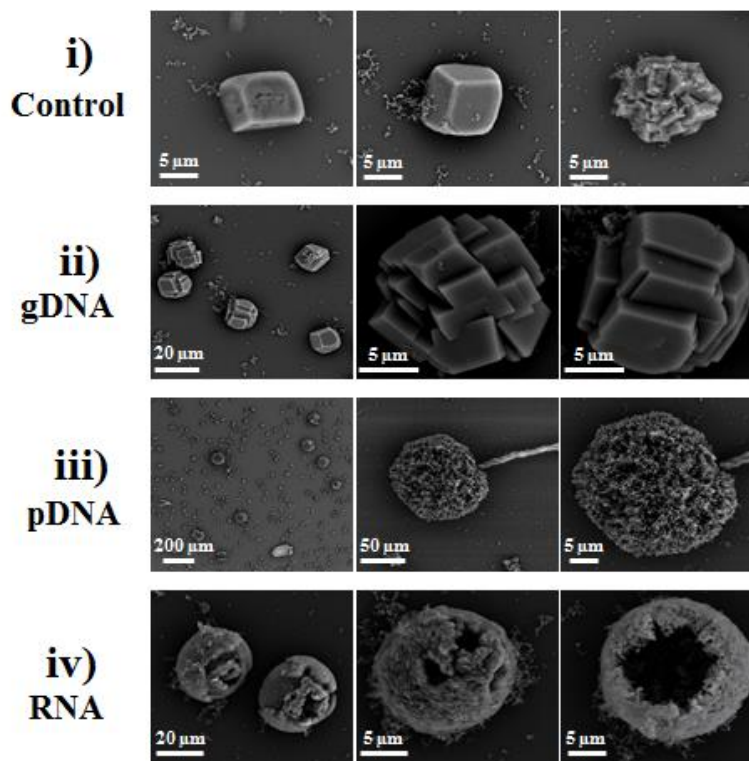


Figura 3. Se obtuvieron imágenes microscópicas utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) para analizar polimorfismos de silico-carbonatos de calcio sintetizados a 37 °C. Se realizaron diferentes muestras para el estudio: i) muestras de control con una forma de cubo definida, ii) muestras sintetizadas en presencia de ADNc que formaron cristales apilados en forma de cubo, iii) muestras sintetizadas en presencia de ADNp que mostraron esferas con superficie rugosa similares a flores con tallo, como el diente de león, y iv) muestras sintetizadas en presencia de ARN que presentaron pseudoesferas huecas. Imagen tomada 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.

Los biomorfos protegen a los ácidos nucleicos del medio externo

La formación de matrices biológicas es uno de los mecanismos utilizados por los biomorfos para proteger a los ácidos nucleicos del medio externo. Estas matrices, compuestas por polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos y lípidos, proporcionan un entorno estructurado que inmoviliza a los ácidos nucleicos y los mantiene en estrecha proximidad con otras moléculas y células. Esta proximidad permite la comunicación celular, la transferencia horizontal de genes y la formación de microconsorcios sinérgicos¹³. Además, las matrices biológicas retienen enzimas extracelulares, lo que crea un sistema digestivo externo versátil que facilita la importación, acumulación y utilización de nutrientes disueltos y particulados¹³. Estas matrices también protegen a los ácidos nucleicos de amenazas externas como la desecación, los biocidas, los antibióticos, los metales pesados, la radiación ultravioleta, las defensas inmunológicas del hospedero y los depredadores protozoarios¹³. La capacidad de las matrices biológicas para proporcionar una protección física y química es esencial para la preservación de los ácidos nucleicos.

Con la finalidad de tener una mejor comprensión acerca de si los biomorfos pudieron ser ese almacén inorgánico que existió en la Tierra primigenia, se obtuvieron biomorfos de los distintos metales alcalinotérreos en presencia de ADN genómico de organismos de los cinco reinos, en dos condiciones de síntesis que emulan tanto a la atmósfera en la era Precámbrica, así como en la época actual, en relación con la concentración de CO₂. En donde se encontró que el ADN forma parte de la estructura de los biomorfos y que se internaliza en los mismos. Datos que indican que los biomorfos pudieron ser una de las primeras estructuras inorgánicas en donde las biomoléculas como el ADN se concentraron, alinearon, polimerizaron y protegieron de las radiaciones UV e hidrólisis, permitiendo la formación de polímeros, los cuales se ensamblaron para formar al primer organismo, y aun cuando no se encuentran datados como registro fósil, esto puede deberse posiblemente a que son la estructura antecesora a los cherts del precámbrico¹⁴.

En conjunto estos resultados muestran que los biomorfos producidos en presencia de ADN, pudieron ser la primera estructura mineral cristalina en donde las biomoléculas del Precámbrico se aislaron del medio ambiente existente y de esta manera se conservaron, duplicaron y favorecieron la diversidad de organismos. Pero de manera relevante, también muestran que el ADN de plantas y de humanos, no son compatibles con este elemento químico¹⁴, lo que revelaría que efectivamente las plantas actuales y los humanos, no se originaron en la era precámbrica, sino en épocas más recientes. Mientras, por ejemplo existen algas que si son compatibles con este elemento químico y lo han conservado hasta nuestra época.

Adicionalmente, se han realizado experimentos en los cuales el ADN fue marcado con el fluorocromo 4',6-diamidino-2-fenilindol (DAPI) y posteriormente se visualizaron los biomorfos por medio de microscopia confocal. Se evaluaron los biomorfos con calcio (Ca^{2+}), bario (Ba^{2+}) y estroncio (Sr^{2+}) con y sin ADN en presencia del DAPI, y se encontró que el ADN se localiza en los biomorfos, ya que no se observa fluorescencia en ningún otro campo fuera de estos (Fig. 4)¹⁴.

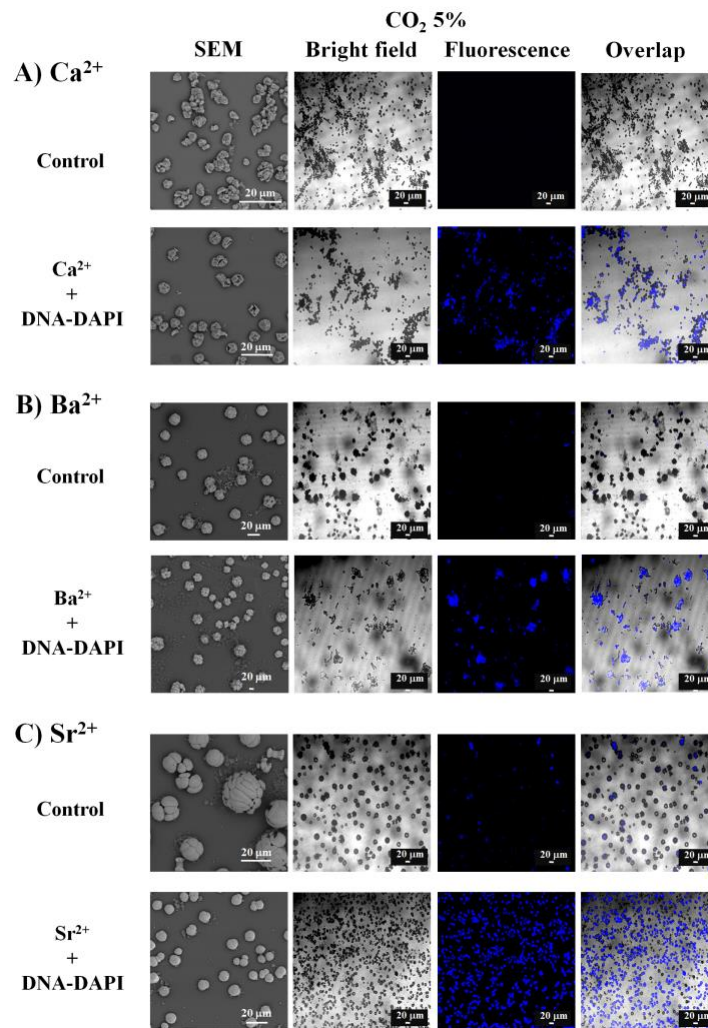


Figura 4. Micrografías de los biomorfos sintetizados en ausencia o presencia de ADN-DAPI, bajo una corriente constante de CO₂ al 5%, con A) Ca²⁺; B) Ba²⁺; or C) Sr²⁺, obtenidas por microscopia electrónica de barrido (SEM), Campo claro and microscopia confocal. Imagen tomada con permiso de Cuéllar-Cruz, M., Islas S.R., Ramírez-Ramírez, N., Pedraza-Reyes., Moreno, A.(2022) Protection of the DNA from Selected Species of Five Kingdoms in Nature by Ba(II), Sr(II), and Ca(II) Silica-Carbonates: Implications about Biogenicity and Evolving from Prebiotic Chemistry to Biological Chemistry. DOI:10.1021/acsomega.2c04170.

En el caso de la muestra control correspondiente a los biomorfos de bario, como se muestra en la micrografía de fluorescencia, el bario per se tiene una fluorescencia muy baja, la cual es apenas perceptible como un

punto (Fig. 4B). En contraste con los biomorfos de bario sintetizados con el DNA-DAPI, se observa la fluorescencia con gran intensidad (Fig. 4B). Al igual que se muestra con los biomorfos de calcio, la fluorescencia se encuentra localizada en los biomorfos de bario (Fig. 4B). La muestra control correspondiente a los biomorfos de estroncio, se observaron puntos apenas perceptibles, esto es debido a que el bario y el estroncio per se presentan una muy baja autofluorescencia (Fig. 4C). Mientras los biomorfos con el DNA-DAPI, se encontró que el DNA se encuentra localizado en los biomorfos (Fig. 4C).

Estos resultados permiten proponer a los biomorfos como una de las primeras estructuras inorgánicas en donde las biomoléculas se aislaron del medio ambiente en el Precámbrico.

Conclusiones

La investigación sobre el origen de la vida primitiva y la formación de biomorfos proporciona pistas importantes para comprender los procesos químicos y las condiciones que podrían haber permitido el surgimiento de la vida en la Tierra. A medida que se continúa investigando y se obtienen nuevos conocimientos, se exploran nuevas teorías y evidencias, esto con la finalidad de poder comprender los mecanismos que dieron lugar a la diversidad de formas de vida que existen en el planeta 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 002/2023 apoyado por la Universidad de Guanajuato. Karla Montserrat Cuéllar Pérez agradece la beca otorgada por la Universidad de Guanajuato respecto al Programa XXVIII Veranos de la Ciencia 2023.

Bibliografía/Referencias

1. Cuellar-Cruz, M.; Islas, S. R.; Gonzalez, 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.
2. Cuéllar-Cruz, M. (2021). Influence of abiotic factors in the chemical origin of life: Biomorphs as a study model. *ACS Omega*, 6(13), 8754–8763. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00497>.
3. Montalti, M., Zhang, G., Genovese, D., Morales, J., Kellermeier, M., & García-Ruiz, J. M. (2017). Local pH oscillations witness autocatalytic self-organization of biomorphic nanostructures. *Nature Communications*, 14427. <https://doi.org/10.1038/ncomms14427>.
4. García-Ruiz, J. M., Nakouzi, E., Kotopoulou, E., Tamborrino, L., & Steinbock, O. (2017). Biomimetic mineral self-organization from silica-rich spring waters. *Science Advances*, e1602285. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602285>.
5. Cuéllar-Cruz, M., & Moreno, A. (2020). Synthesis of crystalline silica-carbonate biomorphs of Ba(II) under the presence of RNA and positively and negatively charged ITO electrodes: Obtainment of graphite via bioreduction of CO₂ and its implications to the chemical origin of life on primitive Earth. *ACS Omega*, 5(10), 5460–5469. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00068>.
6. Lazcano, A. (2015). The RNA World: Piecing together the historical development of a hypothesis. *Mètode Revista de Difusió de La Investigació*, 0(6). Recuperado de <https://doi.org/10.7203/metode.6.5146>.
7. Freund D, Staple A. (2001). Organic protomolecule assembly in igneous minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(5), 2142-2147. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.061513298>.
8. Baig, N., Kammakakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2, 1821-1871. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ma/d0ma00807a>.

9. Pérez Aguilar, Cesia D, Cuéllar-Cruz, M . (2022). The formation of crystalline minerals and their role in the origin of life on Earth. *Current Opinion in Chemical Biology*, 65, 88-95. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960897422000018>.
10. Ácidos nucleicos. (n.d.). *Genome.gov*. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/acido-nucleico#:~:text=El%20%C3%A1cido%20desoxirribonucleico%2C%20o%20ADN,que%20incluyen%20la%20s%C3%ADntesis%20proteica>.
11. Ácidos nucleicos. (s.f.). *Genome.gov*. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/acido-nucleico>.
12. Toro Ibacache, M. V., Manriquez Soto, G., & Suazo Galdames, I. (2010). Morfometría Geométrica y el Estudio de las Formas Biológicas: De la Morfología Descriptiva a la Morfología Cuantitativa. *International Journal of Morphology*, 28(4), 977-990. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022010000400001.
13. Flemming H., Wingender J., The biofilm matrix. (2010). *Nature Reviews Microbiology*. <https://www.nature.com/articles/nrmicro2415>.
14. Cuéllar-Cruz M., R.Islas S., Ramírez-Ramírez, Pedraza-Reyes M., Moreno A. (2022). Protection of the DNA from selected species of five kingdoms in Nature by Ba(II), Sr(II) and Ca(II) silica-carbonates: Implications about biogenicity and evolving from prebiotic chemistry to biological chemistry. *ACS Omega*. 7, 37410-37426. DOI: 10.1021/acsomega.2c04170.