

El origen de la vida fue un evento multifactorial: biomorfos como modelo de estudio

The origin of life was a multifactorial event: biomorphs as a study model

Sandra Ethelvina Coria Alcaraz¹, Juan Salvador Campa Rivera², Paola Cardona Tierrablanca¹, Alondra Paulina Jurado Ávila¹, Ariadna María Quezada Ibarra¹, Abel Moreno³, Mayra Cuéllar Cruz^{1*}

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.

²Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, Ing. Javier Barros Sierra 201, Celaya, Guanajuato, México.

³Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510, México.
*mcellar@ugto.mx

Resumen

Entre los grandes misterios de la ciencia, el origen de la vida es uno de los más difíciles de descifrar. Para rastrear la historia de la vida en la Tierra, se recurre al estudio de las rocas buscando microestructuras que puedan ser restos de la vida primitiva. El precámbrico fue un periodo de grandes modificaciones geológicas, comenzando a surgir las formas de vida primarias. Debido a los avances, se ha confirmado que en las condiciones de la Tierra primitiva era común encontrar agua con pH alcalino, favoreciendo la autoorganización de pequeñas moléculas minerales formadas de silico-carbonatos de metales alcalinotérreos. Entre otras cosas, estas eran capaces de formar estructuras inertes que tienen una forma, textura y una simetría similar a las de los seres vivos, las cuales han sido denominados biomorfos. El objetivo del proyecto fue evaluar la síntesis de biomorfos sobre un mineral en diferentes condiciones atmosféricas.

Palabras clave: Biomorfos; Minerales; Origen de la vida.

Introducción

Hace millones de años apareció la vida en la Tierra, y aun cuando no se conoce el mecanismo que se llevó a cabo, actualmente se tiene el conocimiento de que había compuestos orgánicos que se formaron en este planeta, o bien a través de la hipótesis en donde se postula que estas moléculas químicas pudieron llegar a través del impacto de los meteoritos en nuestro planeta¹. A partir de las protomoléculas, se ha descrito que se obtuvo el ADN. No obstante, en la síntesis de ADN son necesarias enzimas². En este contexto, se ha descrito que en todos los seres vivos contemporáneos el ácido ribonucleico (ARN) juega un papel muy importante. De esta manera, mediante diversos experimentos in vitro se ha podido confirmar que, en las condiciones del Precámbrico, en donde era común encontrar agua alcalina, era posible la autoorganización de pequeñas moléculas minerales^{3,4}. Recientemente se ha propuesto que esas moléculas minerales pioneras, pudieron ser estructuras cristalinas de silico-carbonato de elementos alcalinotérreos y que actualmente se conocen como biomorfos⁴. Además, estas estructuras auto-ensambladas también son catalizadores de reacciones químicas prebióticas⁵. Se ha mostrado que la sílice (en forma de silicatos) es capaz de fabricar estructuras complejas minerales que se auto-ensamblan, mediante tres mecanismos, siendo el mecanismo más común que se propone, en el que los biomorfos son formados por diminutas partículas de carbonato de bario que van creciendo con la ayuda de la sílice, para posteriormente ensamblarse por sí mismos. Obteniendo de esta manera simetrías, formas y texturas que recuerdan a los esqueletos de los organismos vivos⁶. Los biomorfos se sintetizan en condiciones similares a las que formaron las rocas de la tierra primitiva. Estas estructuras son producidas por un mineral tan abundante como lo es el carbonato de calcio, hace aún más fascinante la investigación del papel que pudieron jugar cuando en la tierra se acuñó la vida. Otro elemento que tuvo un papel preponderante en la formación de los biomorfos, fueron los minerales presentes en la primera etapa de la Tierra. Se ha reportado que los minerales con alto contenido de silicatos, son el grupo de minerales de mayor abundancia en la corteza terrestre, además se encuentran relacionados con sucesos geológicos, y también se encuentran en suelos y rocas erosionadas hidrotermalmente^{7,8}. Dentro de los minerales ricos en silicio se encuentra la lizardita, que forma parte de los filosilicatos, comúnmente denominados silicatos de hojas. En el grupo de trabajo se ha evaluado el efecto de algunos materiales en la síntesis de los biomorfos⁹. No obstante, no se ha evaluado el posible efecto de la lizardita al obtenerse los biomorfos sobre la superficie de este mineral. Con la finalidad de evaluar la lizardita en la síntesis de los biomorfos, el objetivo del presente trabajo fue sintetizar biomorfos de bario sobre lizardita.

Materiales y Métodos

a) Síntesis de los biomorfos

La síntesis de biomorfos silico-carbonatos de bario fue realizada sobre placas de vidrio, o mineral de 3mm x 5mm.

Se emplearon 100 μL de silicato de sodio en concentración de 1000 ppm y del catión a una concentración de 20 ppm. Se adicionó 1.5 μL de NaOH para propiciar medio alcalino (pH 11.0). La síntesis de los biomorfos se llevó a cabo en dos condiciones atmosféricas: a) temperatura y CO_2 ambientales (STP); b) 50°C y 5% de CO_2 (condiciones que emulan el precámbrico),

b) Caracterización de los biomorfos

Los biomorfos fueron analizados mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía Raman, y por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Caracterización por MEB:

Las morfologías que adoptaron los biomorfos fueron observadas mediante MEB con el microscopio TESCAN (Brno República Checa), modelo VEGA3 SB, con un detector de electrones secundario (SE), de 10 a 20 kV en altas condiciones de vacío (distancia de trabajo de 10 mm).

Espectroscopía Raman:

El análisis químico y la determinación cristalina de los biomorfos se realizó de acuerdo a la metodología previamente descrita por el grupo de trabajo. El equipo utilizado fue un WITec alpha 300 Serie Raman- AFM (WITec GmbH, Ulm, Germany), con una excitación de luz (laser verde Nd:YVO4) de 532 nm. El rayo láser incidente con una potencia de 14.4 mW se enfocó mediante objetivos de 20x, 50x y 100x (Zeiss, Alemania). El espectro Raman se obtuvo utilizando 0.01 s de tiempo de integración. El procesamiento y análisis de los datos se realizó con el software WITec Project Versión 5.1¹⁰⁻¹⁴.

Resultados y Discusión

La morfología de los biomorfos de bario es dependiente de las condiciones químicas y atmosféricas

Una vez que se obtuvieron los biomorfos de silico-carbonato de bario sobre la placa de vidrio (biomorfos control), así como sobre el mineral, tanto en STP como en condiciones que emulan el Precámbrico, la morfología que adoptaron fue visualizada por medio de MEB. Los biomorfos control obtenidos en condiciones atmosféricas actuales (STP) de temperatura y CO_2 presentaron morfología de hoja (Fig. 1a). Morfología que previamente se han reportado^{12,13}. En el caso de los biomorfos obtenidos en las condiciones que emulan el Precámbrico se observaron un arreglo policristalino y por otro lado drusas esferoidales (Fig. 1b). Estas morfologías se encuentran en concordancia con lo observado en estas condiciones¹⁵.

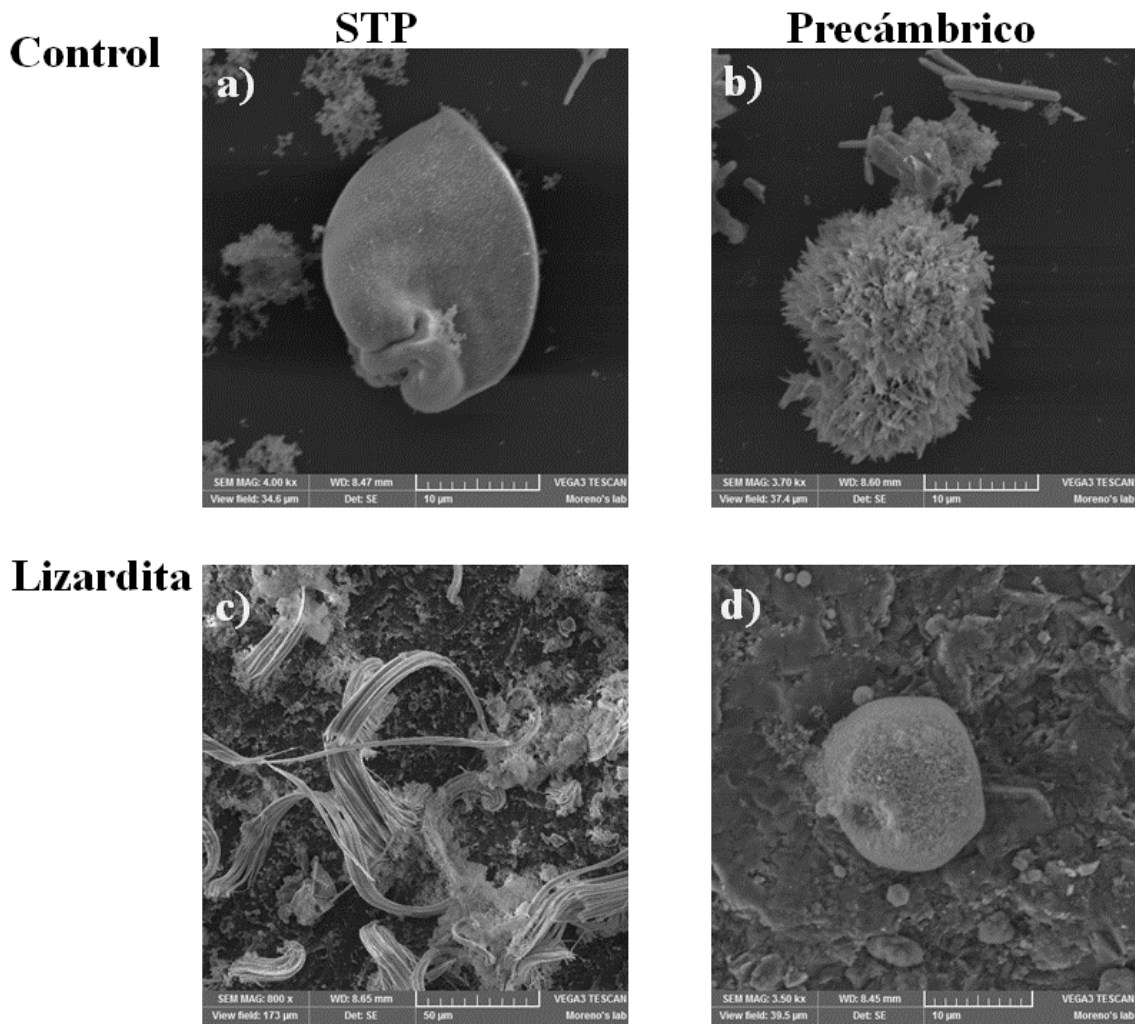


Figura 1. Microfotografías de MEB de los biomorfos de silico-carbonato de bario sintetizados sobre una placa de vidrio y sobre lizardita, en dos condiciones atmosféricas distintas: control y condiciones que emulan el Precámbrico.

Mientras en el caso de los biomorfos que se sintetizaron sobre el mineral, se encontró que los biomorfos en condiciones STP adoptaron morfología que emulan a las fibras que se obtienen de plantas de algodón (Fig. 1c). Los biomorfos que crecieron sobre el mineral, pero en condiciones atmosféricas que emulan el Precámbrico, se observaron esferas, las cuales se ha observado que en estas condiciones atmosféricas se favorecen las esferas, al igual que en presencia de aminoácidos o proteínas¹⁶. Morfología relevante debido a que la mayoría de los organismos vivos presentan curvaturas o esferas, como son las bacterias¹⁷. Evidencia que puede indicar que las primeras formas de vida en donde el bario formaba parte de la estructura inorgánica, su morfología era esférica o semiesférica, la cual desde entonces debe presentar ventajas con respecto a otras morfologías.

Con la finalidad de identificar y caracterizar a los biomorfos obtenidos sobre placas de vidrio o sobre el mineral en ambas condiciones atmosféricas, se llevó a cabo el análisis por espectroscopia Raman. Al analizar los espectros de Raman de los biomorfos sintetizados en condiciones STP (Fig. 2b) se observaron picos a 95, 139, 153, 222, 490, 691, 1059, 1354, 2908 y 2968 cm^{-1} . Estos picos corresponden al polimorfo de carbonato de bario (BaCO_3) witherita.

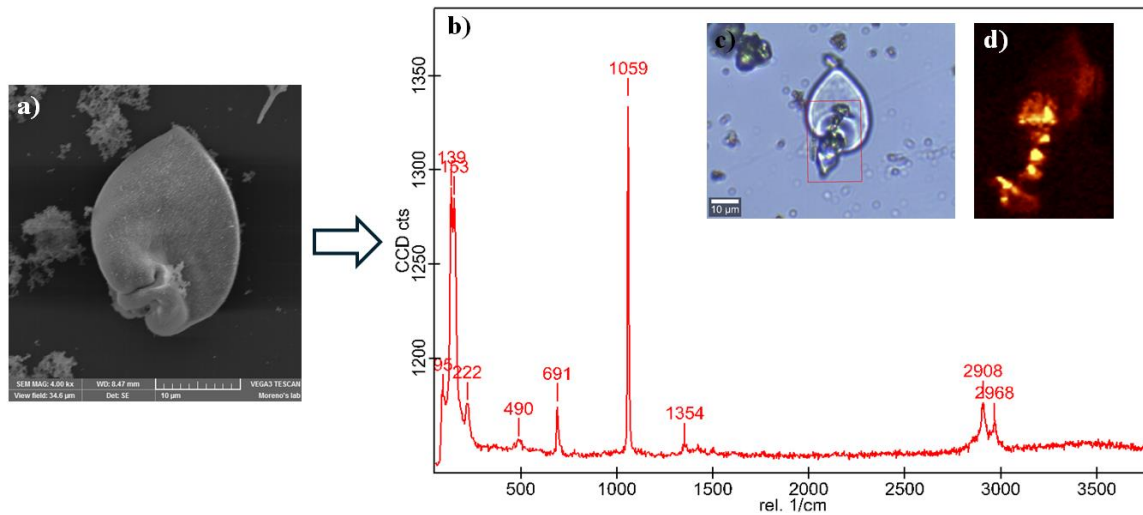


Figura 2. Identificación por espectroscopia Raman de los biomorfos de bario sintetizados sobre placas de vidrio en condiciones atmosféricas actuales. a) Microfotografía de MEB; b) Espectro Raman; c) Microfotografía óptica; d) Imagen confocal.

En el caso de los biomorfos control producidos en condiciones que emulan el periodo Precámbrico, se observaron bandas de vibración análogas que para el caso de los biomorfos obtenidos a temperatura ambiente (Fig. 3b). Resultados que confirman la composición química y la estructura cristalina de los biomorfos obtenidos. Estructura cristalina que se encuentra en concordancia con lo mostrado por otros grupos de investigación, trabajos en donde se ha reportado que las bandas características debido a la lattice vibration son 136, 155, 180 and 225 cm^{-1} , mientras las bandas debido a las internal vibration son a 691 and 1059 cm^{-1} ¹⁸.

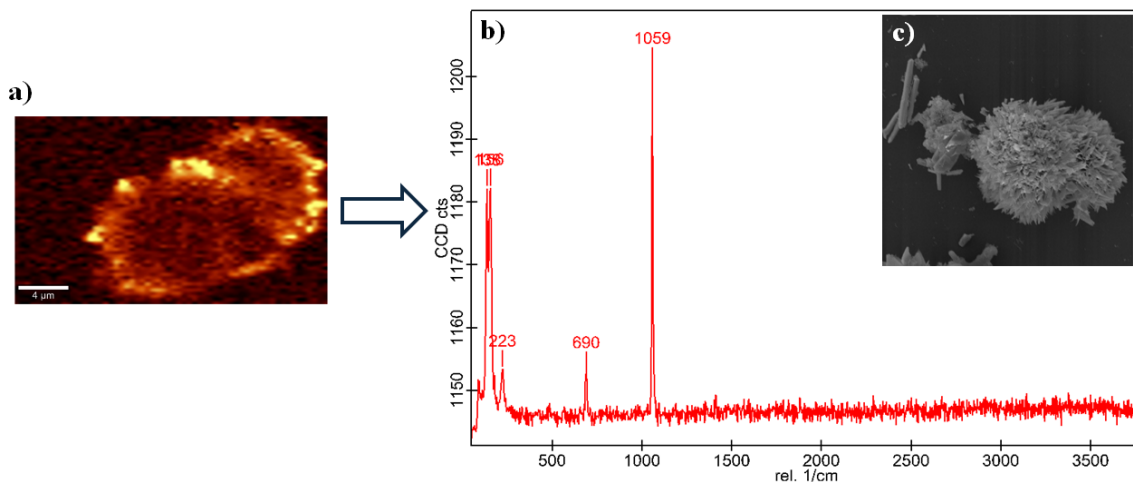


Figura 3. Identificación por espectroscopia Raman de los biomorfos de bario sintetizados sobre placas de vidrio en condiciones que emulan el Precámbrico. a) Imagen Raman; b) Espectro Raman; c) Microfotografía de MEB.

Los biomorfos que fueron sintetizados sobre el mineral en condiciones STP, presentaron picos a 139, 153, 691, 1059, 2930 y 2975 cm^{-1} (Fig. 4c). Los cuales corresponden al polimorfo de witherita. Para los biomorfos que se obtuvieron en condiciones que emulan el Precámbrico, también se determinó el polimorfo de witherita. El haber identificado que los biomorfos de silico-carbonato de bario corresponden al polimorfo de la witherita como se ha identificado en otras condiciones de síntesis es relevante¹²⁻¹⁴, debido a que el bario, aún cuando es un elemento químico poco común que forme parte de los seres vivos, ha sido identificado en algunos organismos de nuestra época como son algas, invertebrados y peces¹⁹.

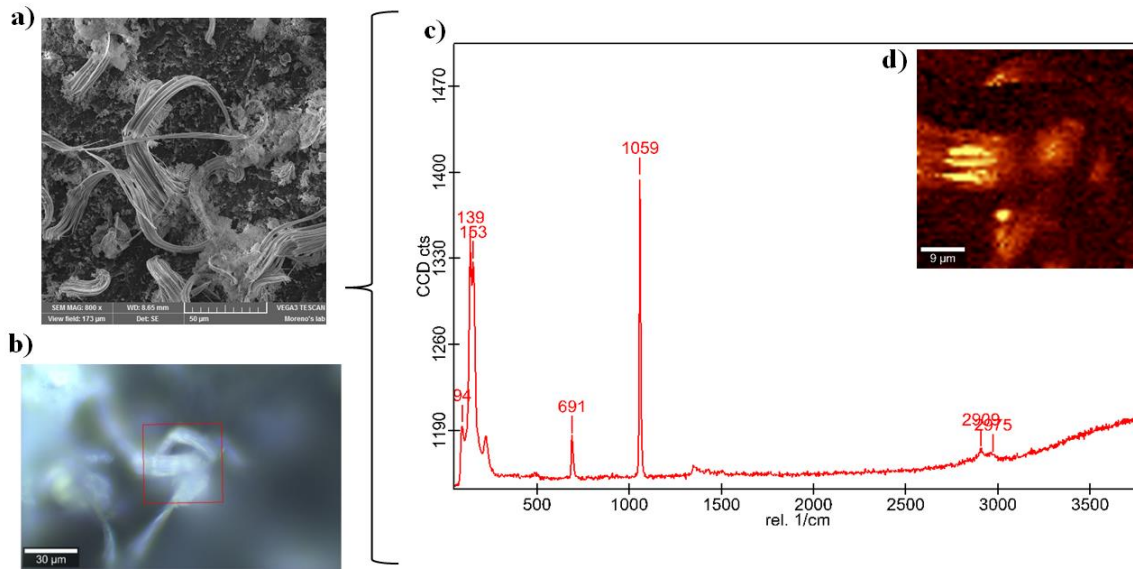


Figura 4. Caracterización por espectroscopia Raman de los biomorfos de bario sintetizados sobre mineral en condiciones que emulan el Precámbrico. a) Microfotografía de MEB; b) Microfotografía óptica; c) Espectro Raman; d) Imagen Raman.

Los resultados obtenidos con los biomorfos de silico-carbonato de bario en diferentes condiciones atmosféricas y sobre un mineral, permiten inferir que los minerales con alta concentración de sílice tuvieron un papel preponderante en el surgimiento de la vida en la Tierra, debido a que, por ejemplo, actualmente los cherts denominados como cherts del Precámbrico, son rocas ricas en sílice que se consideran que conservan los vestigios de vida más antiguos de nuestro planeta²⁰⁻²². Adicionalmente, el haber obtenido diferentes morfologías de los biomorfos en las cuatro condiciones de síntesis (Fig. 1), muestra la plasticidad que presentan los biomorfos al formar la estructura termodinámicamente más estable. Esta característica de los biomorfos es una de varias que ha sido propuesta por nuestro grupo de trabajo, que pudieron ser una de las primeras estructuras en donde se protegieron, alinearon, duplicaron y conservaron las protomoléculas que dieron lugar al organismo pionero^{9,10}. Por otra parte, la plasticidad de los biomorfos, permite inferir que en las eras geológicas tempranas de la Tierra, se logró que las morfologías de los organismos que en las eras subsecuentes fueron apareciendo, evolucionaron de acuerdo a las condiciones atmosféricas cambiantes, dando origen a las distintas formas de vida que conocemos actualmente.

Conclusión

El entendimiento del origen de la vida en la Tierra por medio de los biomorfos es un hallazgo que nos permite proponer el mecanismo por el cual posiblemente se llevó a cabo el surgimiento de la vida. En la era primitiva, se postula que existían minerales con alta concentración de sílice, los cuales interaccionaron con los elementos químicos y las condiciones atmosféricas, permitiendo la formación de estructuras inorgánicas, las cuales posteriormente fueron los primeros caparazones en donde se protegieron las protomoléculas o fueron los andamios de las formas de la vida. Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que los biomorfos al sintetizarse sobre un mineral, la morfología que adoptan es diferente en condiciones atmosféricas diferentes. Este hecho permite inferir que las morfologías de los organismos vivos como las conocemos actualmente no es un evento aislado o fortuito, sino que corresponden a las primeras morfologías que se formaron desde ese primer evento multifactorial que dio origen a la vida. Aún cuando los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten inferir algunos mecanismos, aún es necesario realizar una mayor investigación para la comprensión del origen de la vida en nuestro planeta.

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 CIIC 005/2024 apoyado por la Universidad de Guanajuato. Sandra

Ethelvina Coria Alcaraz, Juan Salvador Campa Rivera, Paola Cardona Tierrablanca, Alondra Paulina Jurado Ávila y Ariadna María Quezada Ibarra agradecen la beca otorgada por el Programa del XXIX Verano de la Ciencia 2024 de la Universidad de Guanajuato. Los autores agradecen al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM y a la Dra. Selene R. Islas por su invaluable soporte en el análisis de Raman.

Bibliografía/Referencias

1. Montalti, M., Zhang, G., Genovese, D., Morales, J., Kellermeier, M. y García-Ruiz, J.M. Local pH Oscillations Witness Autocatalytic Self-Organization of Biomimetic Nanostructures. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/NCOMMS14427.
2. Becker, S. et al. Wet-dry cycles enable the parallel origin of canonical and non-canonical nucleosides by continuous synthesis. *Nature Communications*, 2016, 7, 10421. DOI: 10.1038/ncomms10421.
3. Montalti, M., Zhang, G., Genovese, D., Morales, J., Kellermeier, M. & García-Ruiz, J.M. Local pH Oscillations Witness Autocatalytic Self-Organization of Biomimetic Nanostructures. *Nature Communications*, 2017. DOI: 10.1038/NCOMMS14427.
4. García-Ruiz, J.M., Nakouzi, E., Kotopoulou, E., Tamborrino, L. & Steinbock, O. Biomimetic mineral self-organization from silica-carbonate biomorphs. *Nature Reviews Chemistry*, 2017, 1, 0111. DOI: 10.1038/s41570-017-0111.
5. Zhang, G., Verdugo-Escamilla, C., Choquesillo-Lazarte, D. & García-Ruiz, J.M. Biomimetic mineral self-organization from silica-carbonate biomorphs. *Nature Communications*, 2018, 9, 3771. DOI: 10.1038/s41467-018-06187-7.
6. Zhang, G., Verdugo-Escamilla, C., Choquesillo-Lazarte, D. & García-Ruiz, J.M. Biomimetic mineral self-organization from silica-carbonate biomorphs. *Nature Communications*, 2018, 9, 3771. DOI: 10.1038/s41467-018-06187-7.
7. Lázaro, B. B. Halloysite and kaolinite: two clay minerals with geological and technological importance. *Rev. Acad. Cienc. Exactas Fis. Quim. Nat. Zaragoza*, **2015**, 70, 7-38.
8. Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. An introduction to rock-forming minerals. *London, Longman Group Ltd.*, New, **1975**, pp 528.
9. Cuéllar-Cruz, M. New insights on the origin of life: The role of silico-carbonates of Ba (II) to preserve DNA against highly intense UV radiation. *ACS Omega*. **2023**, 8(32), 29585–29594.
10. Cuéllar-Cruz, M.; Islas, S. R.; Ramírez-Ramírez, N.; Pedraza-Reyes M.; Moreno, A. 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*. **2022**, 7(42), 37410–37426.
11. Cuéllar-Arcos, J.C.; Islas, S. R.; Cuéllar-Cruz, M. Biomorphs possess mineral crystalline plasticity by adapting their morphology and chemical composition in the presence of organic biomolecules and inorganic ions. *ACS Earth Space Chem*. **2023**, 7(12), 2535–2547.
12. Cuéllar-Cruz, M.; Islas, S. R.; González, G.; Moreno, A. 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 Des.* **2019**, 19(8), 4667–4682.
13. Cuéllar-Cruz, M.; Moreno, A. The role of calcium and strontium as the most dominant elements during combinations of different alkaline Earth metals in the synthesis of crystalline silica-carbonate biomorphs. *Crystals*. **2019**, 9(8), 381.
14. Islas, S. R.; Cuéllar-Cruz, M. Silica-carbonate of Ba(II) and Fe²⁺/Fe³⁺ Complex as Study Models to Understand Prebiotic Chemistry. *ACS Omega*. **2021**, 6(51), 35629–35640.
15. Cuéllar-Cruz, M.; Ramírez-Cardona, M.; Islas, S.R., Moreno, A. Influence of different types of clay minerals on the shape and form of silica-carbonates (Biomorphs) of Ca(II), Ba(II), AND Sr(II). *ACS Earth Space Chem*. **2022**, 6(12), 3054–3065.
16. Sánchez-Puig, N.; Cuéllar-Cruz, M.; Islas, S. R.; Tapia-Vieyra, J. V.; Arreguín-Espinosa, R. A.; Moreno, A. The influence of silicateins on the shape and crystalline habit of silica carbonate biomorphs of alkaline Earth metals (Ca, Ba, Sr). *Crystals*. 2021, 11(4), 438.
17. Young, K.D. Bacterial morphology: why have different shapes?, *Curr. Opin. Microbiol.* 10, (2007) 596–600.
18. Lin, C. C.; Liu, L. G. High-pressure Raman spectroscopic study of post-aragonite phase transition in witherite (BaCO₃). *Eur. J. Mineral.* **1997**, 9(4), 785–792.
19. Templeton, W. L.; Brown, V. M. The Relationship between the concentrations of calcium, strontium and strontium-90 in wild brown trout, *Salmo-Trutta* L. and the concentrations of the stable elements in some waters of the United-Kingdom, and the implications in radiological health studies. *Air Water Pollut.* **1964**, 8, 49–75.
20. Schopf, J.W. Kudryavtsev, A.B. Agresti, D.G. Wdowiak, T.J. Czaja, A.D. Laser- Raman imagery of Earth's earliest fossils, *Nature*, 416, (2002) 73–76.

21. Schopf, J.W. Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life, *Science*, 260, (1993) 640–646.
22. Schopf, J.W. Packer, B.M. Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia. *Science*. 237, (1987) 70–73.