

# DIVERSAS HIPÓTESIS FORMULADAS

# El origen de la vida en la corteza terrestre

ULRICH SCHREIBER<sup>1</sup>  
CHRISTIAN MAYER<sup>2</sup>  
MARÍA J. DÁVILA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Geología, Universidad, Universität Duisburg-Essen, Universitätsstraße 5, 45141 Essen, Alemania. Emails: Ulrich.Schreiber@uni-due.de / Maria.Davila@uni-due.de

<sup>2</sup> Dpto. de Química-Física, Universität Duisburg-Essen, Universitätsstraße 5, 45141 Essen, Alemania.  
Email: Christian.Mayer@uni-due.de

La discusión sobre el origen de la vida se encuentra con dificultades cuando se trata de estimar las condiciones exactas de la Tierra primitiva y de definir entornos plausibles bajo los cuales se habrían desarrollado las primeras moléculas orgánicas complejas. Con el fin de determinar cuáles fueron las condiciones ideales que originaron la vida en nuestro planeta se han formulado diversas hipótesis (Schopf, 2002; Davies, 2003; Bada, 2004; Botta, 2004; Luisi 2006; Martín y Russel, 2007; Rauchfuss, 2008; Perez-Jimenez et al., 2011), a menudo ignorando el papel jugado por la corteza terrestre en este proceso.

Los primeros núcleos de la corteza continental parecen haberse desarrollado entre algunas decenas de millones de años después de la formación de la Tierra. Debido a las fuerzas de tensión, los protocontinentes fueron fracturados por fallas en una etapa temprana. Las fallas profundas, en contacto con el manto terrestre e interconectadas, pudieron actuar como posibles cavidades de diversas dimensiones, generando volúmenes totales de varios kilóme-

tros cúbicos, donde aparecerían las primeras moléculas prebióticas. En estas cavidades circulan agua con distintos grados de salinidad y gases en estados sub- y supercríticos. En ellas se podrían encontrar, en concentraciones variables, todas las materias primas necesarias esenciales para el desarrollo de moléculas prebióticas, como por ejemplo los fosfatos. Además, estas zonas combinarían variaciones periódicas de presión y temperatura, diversos valores de pH, superficies minerales metálicas y arcillosas, y otros catalizadores. Mientras las radiaciones cósmica y UV quedan excluidas del interior de la corteza terrestre, la radiación nuclear podría intervenir en la evolución química de las moléculas en estas zonas. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) juega un papel crucial en este proceso, ya

que a partir de aproximadamente 1 km de profundidad, estará sometido a condiciones de presión y temperatura por encima de su punto crítico ( $p_c = 74$  bar,  $T_c = 304$  K), dando lugar a la formación de un fluido supercrítico (scCO<sub>2</sub>). Un fluido supercrítico posee propiedades intermedias entre un líquido y un gas, presentando viscosidades inferiores y difusividades mayores a las de un líquido, pero manteniendo una excelente capacidad solvatante. Al ser scCO<sub>2</sub> un disolvente no polar, dentro de las fallas se originaría un sistema de dos fases formado por CO<sub>2</sub> supercrítico en agua líquida, que proporcionaría un entorno adecuado para las reacciones de condensación y polimerización de cianuro de hidrógeno, nucleobases, nucleótidos y aminoácidos. El flujo constante de agua y CO<sub>2</sub> permitiría

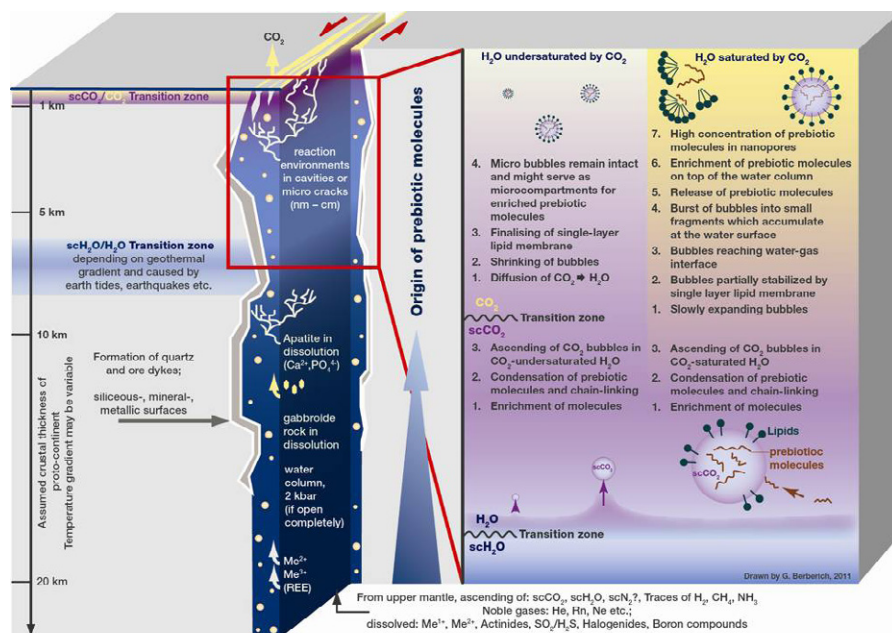


Fig. 1. Sección del perfil de la corteza terrestre en el que se muestra el proceso de enriquecimiento de las moléculas prebióticas.

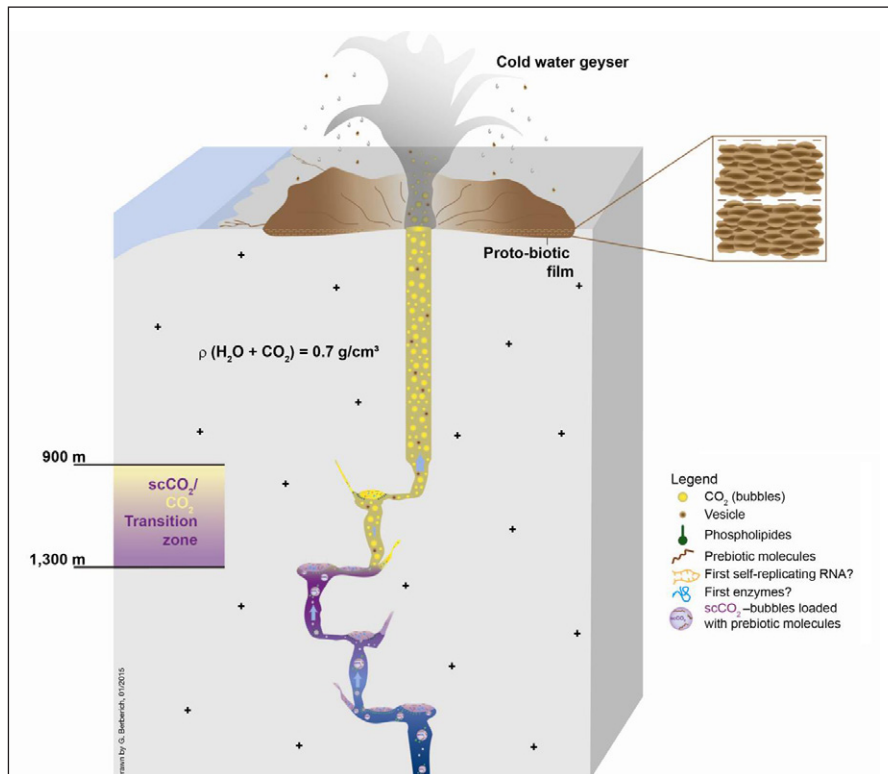


Fig. 2. Las moléculas prebióticas y las vesículas formadas en profundidad serían expulsadas en erupciones cíclicas, siendo depositadas sobre la superficie terrestre. Dependiendo del clima, se acumularían formando una película protobiótica, produciéndose posteriores reacciones influenciadas por la deshidratación parcial y la fuerte radiación UV.

un transporte eficiente de reactivos y productos, mientras que las numerosas cavidades en el interior de las fallas proporcionarían zonas de reacción aisladas. A profundidades comprendidas entre 1 y 7 km, tendrían lugar reacciones químicas orgánicas tanto en las fases de agua líquida y de fluido supercrítico, como en la interfase formada por ambas fases, facilitando la existencia de reacciones entre moléculas hidrofílicas e hidrofóbicas (Fig. 1). Dadas estas condiciones, las moléculas prebióticas podrían haber condensado formando moléculas de largas cadenas, a partir de las cuales podrían haberse generado las primeras estructuras celulares por evolución química (Schreiber et al., 2012).

La formación de compartimentos vesiculares podría producirse en las zonas de fallas tectónicas en presencia de agua y  $\text{CO}_2$ . A profundidades próximas a 1 km, las condiciones de presión y temperatura inducen la aparición de una transición de fase entre  $\text{scCO}_2$  y  $\text{CO}_2$  en estado gaseoso subcrítico ( $\text{gCO}_2$ ), perdiendo así su capacidad para actuar como disol-

vente. En esta región relativamente poco profunda, los compuestos orgánicos débilmente polares o anfífilicos precipitarán y formarán una variedad de partículas coloidales, actuando así como una zona de recogida de productos donde se produce un aumento de concentración de los mismos. Esta región límite superior, denominada zona de acumulación, se encuentra a temperaturas ligeramente superiores a las correspondientes al punto crítico de  $\text{CO}_2$ , en torno a 320 K, y una presión hidrostática de aproximadamente 100 bar. Williams et al. (2004) han demostrado que, en este punto, una ligera variación de presión puede conducir a una caída abrupta en las características de solubilidad del  $\text{CO}_2$ . En esta zona, las variaciones de presión pudieron ser causadas por los fuertes fenómenos de marea existentes en la Tierra primitiva o por una actividad local de tipo géiser (Fig. 2). Por lo tanto, se puede suponer que, a un nivel de profundidad cercano a 1 km, tiene lugar una transición de fase periódica entre  $\text{CO}_2$  supercrítico y subcrítico

o gaseoso. Bajo estos efectos, y en presencia de compuestos anfífilicos, se ha propuesto un proceso cíclico en la interfase de  $\text{CO}_2$  - agua que aparece descrito en la Fig. 3a. En una primera etapa, el  $\text{CO}_2$  es un fluido supercrítico y forma un sistema bifásico con el agua líquida. Todos los constituyentes orgánicos que ya se han acumulado en este entorno se distribuyen entre las dos fases de acuerdo con su polaridad individual. La región de la interfase estará poblada por componentes anfífilicos. La fase  $\text{scCO}_2$  contendrá moléculas menos polares y anfífilicas en una mayor concentración (Etapa 2). Al mismo tiempo se satura con agua. Basándonos en datos teóricos y experimentales, el contenido de agua en la fase de  $\text{CO}_2$  se puede estimar en alrededor del 1% en las condiciones dadas (dos Ramos et al., 2007). Como se ha indicado anteriormente, al disminuir ligeramente la presión por influencia de las mareas terrestres o fenómenos géiser, la transición  $\text{scCO}_2 \rightarrow \text{gCO}_2$  produciría una reducción drástica del parámetro de solubilidad, induciendo la precipitación del agua disuelta en el  $\text{CO}_2$  en forma de pequeñas gotas de agua, cubiertas por una monocapa de compuestos anfífilicos denominada micelas inversa (Etapa 3). Además, el coeficiente de partición para los constituyentes orgánicos disueltos se reajustaría a favor de la fase acuosa, provocando que la mayor parte de los componentes menos polares y anfífilicos se trasladen al interior de las gotas de agua o se adhieran a sus superficies, respectivamente. Este proceso estará acompañado por un incremento significativo de la concentración. Al interactuar las micelas con la interfase por efecto de la gravedad, pasarían al interior de la fase acuosa, cubierta a su vez por una capa de sustancias anfífilicas, creando una doble capa semejante a las membranas biológicas (Dobson et al., 2000). Las vesículas resultantes se dispersarían en la fase acuosa. Al ser mayor la concentración de los constituyentes orgánicos dentro de las vesículas que en la fase acuosa exterior, aparecería un gradiente de concentración a través de

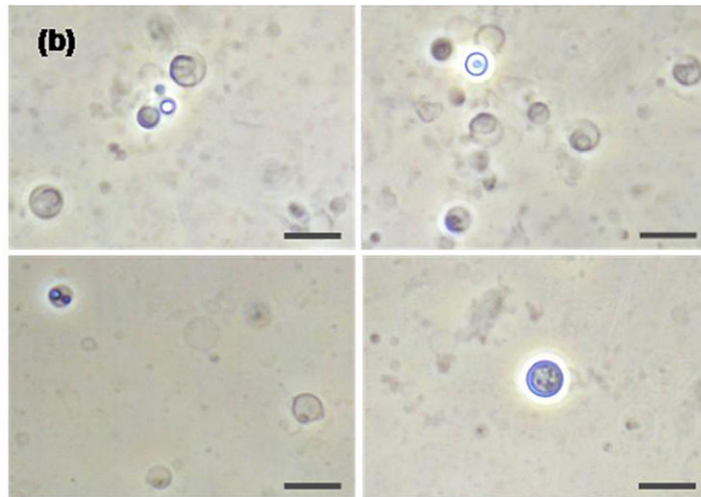
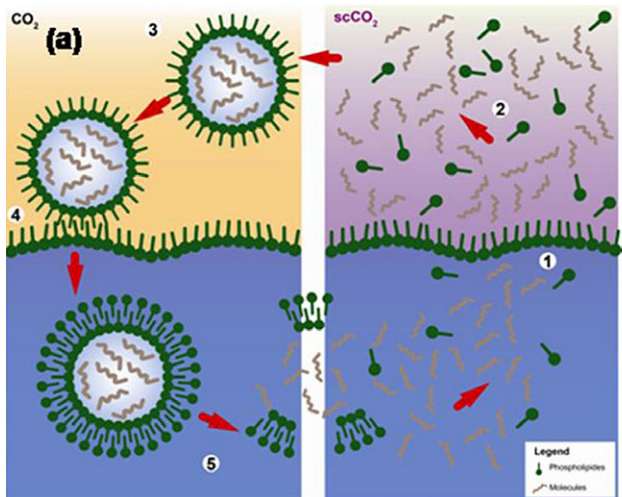


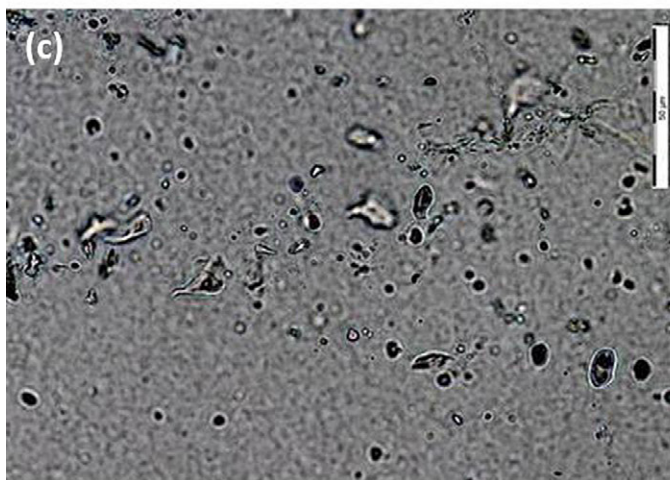
Fig. 3. (a) Representación esquemática del proceso de formación vesicular en un ambiente formado por agua líquida y CO<sub>2</sub> sub- y supercrítico; (b) microfotografías ópticas de las estructuras vesiculares formadas durante el proceso experimental descrito (Escala: 5mm).

la membrana creada (Etapa 4). Las vesículas son termodinámicamente inestables, por lo que se desintegrarían nuevamente y liberarían su contenido orgánico en la fase acuosa a lo largo del tiempo (Etapa 5). Un nuevo aumento de presión generaría una transición gCO<sub>2</sub> → scCO<sub>2</sub>, los

componentes orgánicos y el agua se disolverían en la fase de CO<sub>2</sub>, y el proceso cíclico comenzaría de nuevo (Mayer et al., 2015).

Esto conduciría a un proceso continuo y repetitivo de compartimentación y mezcla de los componentes orgánicos solubles en agua. Los compartimentos probablemente tendrían tiempos de vida media comprendidos entre minutos y días,

Fig. 4. (a) Conglomerado (Jack Hills) y (b) bloques de cuarzo hidrotermal (próximo a Murchison) datados entre 2.7 y 3 mil millones de años; (c) inclusiones fluidas en cristales de cuarzo recolectados en Australia Occidental que contienen una gran colección de sustancias orgánicas.



los cuales permitirían reacciones en condiciones variables. El estado transitorio de la encapsulación es especialmente interesante, ya que existen indicios experimentales en los que las vesículas facilitan la formación de oligopéptidos así como su inmovilización selectiva (Tsukahara et al., 2002; Furuuchi et al., 2005; Luisi et al., 1999). El proceso descrito de formación de vesículas también puede resolver el problema de la concentración (que básicamente consiste en la dilución constante de compuestos orgánicos): mientras que un aumento de la concentración de moléculas prebióticas, formadas a mayores profundidades en procesos hidrotermales, se podría esperar en la zona de acumulación, el proceso de formación de gotitas conduciría a una mayor acumulación de moléculas prebióticas, debido a la baja solubilidad de compuestos orgánicos en CO<sub>2</sub>(g) (Williams et al., 2004), lo cual permitiría una evolución molecular paralela en numerosos compartimentos independientes. Tomando

como base este modelo, en la Universidad Duisburg-Essen se han realizado una serie de experimentos en condiciones de alta presión con el objetivo de reproducir los procesos mencionados anteriormente y lograr una mayor comprensión del mecanismo de formación vesicular propuesto (Fig. 3b).

Según el modelo descrito anteriormente, las moléculas orgánicas prebióticas podrían haber sido formadas en las zonas de falla de los primeros cratones arcaicos bajo condiciones que permitieran reacciones similares a la síntesis de Fischer-Tropsch. Estas fallas son a menudo documentadas por mineralización hidrotermal en venas de cuarzo. Durante el crecimiento de estos cuarzos, los fluidos de las secciones de la corteza quedan atrapados conservando la composición química del medio fluido (Fig. 4c). Por esta razón, se realizó un estudio de las venas de cuarzo hidrotermal del cratón arcaico Yilgarn, de venas de cuarzo generadas por impacto en el cráter Shoemaker y de fragmentos de cuar-

zo hidrotermal en conglomerados próximos a Murchison (Australia Occidental) datados entre 2.7 y 3 mil millones de años (Fig. 4a y 4b).

Los análisis de las antiguas inclusiones fluidas ofrecen una comprensión más detallada de los procesos de síntesis que se han producido en el ascenso de los fluidos dentro de las zonas de falla y que puede haber dado lugar a la formación de las primeras moléculas orgánicas prebióticas. Tras analizar uno de los fragmentos de cuarzo hidrotermal, los resultados revelaron la existencia de un amplio espectro de compuestos orgánicos tales como bromometano, butano, benceno y tolueno. Aunque desconocemos el intervalo de tiempo comprendido entre la formación del cuarzo, su erosión y su sedimentación, la muestra de cuarzo analizada se podría haber formado en una vena hidrotermal mucho antes de que ninguna célula viva existiera en la Tierra. Si así fuera, estos resultados mostrarían el primer indicio de la química orgánica prebiótica. ●

### Bibliografía

- Bada, J.L. (2004). How life began on Earth: a status report. *Earth Planet Sci. Lett.*, 226,1–15.
- Botta, O. (2004). The chemistry of the origin of life. *Astrophys. Space Sci. Libr.*, 305,359–392.
- Davies, P. (2003). *The origin of life*. The Penguin Press, London.
- Dobson, C.M., Allison B.G., Tuck A.F. y Vaida V. (2000). Atmospheric aerosols as prebiotic chemical reactors. *PNAS*, 97, 11864-11868.
- dos Ramos, M.C., Blas F.J. y Galindo A. (2007). Phase equilibria, excess properties, and Henry's constants of the water + carbon dioxide binary mixture. *J. Phys. Chem. C.*, 111, 15924-15934.
- Furuuchi, R., Imai, E.I., Honda, H., Hatori, K. y Matsuno K. (2005). Evolving lipid vesicles in prebiotic hydrothermal environments. *Orig. Life Evol. Biosph.*, 35, 333-343.
- Luisi, P.L., Walde, P. y Oberholzer T. (1999). Lipid vesicles as possible intermediates in the origin of life. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 4, 33-39.
- Luisi, P.L. (2006). *The emergence of life: from chemical origins to synthetic biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Martin, W., Baross, J., Kelley, D. y Russel M.J. (2008). Hydrothermal vents and the origin of life. *Nat. Rev. Microbiol.* 6, 805–814.
- Mayer, C., Schreiber, U. y Dávila, M.J. (en prensa). Periodic Vesicle Formation in Tectonic Fault Zones—an Ideal Scenario for Molecular Evolution. DOI: 10.1007/s11084-015-9411-z.
- Perez-Jimenez, R., Inglés-Prieto, A., Zhao, Z., Sanchez-Romero, I., Alegre-Cebollada, J., Kosuri, P., Garcia-Manyes, S., Kap-pock, T.J., Tanokura, M., Holmgren, A., Sanchez-Ruiz, J.M., Gaucher, E.A. y Fernandez, J.M. (2011) Single-molecule paleoenzymology probes the chemistry of resurrected enzymes. *Nat. Struct. Mol. Bio.*, 18, 592–596.
- Rauchfuss, H. (2008). *Chemical evolution and the origin of life*. Springer, Heidelberg.
- Schopf, J.W. (2002). *Life's origin*. University of California Press, Los Angeles.
- Schreiber, U., Locker-Grütjen, Mayer, C. (2012). Hypothesis: Origin of Life in Deep-Reaching Tectonic Faults. *Orig. Life Evol. Biosph.*, 42, 47–54.
- Tsukahara, H., Imai, E.I., Honda, H., Hatori, K. y Matsuno, K. (2002). Prebiotic oligomerization on or inside lipid vesicles in hydrothermal environments. *Orig Life Evol Biosph*, 32, 13-21.
- Williams, L.L., Rubin, J.B. y Edwards, H.W. (2004). Calculation of Hansen solubility parameter values for a range of pressure and temperature conditions, including the supercritical fluid region. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 4967-4972.