

## Minerales, vida y evolución

### *Minerals, life and evolution*

**CRISTÓBAL VIEDMA Y BELÉN SOUTULLO**

*Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad Complutense de Madrid. E-mail: viedma@ucm.es*

**Resumen** El carácter interdisciplinario que exige la investigación sobre el Origen de la Vida hace que este sea un punto de encuentro de casi todas las ciencias. Esto es así también para la Cristalografía y Mineralogía, ya que el estudio de muchos problemas relevantes requiere la comprensión de la estructura cristalina. Por ejemplo, las más modernas teorías del origen de la vida tienen como nexo común la necesidad de los minerales en los procesos prebióticos. En el presente artículo se describen algunos de los problemas relacionados con el origen de la vida que conciernen a la cristalografía-mineralogía. Una especial atención se dedica al fascinante enigma del origen de la bioquiralidad: ¿por qué las principales moléculas asociadas a la vida son solo de “mano izquierda” o “derecha”, esto es, quirales? En este sentido, algunas de las hipótesis más atractivas están ligadas a efectos generados en superficies minerales o a procesos vinculados al crecimiento cristalino.

**Palabras clave:** Crecimiento cristalino, enantiómero, minerales, origen de la vida, quiralidad, resolución.

**Abstract** *The origin of life is a complex scientific problem which requires a convergent approach from different branches of science, among them chemistry, biology, and the earth sciences. Regarding the latter, mineralogy and crystallography are of particular importance concerning this issue. The crystallographic approach helps us to elucidate the inner structure of both the inorganic and organic compounds that may have been involved in prebiotic processes. On the other hand, since several hypotheses for the origin of life involve the presence of minerals, the mineralogical approach is also of particular importance. This paper offers a review of the most outstanding ideas linking minerals to the prebiotic processes that led to the emergence of life on Earth. A whole section of this work is also devoted to the outstanding issue of chirality: why the molecules of life are either left-, or right-handed only? The paper finally reviews some of the most recent ideas relating chirality and crystal growth, and the role of mineral surfaces.*

**Keywords:** *Chirality, crystal growth, enantiomer, minerals, origin of life, resolution.*

## INTRODUCCIÓN

El planeta Marte tiene unas 300 especies minerales, el planeta Venus parece que también. Sin embargo, nuestro planeta Tierra posee un catálogo de más de 5000 y cada año aumenta su número con nuevos descubrimientos. ¿Por qué esta gran diferencia en la diversidad mineral entre Marte, Venus y la Tierra? Una de las principales razones consiste en que sobre la Tierra se desarrolla el fenómeno más extraordinario del universo: la Vida. La Tierra es un planeta vivo. Probablemente, dos terceras partes del inventario mineral terrestre no existiría en una Tierra sin vida; la génesis de gran parte de esos minerales depende de procesos fisicoquímicos ligados a la vida.

Empezamos a comprender la estrecha relación entre la vida y los minerales. La vida parece ser una fuerza impulsora de la evolución mineral en la

Tierra, pero... ¿podrían las rocas y los minerales que las componen mostrarnos alguna de las claves del origen de la vida? Los minerales parecen facilitar algunos de los procesos que dieron lugar a la biogénesis. Incluso uno de ellos pudo ser, literalmente, la chispa que encendió la vida en nuestro planeta. A partir de entonces, la Geosfera y la Biosfera han evolucionado conjuntamente durante la historia planetaria dando lugar tanto a la diversidad biológica como a la mineral.

La evolución biológica comenzó hace más de 3800 millones de años y se inició con moléculas de carbono que se organizan y proliferan, llegando a adquirir la complejidad suficiente para formar la primera célula con las propiedades de la vida. La evolución mineral comenzó mucho antes. A partir del “Big Bang” el Universo progresó desde un estado de pura energía a un cosmos constituido casi en su totalidad por átomos de hidrógeno. La gravedad



Fig. 1. El carbono se forma en el seno de las supernovas y es el primer elemento susceptible de formar un mineral a alta presión y temperatura: el diamante, que sería el primer mineral del universo. Se especula con la existencia de planetas constituidos solo de carbono: gigantescos diamantes vagando por el espacio.

amalgamó este gas, primero en nebulosas y después en estrellas capaces de fabricar los primeros elementos de la Tabla Periódica. Surgían así los ingredientes de la vida y los que dominarían la composición de los planetas rocosos. La explosión de las supernovas sembraría el espacio con ellos (Hazen y Ferry, 2010).

En las zonas del polvo interestelar con una temperatura y presión en descenso, el primer elemento susceptible de cristalizar es el carbono que se ordena dando lugar al primer mineral del universo: el diamante. Le seguirían el grafito, carburos, nitruros, óxidos y silicatos de magnesio. Durante millones de años, unos doce cristales diferentes fueron los únicos minerales del universo.

Durante la formación del sistema solar y los primeros estadios de la formación de la Tierra se crean unos 250 nuevos minerales que se convierten en miles a través de la combinación de nuevos procesos geológicos y físico- químicos en los que intervendría la vida. Los minerales en la Tierra han cambiado a través del tiempo. Han cambiado en cuanto a la diversidad de especies minerales, en cuanto a la abundancia relativa de esos minerales y su distribución en el planeta.

## CRISTALES Y MINERALES

El carbono puede presentarse formando sólidos diferentes, por ejemplo, un trozo de carbón o un dia-

mante. Ambos cuerpos están formados por el mismo elemento, pero en el diamante los átomos de carbono están ordenados en el espacio constituyendo un cristal. Sin embargo, el carbón, constituido también por carbono, no presenta orden interno alguno, su estado es amorfo. Los minerales son cristales que se han formado en la naturaleza. Como cristales presentan un alto orden tridimensional de largo alcance y una composición química definida (aunque a veces no fija). Este ordenamiento atómico o “estructura”, es la causa de muchas de las propiedades exclusivas que presenta un mineral.

La materia de composición química determinada se presenta con una estructura característica, pero a veces tiene la capacidad de ordenarse de forma diferente dependiendo de las condiciones de cristalización. Un ejemplo de esta conducta la tenemos de nuevo con el carbono. El mineral diamante está formado por carbono, pero el mineral grafito también. Químicamente ambos minerales son iguales pero el orden interno de sus átomos, su estructura, no es la misma y esto genera unas propiedades físicas muy diferentes y una forma externa característica. Es decir, los átomos de carbono pueden organizarse como diamante o grafito dependiendo de las condiciones termodinámicas en su formación. Este fenómeno se llama “polimorfismo”.

## RODEADOS DE CRISTALES

Los minerales han estado presentes en la historia de la humanidad. De hecho, las diferentes épocas históricas de nuestra especie llevan el nombre de los minerales que utilizaban, Edad de Piedra, Edad del Bronce, Edad del Hierro... ¿Edad del Silicio? Siempre hemos aprovechado las propiedades de los cristales en nuestra tecnología por primitiva que esta fuera. La mayor parte de la materia sólida que nos rodea son cristales. Desde las montañas hasta las paredes o el suelo de nuestra habitación.

Pero lo que es más sorprendente, los cristales están también dentro de nosotros. Nuestros huesos están formados por fosfato cálcico cristalizado, un mineral llamado apatito, que nos confiere un armazón estructural muy eficiente. Nuestros dientes también usan estos mismos cristales con gran eficacia para la masticación. Hay otras propiedades mucho más sofisticadas como las que poseen los cristales del aragonito, compuesto de carbonato cálcico, que ubicados en el oído nos permite saber lo que es



Fig. 2. La vida y sus procesos está detrás de la formación de muchos minerales. Algunos son generados por oxidación y meteorización, incluidos minerales de hierro, cobre y otros metales (izquierda). Las conchas y esqueletos generan depósitos de minerales como la calcita en los océanos (derecha).

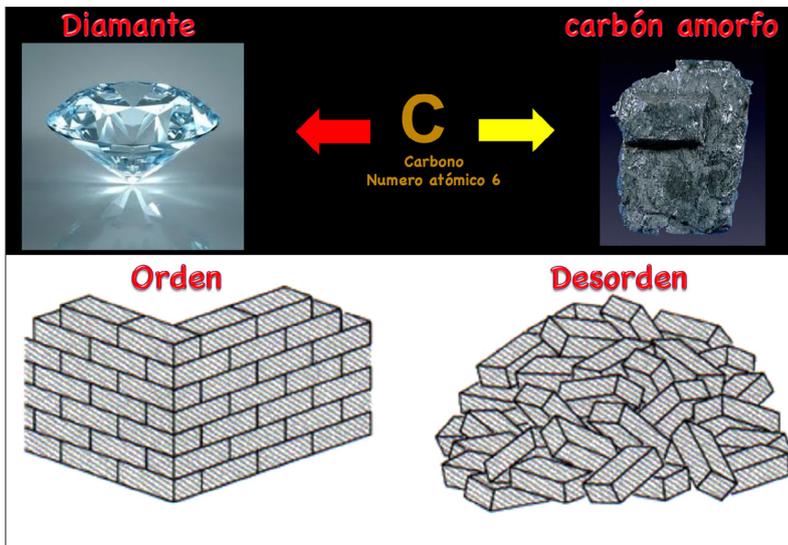


Fig 3. El Cristal es un sólido ordenado con una composición química definida. Los cristales de origen natural constituyen los minerales.

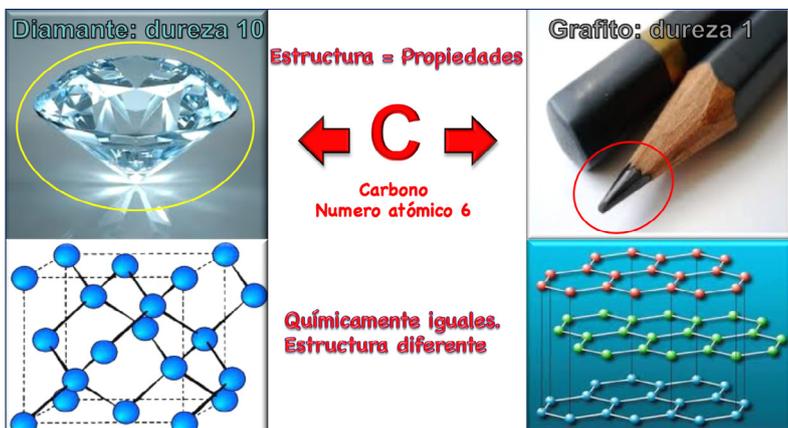
arriba y lo que es abajo. Se llaman “otolitos” y nos mantienen en pie gracias a sus propiedades mecánicas receptoras.

Los huevos de los animales están formados por un complejo entramado textural de cristales de calcita, otro polimorfo del carbonato cálcico, como el aragonito. Los huevos son eficientes contenedores de proteínas y ofrecen una perfecta protección antibacteriana al tiempo que permiten respirar a los embriones. También las partes duras de los animales marinos, como las conchas, están formados por cristales de calcita o aragonito. La magnetita que orienta a aves y tortugas es otro ejemplo. La vida fabrica y emplea cristales para muchas de sus funciones, son los llamados “biominerales”.

Desde el origen de nuestra especie, los minerales han fascinado a los humanos por su aspecto poliédrico; líneas rectas, ángulos definidos y caras brillantes destacando en un mundo dominado por las curvas. Siempre despertaron sentimientos de armonía y belleza. Diamantes, esmeraldas, rubíes, topacios, oro, plata, perlas, son nombres de minerales que desde tiempo inmemorial se usan como elementos decorativos, amuletos y joyas.

La tecnología más moderna tiene como base las propiedades de muchos minerales. En un principio, el suministro que proporcionaba la Naturaleza de estos cristales era suficiente para las necesidades industriales. Pero pronto se impuso la fabricación industrial de cristales con características concretas

Fig. 4. Las propiedades de los cristales, de los minerales, dependen de su estructura que se refleja en su morfología externa y en las propiedades físicas que presentan.



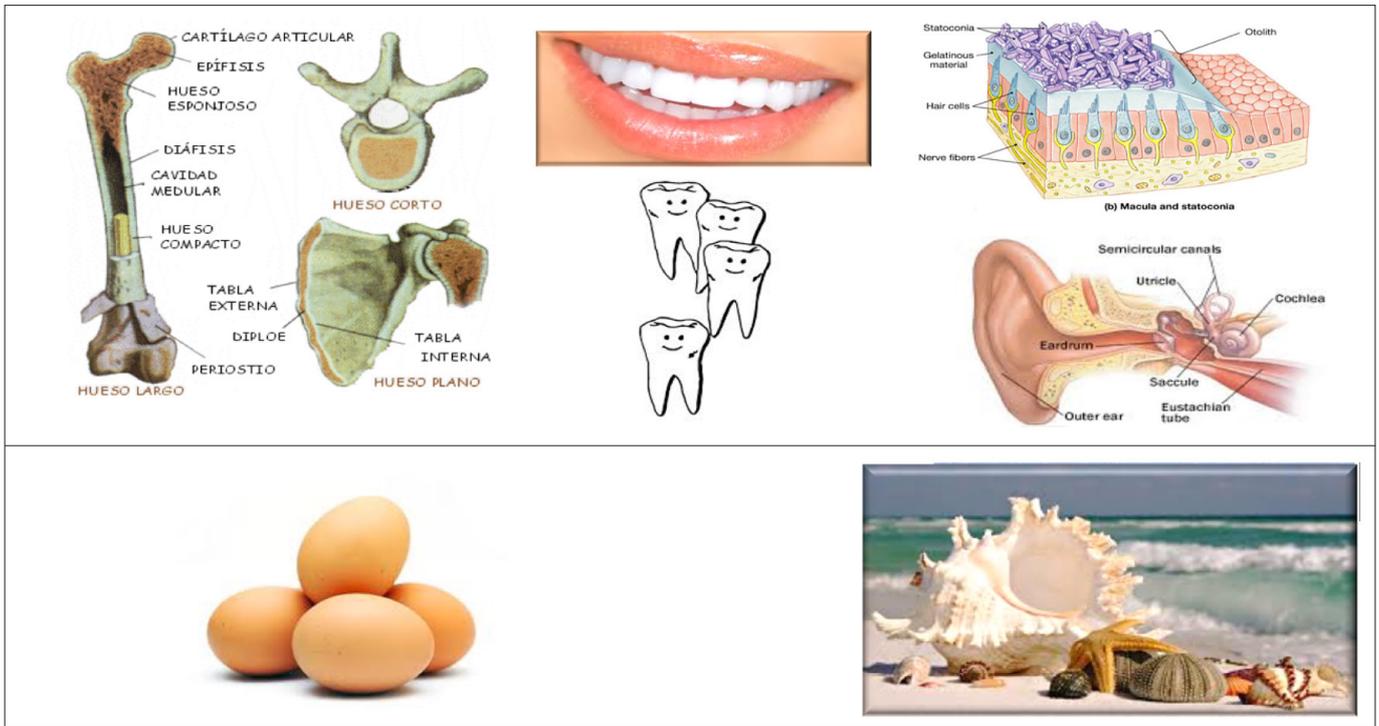
y cantidades suficientes para abastecer una demanda cada vez más sofisticada y voluminosa. El cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) es uno de los minerales más abundantes que ha viajado en el tiempo ofreciendo sus propiedades para diferentes usos. Quizás el más conocido sea su empleo para medir el tiempo: los llamados “relojes de cuarzo”. Esta medida está basada en el hecho de que la estructura del cuarzo, en ciertas condiciones, vibra 33.000 veces por segundo cuando es activada eléctricamente. Los cristales de silicio proporcionan energía solar fotovoltaica, es decir, convierten la luz en electricidad. Pero su uso más sofisticado y cotidiano consiste en que son la base para la fabricación de los micro-chips de los circuitos electrónicos integrados de nuestros ordenadores y teléfonos. La actividad informática está soportada en estos cristales. Un último ejemplo de cristales al servicio del desarrollo científico-técnico lo proporcionan ciertos cristales de óxidos como el rubí, por su propiedad de generar el Rayo Láser que es usado ampliamente en la industria o en la medicina quirúrgica más sofisticada. Hoy más que nunca los cristales están omnipresentes en la vida cotidiana y los encontramos por ejemplo, tanto en las aspirinas como en los auriculares que utilizamos.

## LOS MINERALES Y EL ORIGEN DE LA VIDA

No hay duda de que el origen de la vida fue un fenómeno químico. Con los ingredientes de la atmósfera, los océanos y las rocas de hace más de 3.800 millones de años, se construyeron los primeros seres vivos. Podemos decir que la vida surgió como resultado de la geoquímica del Arcaico. El primero en plantear un escenario plausible para el origen de la vida fue Charles Darwin. Su modelo fue la de “*a warm little pond*”, una pequeña charca caliente o sopa primigenia donde se formarían los compuestos orgánicos prebióticos que evolucionaron hacia la vida. El modelo de la sopa primigenia presenta problemas difíciles de resolver. Es muy difícil formar grandes polímeros de carbono en esta solución, es necesario concentrar las moléculas que van a producir la reacción y esto es complicado de conseguir en un sistema abierto de extrema dilución, especialmente sin agentes catalizadores. Por otra parte, la superficie de la Tierra Arcaica estuvo muy expuesta a la radiación ultravioleta y a violentas tormentas eléctricas, que habrían destruido fácilmente los enlaces de las cadenas de carbono.

Ahora conocemos diferentes ambientes donde se generan moléculas orgánicas, desde las fumarolas de los fondos oceánicos hasta en el espacio interestelar. El problema más acuciante es buscar los nichos idóneos donde estas moléculas interactúen entre ellas creando las estructuras con la complejidad suficiente para almacenar información, mutar, auto-replicarse y en definitiva evolucionar.

Los modelos más recientes sobre la síntesis y el ensamble de compuestos orgánicos tienen un nuevo agente: los minerales. La idea de que los minerales han jugado un papel importante en el origen de la vida fue propuesta por primera vez por el cristalógrafo inglés Bernal en 1951 (Bernal, 1951). La idea es



potente, la superficie de la mayoría de los minerales que forman las rocas tiene propiedades fascinantes que son las indicadas para obviar los problemas planteados.

En las superficies erosionadas de los feldspatos y otros minerales se producen numerosos huecos microscópicos. En ellos las moléculas prebióticas podrían haberse preservado de las radiaciones letales y haber comenzado procesos de auto-organización.

Por otra parte, la superficie de muchos minerales tiende a concentrar y estabilizar moléculas orgánicas tan importantes como aminoácidos, azúcares y otras especies moleculares. Las arcillas y las zeolitas, por ejemplo, pueden atrapar estas moléculas en su estructura favoreciendo la concentración y la interacción necesaria para formar moléculas orgánicas cada vez más complejas.

Al mismo tiempo, algunas superficies minerales tienen capacidad catalítica y pueden promover las reacciones necesarias para el origen de la vida. La

magnetita, un mineral de óxido de hierro, pudo ser el catalizador de ellas en un mundo sin enzimas. Para las reacciones biológicas el nitrógeno debe hallarse en forma amoniacal y en la Tierra Arcaica el único compuesto de nitrógeno disponible era el molecular. Se ha comprobado que, a las presiones y temperaturas propias de una chimenea volcánica del suelo oceánico, la magnetita cataliza la síntesis de amoníaco a partir del hidrógeno y el nitrógeno disponibles. Otros grupos de investigación han demostrado que la montmorillonita es capaz de catalizar la formación de los mononucleótidos, elementos fundamentales del ADN y ARN.

Si la “sopa” es un buen modelo culinario para el “warm little pond” darwiniano, no cabe duda de que la condensación sobre la superficie de un mineral tiene su modelo en los “crepes”. Hoy en día existe la convicción generalizada de que los primeros polímeros de la vida fueron más fácilmente horneados en “crepes prebióticos” que cocinados en una “sopa primigenia”.

Fig. 5. Los cristales están dentro de tí. Los huesos y los dientes están formados por cristales de apatito. En el oído interno los otolitos (cristales de aragonito) nos indican la dirección de la gravedad (arriba). La cáscara de huevo y las conchas de los animales marinos son también ejemplos del uso de los cristales por la vida (abajo).



Fig. 6. Los cristales de cuarzo siempre presentes en la medición del tiempo. Los cristales de Silicio son la base de nuestra tecnología, paneles solares, microchip de ordenadores o teléfonos (arriba). Los cristales generadores del rayo láser se usan en cirugía de precisión. Los cristales superconductores son el futuro de nuevas tecnologías (abajo).

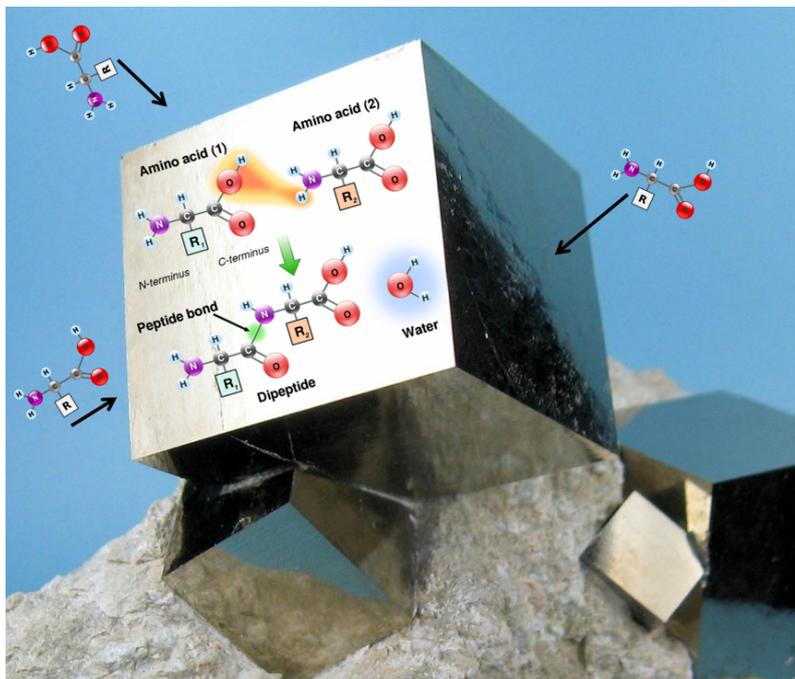


Fig. 7. La superficie de la pirita presenta propiedades favorecedoras para la acumulación y síntesis de moléculas orgánicas.

### La pirita en el origen de la vida

Para Günter Wächtershäuser (Wächtershäuser, 1988) la vida comenzó con la pirita. La idea fue propuesta a finales de los 80. La pirita, un mineral compuesto de hierro y azufre es el mineral candidato que facilitó el origen de la vida. Este autor sugiere que los sulfuros de hierro y níquel que abundan en las fumarolas hidrotermales de las profundidades marinas fueron los refugios, los catalizadores y las fuentes de energía que permitieron la formación de las moléculas biológicas.

Según esta teoría la superficie de la pirita es el lugar donde se producen los primeros estadios de formación de los polímeros necesarios en la química prebiótica. La superficie de la pirita presenta una ligera carga residual positiva que favorece el agrupamiento de moléculas con carga negativa como los carbonatos, sulfatos, fosfatos u otros radicales orgánicos. Se formaría una película superficial de moléculas que podrían reorganizarse formando largas cadenas orgánicas en evolución hacia un mundo claramente biótico. Según sus ensayos, ciclos autocatalíticos promoverían la producción de moléculas biológicas cada vez más complejas durante el propio proceso de formación de la pirita. ¿Pudo la pirita ser la chispa que encendió la vida?

Parece que los minerales no sólo facilitaron la formación de las moléculas orgánicas, sino que pasaron incluso a ser parte de la vida misma (Hazen, 2001). A lo largo de numerosos experimentos de síntesis orgánica hidrotermal se ha descubierto un comportamiento muy complejo y activo de los minerales. No sólo son refugios o plataformas donde pueden ensamblarse las moléculas orgánicas. En presencia de agua caliente a alta presión, los minerales de sulfuro de hierro empiezan a disolverse y los átomos liberados pudieron convertirse en reactivos esenciales del caldo primigenio. Estas conclusiones se refuerzan con el hecho de que algunas enzimas metabólicas, como la aconitasa, tengan en su núcleo un conjunto de átomos metálicos y de azufre.

### Las arcillas como “minerales vivos”

Pero si hay un científico para el que los minerales tienen un papel relevante en el origen de la vida, este es A. G. Cairns-Smith (Cairns-Smith 1985). Para este autor la emergencia de la vida no solo fue promovida por los minerales, sino que la primera forma de vida, el primer “organismo vivo” fue un mineral y los primeros genes fueron cristalinos.

Los primeros genes debían ser pequeños y simples, de un material corriente en las condiciones geoquímicas, y unidos mediante enlaces fuertes al tiempo que reversibles. Estas condiciones las reúnen los cristales. Estos cristales-genes no pueden ser como los cristales de cuarzo o un diamante, con una estructura rígida que repiten siempre el mismo mensaje, sino cristales con grandes defectos en su orden interno que pueden ser transmitidos a sus descendientes. La información genética está unida a estos defectos estructurales y varía conforme evoluciona en el tiempo: información es igual a error.

Surge pues la gran pregunta... ¿qué cristales cumplen todas estas características de cristal-gen ideal, y que fueran muy abundantes en la Tierra? La respuesta es sencilla: las arcillas. A escala global, toda la Tierra es una gran maquinaria cristalizadora de arcillas en un continuo proceso de transformación y recristalización.

Para Cairns-Smith los procesos de formación de los cristales de arcilla presentan similitudes con la formación de proteínas o DNA. Una característica relevante de las arcillas es que presentan muchos defectos en sus estructuras que evolucionan y pueden ser transmitidos a sucesivas generaciones de cristales. Por ejemplo: las capas silicatadas de las arcillas tienen cargas residuales negativas compensadas por iones interlaminares positivos que varían en número y naturaleza. Un mecanismo de crecimiento de las arcillas esmectíticas consiste en el intercrecimiento de láminas entre las ya existentes. En este proceso, las características de las capas albergadoras son copiadas y la densidad iónica o la naturaleza de su carga es “heredada” por la nueva capa “hija”. Esta copia suele tener errores o “mutaciones” que se repiten durante sucesivas generaciones por lo que puede ser visto como un modelo de transmisión genética primaria. Otro ejemplo lo ofrece la caolinita vermiforme que forma cristales columnares que crecen y se parten fácilmente. En el proceso de crecimiento, el mosaico de orientaciones característico que presenta la capa de cada cristal de caolinita, es copiado por la capa que crece sobre ella. La rotura de este cristal en un momento dado, genera cristallitos que guardan la “información” recibida de su capa “madre”. Al repetirse el ciclo esta “información” es a su vez transmitida a sucesivas generaciones.

Con el transcurso del tiempo, estos primeros genes-minerales fueron reemplazados por materiales más sofisticados y más maleables para adecuarse a las sutiles propiedades y gran complejidad que exige la evolución y adquirieron la composición orgánica que constituye la vida tal como la conocemos hoy. “Creo que es muy posible que los primeros organismos estén realmente alrededor de nosotros” concluye Cairns-Smith (1985), en clara alusión a las omnipresentes arcillas.

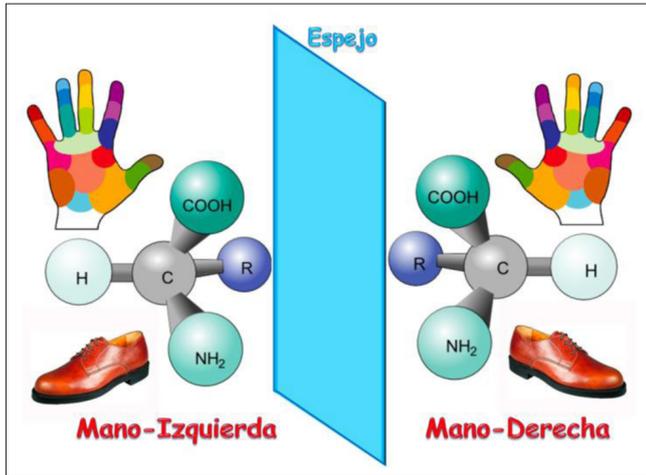


Fig. 8. Objetos quirales con su imagen en el espejo (enantiómeros). No son superponibles.

## EL ORIGEN DE LA BIOQUIRALIDAD Y LOS MINERALES.

Decimos que un objeto, un cristal o una molécula es quiral cuando su imagen en el espejo no es superponible al objeto, cristal o molécula original, como nuestras dos manos o nuestros dos pies, que siendo iguales no son superponibles. Un guante derecho no puede ponerse en una mano izquierda o un zapato izquierdo en un pie derecho. Requieren la mano y el pie adecuado. Del mismo modo las moléculas quirales se presentan en pares llamados enantiómeros con las mismas propiedades químicas y físicas pero que interactúan de forma diferente entre ellas o con otras moléculas quirales. A esos dos enantiómeros les llamamos *de mano izquierda* o *de mano derecha* por el ejemplo de nuestras manos, el más sencillo de visualizar.

La síntesis de moléculas quirales en el laboratorio, o la formación de minerales quirales en la Naturaleza, generan la misma cantidad de moléculas o cristales quirales de mano izquierda que de mano derecha. Su generación es aleatoria, energéticamente equivalente; es como lanzar una moneda al aire que a veces sale cara y otras veces cruz con una proporción cercana al 50%. Es decir, obtendremos en la síntesis o cristalización una mezcla "racémica" de enantiómeros, la mitad de una mano y la otra mitad de la otra.

Uno de los problemas más fascinantes relacionado con el origen de la vida es el hecho de que las moléculas biológicas más importantes que construyen los organismos vivos son quirales y de una sola mano. Los aminoácidos que forman las proteínas son de mano izquierda y los azúcares del ARN o ADN son de derecha. Este hecho es llamado bioquiralidad y tiene gran importancia porque nos convierte a nosotros, seres vivos, en entes homocirales, de una sola quiralidad, de una sola mano, lo que marca el tipo de relación con otras moléculas quirales. Un ejemplo paradigmático y cruel de esta discriminación quiral lo proporciona el medicamento quiral Talidomida, uno de cuyos enantiómeros tiene propiedades excelentes como calmante de las

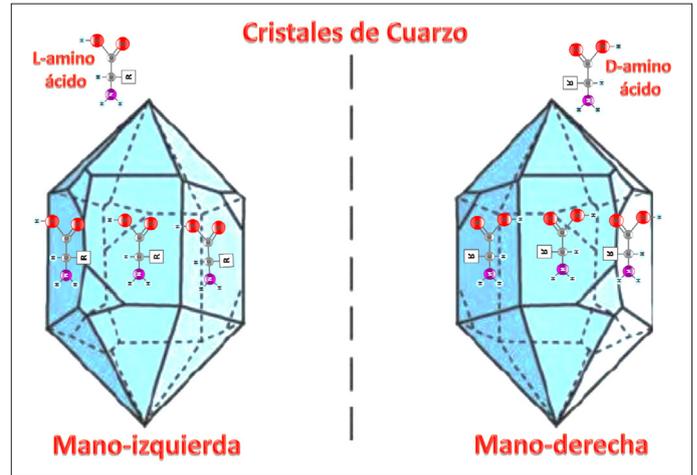


Fig. 9. Cristales enantiómeros de cuarzo. Uno es la imagen especular del otro y no se pueden superponer. Ofrecen una superficie quiral que incorpora aminoácidos de la mano apropiada.

náuseas en las mujeres embarazadas pero el otro enantiómero resulta fatal en el desarrollo del feto. Durante los años sesenta del siglo pasado, en que la droga se administraba racémica, miles de niños nacieron con graves malformaciones congénitas. Muchos de los compuestos farmacéuticos son quirales y después del desastre de la Talidomida las regulaciones para la distribución de estos medicamentos se han vuelto muy estrictas: necesitamos medicinas con el enantiómero correcto.

Es posible que un medio homocirale haya sido un requisito previo para el origen de la vida. Por tanto, es importante identificar mecanismos naturales que permitan la separación y concentración de los dos enantiómeros. Según Lahav y Leiserowitz (1999) "Si una adsorción selectiva de aminoácidos quirales fuera observada sobre ciertas caras de cristales, entonces el problema de la homociralidad biológica podría ser comprendida".

¿Pueden los minerales proporcionar ese mecanismo de concentración y selección quiral al tiempo que faciliten su polimerización? Dos de los minerales más comunes parecen responder positivamente a la pregunta: el cuarzo y la calcita.

Los cristales de cuarzo son quirales debido a un eje helicoidal que hace girar las unidades de  $\text{SiO}_2$  que forman su estructura a la derecha o a la izquierda, formando cristales enantiomorfos de las dos manos (d-cuarzo y l-cuarzo). Estos cristales atraen moléculas levóginas (de mano izquierda) o dextróginas (de mano derecha) en función de su propia quiralidad.

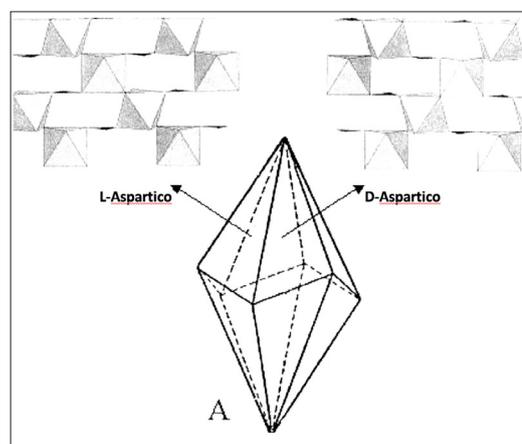


Fig. 10. Escalenoedro trigonal de la calcita mostrando sus caras enantiomorfas en las que se adsorbe selectivamente el aminoácido aspártico L- D-. Se produce una separación quiral en un medio previamente racémico.

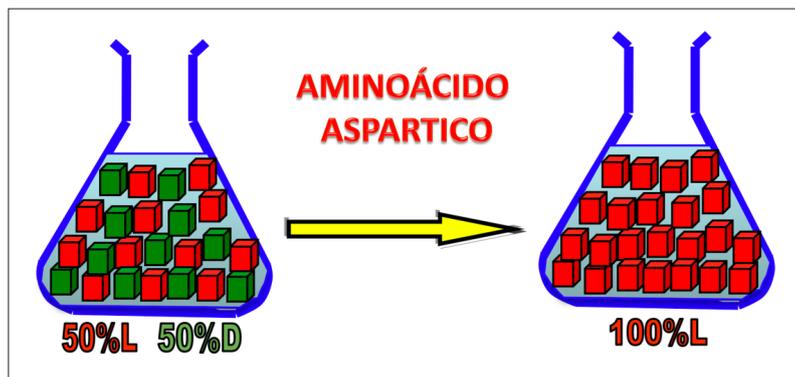


Fig. 11. Un sistema constituido por dos poblaciones de cristales del aminoácido aspártico de mano izquierda y derecha (izquierda) en unas horas se convierte en un sistema homóquiral con todos los cristales de la misma mano (derecha)

Bonner *et al.* (1975) observaron que las caras quirales de los cristales de cuarzo l- y d- adsorbían y concentraban selectivamente los enantiómeros L- y D- de los aminoácidos (Bonner *et al.*, 1975). Pocos años después Kenso Soai realizó unos elegantes experimentos (Soai *et al.*, 1999) en los que la presencia de cuarzo l- o d- era capaz de dirigir una reacción de síntesis quiral para generar un producto con la misma mano de la quiralidad del cristal de cuarzo presente en el experimento. Estos resultados experimentales demuestran que los cristales de cuarzo tienen capacidad para formar sistemas con gran concentración de moléculas orgánicas de una sola mano e iniciar síntesis de productos quirales que heredan la quiralidad del cristal de cuarzo presente. ¿Está el cuarzo involucrado en el origen de la quiralidad de las moléculas orgánicas en el origen de la vida?

Los cristales escalenoedros de calcita (morfología “diente de perro”) presentan caras que son quirales y enantiómeros entre ellas. Robert Hazen demostró (Hazen y Ferry, 2010) que estos cristales cuando están inmersos en una solución racémica del amino ácido aspártico, adsorben selectivamente los enantiómeros D- y L- (derecha, izquierda) de la molécula del aspártico en las superficies cristalinas dependiendo de la quiralidad de cada una de ellas.

Es decir, los minerales con superficies quirales proporcionan mecanismos que separan y concentran los enantiómeros quirales de las moléculas orgánicas más importantes previamente diluidas en solución racémica. Estos resultados sitúan a los minerales como agentes esenciales en la generación de péptidos auto-replicativos en el origen de la vida. Aunque la gran pregunta sigue latente... ¿Por qué la vida escoge solo uno de los dos enantiómeros y no el otro?

## CONCLUSIÓN

Los escenarios plausibles en el origen de la vida que sólo contemplan los océanos y la atmósfera en sus modelos se enfrentan a problemas casi insuperables para explicar los mecanismos de selección, concentración y organización molecular indispensables para la biogénesis. Se calcula que a comienzos del Arcaico existían entre 500 y 1000 especies minerales sobre la faz de la Tierra. Muchos de ellos pudieron tener un papel determinante en la química

prebiótica que antecede a la vida, y con ella, la Tierra se volvió única entre los planetas que conocemos.

Por último, el problema del origen de la bioquiralidad y sus consecuencias en la necesidad de producir medicinas quirales de una sola mano, es una línea de investigación en nuestro Departamento de la Universidad Complutense. Hemos demostrado experimentalmente que dos poblaciones de cristales quirales de mano izquierda y derecha no pueden coexistir en solución: una de las dos poblaciones desaparece en un proceso auto-catalítico irreversible que alimenta a la otra población de la quiralidad opuesta que crece a sus expensas. La existencia de una sola población quiral de cristales parece ser un final inexorable al que llegan nuestros sistemas basado en procesos de disolución-crecimiento. Los cristales que empleamos en los experimentos son inorgánicos, como el clorato sódico (Viedma 2007) o bien orgánicos como el aminoácido aspártico (Viedma *et al.*, 2008) y otras moléculas. La industria farmacéutica está usando el resultado de nuestro trabajo. Finalmente sugerimos que fenómenos similares a los estudiados pueden ocurrir en ambientes prebióticos donde mecanismos de polimerización formen péptidos quirales en el camino hacia la vida.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bernal, J. D. (1951). *The Physical Basis of Life*. Routledge and Paul, London.
- Bonner, W. A., Kavasmaneck, P. R., Martin, F. S. y Flores, J. J. (1975). Asymmetric adsorption of DL-alanine hydrochloride by quartz. *Origins of Life*, 6, 367.
- Cairns-Smith A. G. (1985). *Seven Clues to the Origin of Life*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hazen, R. M. (2001). Origen mineral de la vida. *Investigación y Ciencia*, 297, 48-55.
- Hazen, R. M. y Ferry J. M. (2010). Mineralogy in the Fourth Dimension. *Elements*, 6, 9-12.
- Lahav, M. y Leiserowitz, L. (1999). Spontane Enantiomerenentrennung: von dreidimensionalen Kristallen zu zweidimensionalen magischen Nanoclustern, *Angewandte Chemie*, 111, 2691-2694.
- Soai, S. Osanai, K. Kadowaki, S. Yonekubo, T. Shibata y I. Sato, (1999). d- and l-quartz-promoted highly enantioselective synthesis of a chiral organic compound. *Journal of the American Chemical Society*, 121, 11235-11236.
- Viedma, C. (2007). Chiral symmetry breaking and complete chiral purity by thermodynamic-kinetic feedback near equilibrium: Implications for the origin of biochirality. *Astrobiology*, 7, 312-319.
- Viedma, C., Ortiz, J., Torres, T., Izumi, T. Y Blackmond, D. (2008). Evolution of Solid Phase Homochirality for a Proteinogenic Amino Acid. 2008. *Journal of the American Chemical Society*, 130, 15274-15275.
- Wachtershauser, G. (1988). Pyrite Formation, the First Energy Source for Life: a Hypothesis. *Systematic and Applied Microbiology*, 10, 207-210. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 20 de abril y aceptado definitivamente para su publicación el 9 de septiembre de 2018*