

---

---

## 4 Minerales y fuentes termales

En los años cuarenta y cincuenta V. M. Goldschmit y j. D. Bernal propusieron independientemente que los minerales habrían desempeñado una función esencial en el origen de la vida. Atribuyeron a las arcillas un papel en la adsorción de sustancias orgánicas disueltas. Esto aumentaría notablemente su concentración efectiva. Los minerales incluso podrían ejercer una acción catalítica durante la síntesis de biomoléculas. Recientemente, J. P. Ferris, del Instituto Politécnico Rensselaer en Troy, ha demostrado que la montmorillonita, un silicato hidratado de aluminio, es capaz de catalizar la síntesis de oligonucleótidos a partir de desoxirribonucleótidos. En todas estas propuestas las arcillas desempeñan un papel subordinado, como adsorbentes y/o catalizadores, en el escenario de la evolución química. Sin embargo, Cairns-Smith ha elevado dichos minerales a la categoría de protagonistas. Su razonamiento se basa en que la materia prima para el origen de la vida no serían las biomoléculas complejas que hoy constituyen los seres vivos. En su lugar, el material geoquímico más plausible serían las arcillas, una propuesta con claras reminiscencias bíblicas. Los minerales mismos serían las primeras sustancias bioquímicas que la evolución posterior habría sustituido por materiales orgánicos más eficaces. Según Cairns-Smith, así operan las innovaciones evolutivas y tecnológicas, empezando por lo más fácil y acabando con lo más eficiente. Los minerales asumirían todas las funciones como catalizadores, como membranas formando los contenedores donde ocurriría el primer metabolismo y como material genético. El apilamiento de las capas de las micas en diferentes orientaciones, por ejemplo, puede ser un almacén de información. Estos genes minerales serían replicables durante el crecimiento del cristal y estarían sujetos a mutaciones. En teoría el sistema cristalino podría llegar

a tener un comportamiento darwiniano. Desgraciadamente, estas especulaciones tan originales y radicales, aún basándose en razonamientos impecables, carecen de todo soporte experimental.

### **Oro parece... fuente de vida es**

Desde 1988 los minerales vuelven a ocupar un lugar privilegiado entre las teorías sobre el origen de la vida. Wächtershäuser propuso que la energía y los electrones liberados durante la formación anaeróbica de la pirita serían el motor de las primeras rutas metabólicas. Esta propuesta es también radical porque parte, como hemos señalado en el capítulo anterior, del rechazo del escenario opariniano. Wächtershäuser niega categóricamente la existencia de biomoléculas elaboradas prebióticamente, como materia prima para el origen de la vida. En su lugar propone que *las primeras formas vivas fueron autotróficas*, es decir, sintetizaban todos sus materiales a partir del dióxido de carbono.

Una fuente de energía razonable para una ruta primitiva de fijación de carbono debe cumplir seis requisitos: 1) ha de ser una *fuentes de electrones*; 2) el potencial de reducción debe ser lo suficientemente negativo -en la escala que comúnmente usan los químicos- como para impulsar todas las reacciones metabólicas; 3) el flujo electrónico debe ir lineal y directamente desde el reductor al dióxido de carbono; 4) el flujo de energía debe detenerse cuando el metabolismo deje de necesitarlo; 5) esta fuente de energía debe ser operativa dentro del organismo, o sea, ha de ser *suave y selectiva*; 6) por último, tiene que ser *geológicamente plausible*.

De todas las reacciones geoquímicas que son y han sido en este planeta sólo una verifica las seis condiciones de Wächtershäuser: la formación oxidativa de pirita a partir de sulfuro de hidrógeno e iones ferrosos. Su potencial estándar es de -620 mV, o sea, capaz de donar electrones a cualquiera de las reacciones bioquímicas conocidas. Sulfuro de hidrógeno e iones ferrosos siempre ha habido y en abundancia en la Tierra. La pirita es el mineral de hierro más estable en condiciones anaeróbicas y es ubicuo.

Existe ya cierto apoyo experimental a la hipótesis. Lo malo es que Wächtershäuser es abogado de profesión y teoriza sobre el origen de la vida en los ratos libres. O sea que han de ser otros los que, convencidos de la validez de su propuesta, inviertan tiempo y dinero en comprobarla experimentalmente. Este es el caso del microbiólogo K. O. Stetter y su

grupo de la Universidad de Regensburg, que ha investigado sobre el cuarto requisito, relativo a la inhibición cinética de la fuente de poder reductor. En efecto, a nadie se le había ocurrido antes estudiar la cinética de la síntesis de pirita con formación de hidrógeno -es decir, sin un «metabolismo» que use los electrones- y en condiciones anaeróbicas. El resultado es que esta reacción es muy lenta, como predice la teoría. Por otra parte, en 1992 se publicaron los resultados del mismo grupo en relación a una serie de reacciones de reducción impulsadas por los sulfuros de hierro. A 100 °C, en medio acuoso casi a pH neutro y en completa anaerobiosis, la síntesis de pirita da electrones para la reducción de nitrato a amoníaco, triples enlaces de carbono a dobles y simples enlaces, de carbonilos a hidrocarburos, etc.

Una consecuencia importante se deriva del hecho de que los cristales de pirita ofrecen superficies cargadas positivamente que pueden unir moléculas orgánicas aniónicas. La superficie de pirita también retendría el fosfato favoreciéndose las reacciones de fosforilación. La ruta de fijación de carbono propuesta por Wächtershäuser es el ciclo reductivo de los ácidos carboxílicos. La versión biológica de este proceso es el ciclo reductivo de los ácidos tricarboxílicos, también llamado de Arnon, que se encuentra en algunas bacterias fotosintéticas anaeróbicas. O sea, los productos metabólicos, fosforilados o ionizados, quedan unidos a la superficie de la pirita en cuanto se forman dando lugar a un sistema de reacción bidimensional, un metabolismo superficial. Esto recuerda la propuesta de Bernal que invocó las superficies de las arcillas como lugar de concentración y catálisis para las síntesis orgánicas prebióticas. Sin embargo, allí lo esencial era unirse débilmente para poder separarse y formar parte de la «sopa». La propuesta de Wächtershäuser es opuesta. No hay «sopa» y sólo se seleccionan y reaccionan aquellas moléculas que al unirse fuertemente a la superficie de la pirita sufren transformaciones concomitantes a la síntesis del mineral. No se adsorben moléculas orgánicas sobre la superficie sino que se forman allí. La unión tiene además como consecuencia que el metabolismo bidimensional es favorecido por altas temperaturas y es inherentemente ordenado, no caótico, lo contrario que en las teorías oparinianas.

Los organismos de metabolismo superficial serían acelulares, mientras que todos los organismos conocidos actualmente se basan en una organización celular. El proceso de celularización es esencial en cualquier explicación completa del origen de la vida. Sin embargo, este problema, en la mayoría de los casos, se ha elaborado poco. El modelo de la vida bidimensional predice que la progresiva reducción de los compuestos orgánicos daría lugar a la síntesis de cadenas alifáticas largas unidas por

sus extremos a la superficie de la pirita. A partir de un determinado tamaño éstas se separarían por uno de sus extremos y se formaría una capa de lípidos. A medida que la población de lípidos formando una membrana de una sola capa aumentara autotróficamente se llegaría a una entidad semicelular, todavía alimentada por la superficie de pirita pero ya con una especie de «sopa interna» de metabolitos. Progresivamente, el metabolismo superficial sería sustituido por el metabolismo acuoso y de membrana. Cadenas de transporte electrónico en la membrana permitirían el acceso a otras fuentes de energía redox y, finalmente, a la luz visible. El metabolismo del interior acuoso, del citosol primitivo, reciclaría sustancias liberadas de la superficie mediante procesos catabólicos y serviría para el ensayo de otras rutas de síntesis. Finalmente la heterotrofia podría aparecer como un subproducto de las rutas catabólicas de reciclaje. Wächtershäuser también ha propuesto un esquema completo para el origen de los ácidos nucleicos y las proteínas a partir de precursores metabólicos formados por el metabolismo superficial. La competencia entre enzimas y las superficies de la pirita, con el triunfo de las primeras, marca el inicio de los organismos celulares auténticos.

Una última aportación teórica de Wächtershäuser, puramente especulativa pero muy sugerente, se relaciona con el origen de la homoquiralidad. Se ha descubierto que existe una diferencia estructural entre la pirita de origen metamórfico o magmático, o sea, crecida a alta temperatura, y la de origen sedimentario o hidrotermal. La primera es cúbica, mientras que el análisis detallado de la pirita formada a baja temperatura revela que es o bien triclínica o bien ortorrómbica. A diferencia del sistema cúbico, los cristales triclínicos u ortorrómbicos muestran actividad óptica, lo cual puede tener unas implicaciones importantes en el origen de la homoquiralidad biológica en el contexto de esta hipótesis. Es fácil de imaginar que la asimetría de la superficie de la pirita puede influir sobre la geometría del estado de transición de las reacciones redox que allí están ocurriendo y darse una especie de transferencia quiral del mineral al compuesto orgánico en formación.

Si, como propone Wächtershäuser, la química de superficies es tan diferente de la química en disolución esto abre muchas vías para futuras exploraciones en el laboratorio y, como veremos después, en entornos naturales especiales como las fuentes hidrotermales submarinas. Algunos científicos escépticos critican este modelo destacando su carácter especulativo y su escaso soporte experimental. Se trata normalmente de defensores de escenarios basados en la existencia de la sopa prebiótica a

los que convendría recordar que desde que se publicó la obra de Oparin en inglés hasta que Miller anunció los resultados de su histórico experimento pasaron diecisiete años. Tal vez las críticas científicas deban acompañarse también de paciencia y prudencia con las ideas nuevas.

### **Oasis en los abismos**

El abandono por parte de algunos científicos del sistema océano-atmósfera propuesto por Oparin-Haldane como lugar del origen o almacén de materia orgánica ha desembocado en la propuesta de escenarios submarinos más localizados. En particular hay quien defiende la hipótesis de que las fuentes hidrotermales submarinas son la mejor alternativa a la sopa prebiótica. Un inconveniente es que tanto las fuentes submarinas como sus productos son efímeros en una escala geológica.

A finales de los setenta J. B. Corliss, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA en Maryland, fue uno de los primeros en identificar surgencias hidrotermales submarinas cerca de las Islas Galápagos. Desde entonces se han descrito muchas fuentes termales presentes en las regiones donde las placas tectónicas entran en fricción. Desde el punto de vista biológico son lugares excepcionales donde prolifera una fauna exuberante y peculiar. Se han descubierto unas trescientas especies de animales casi todas endémicas de las surgencias submarinas. Los taxónomos han establecido una clase nueva -Vestimentifera, gusanos gigantes que viven en el interior de tubos-, tres órdenes nuevos y 22 familias nuevas, entre bivalvos, gusanos, crustáceos, esponjas, estrellas y un largo etcétera que forman estos «oasis de las profundidades». Evidentemente se trata de ecosistemas mantenidos con independencia de la luz. Los organismos productores no son fotosintéticos sino quimioautótrofos. Poblaciones extraordinarias de bacterias quimiosintéticas forman la base de la cadena alimenticia de las surgencias hidrotermales. Estas bacterias metabolizan los gases reducidos, especialmente sulfuro de hidrógeno, para fijar dióxido de carbono mediante el ciclo de Calvin, como hacen las plantas. Las bacterias pueden servir de alimento a los animales o, como en el caso de los gusanos tubulados, bivalvos y caracoles, establecen simbiosis suministrando el carbono fijado a sus huéspedes.

Corliss propuso que en estas zonas submarinas los minerales interactúan con un ambiente reductor acuoso rico en hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono y, quizás también cianuro de hidrógeno, metano y amoníaco. Como hemos visto, estos son los

ingredientes que reaccionan para dar biomoléculas en procesos prebióticos, de manera que las surgencias hidrotermales podrían ser escenarios adecuados para la evolución química y el origen de la vida. Corliss ve las surgencias como gigantescos sistemas dinámicos que favorecerían la síntesis de monómeros, polímeros y protocélulas en diferentes entornos químicos, a través de gradientes de temperatura, pH y concentraciones. Las condiciones del sistema se mantendrían alejadas del equilibrio gracias al flujo continuo de materiales que conectaría un entorno químico con otro diferente. Desde el punto de vista de la geoquímica lo que hace atractivo el modelo es que la producción y el flujo de calor desde el interior del planeta han sido siempre intensos, más todavía en las épocas tempranas de la evolución de la Tierra.

Algunos científicos son muy críticos con el papel de las fuentes hidrotermales en el origen de la vida. Así, Miller y J. L. Bada, de la Universidad de California en San Diego, piensan que las altas temperaturas de estos entornos -del orden de 350 °C según ellos- son incompatibles con la estabilidad de los compuestos orgánicos necesarios para iniciar todo el proceso evolutivo. En realidad, las diferentes trayectorias de los fluidos hacen que existan numerosas surgencias a temperaturas no tan elevadas como las consideradas por Miller y Bada. E. L. Shock, de la Universidad de Washington en Sant Louis, ha calculado que las interacciones de las disoluciones hidrotermales con la corteza terrestre a unos 200 °C son adecuadas para una reducción del dióxido de carbono y del nitrógeno a compuestos orgánicos. Además la evaluación de la cantidad de materia orgánica obtenida por síntesis hidrotermal en la Tierra primitiva, unas 200.000 toneladas anuales según Shock, sería comparable a la producción abiótica en una atmósfera no reductora más la contribución por objetos extraterrestres y sus impactos que -según cálculos de Chyba y Sagan, véase el capítulo 3- suponen un total de 400.000 toneladas anuales.

Los trabajos sobre filogenia molecular, realizados sobre todo en el laboratorio de Woese han hecho más creíbles a las fuentes hidrotermales submarinas como posibles escenarios del origen de la vida. En los árboles filogenéticos universales, construidos por ejemplo comparando secuencias de RNA ribosómico, los organismos hipertermófilos se localizan en la base formando las primeras ramificaciones. Esto sugiere que los organismos más antiguos serían termófilos y que, por tanto, las hipótesis sobre el origen de la vida deberían basarse en procesos compatibles con las temperaturas altas. Sin embargo otros datos hacen menos nítida esta conclusión. La vida actual a altas temperaturas requiere una serie de adaptaciones difíciles de imaginar en los organismos más primitivos. Los

organismos termófilos parece que evitan la desnaturalización térmica del material genético mediante una topología peculiar de su DNA generada por la girasa reversa. Se trata de un enzima dependiente de ATP que se encuentra sólo en microorganismos hipertermofílicos y que introduce enrollamientos en la doble hélice. P. Forterre, de la Universidad de París-Sur en Orsay, ha mostrado que la girasa reversa parece una combinación de una DNA helicasa y una DNA topoisomerasa, dos enzimas que participan en la replicación del DNA en organismos mesofílicos, o sea los que vivimos a temperaturas moderadas. La explicación más sencilla sería que la girasa reversa fue el resultado de una fusión génica que tuvo lugar antes de la aparición de la adaptación a las altas temperaturas pero después de que los genomas de DNA y los enzimas implicados en su desplegado y replicación hubieran aparecido, es decir, en un estadio avanzado de una evolución originada a temperaturas moderadas. Esta conclusión no enturbia el posible protagonismo de los sistemas hidrotermales durante la evolución biológica más primitiva. Las colisiones catastróficas de objetos extraterrestres con la Tierra hace poco menos de 4 Ga (véase la figura 4 en el capítulo 2) pudieron convertir las profundidades marinas en un refugio para la vida. Sólo los descendientes de aquellos organismos que ya se hubieran adaptado a las altas temperaturas habrían sobrevivido.

