

ácidos nucleicos a su estructura. A través del tiempo evolutivo, a medida que crecía la complejidad y eficiencia de las macromoléculas orgánicas, éstas asumieron las funciones de réplica y síntesis y abandonaron la infraestructura de la arcilla.¹¹

A simple vista cuesta distinguir las arcillas del resto de los componentes de la «tierra», y ciertamente no tienen un aspecto muy especial. Sin embargo, al examinarlas con un microscopio electrónico se hacen visibles su estructura cristalina y su belleza exquisita (figura 1.1). A un nivel molecular forman patrones geométricos compuestos de átomos de oxígeno y de silicio (o de otros metales) unidos entre sí para formar bandas o redes. Éstas se apilan las unas

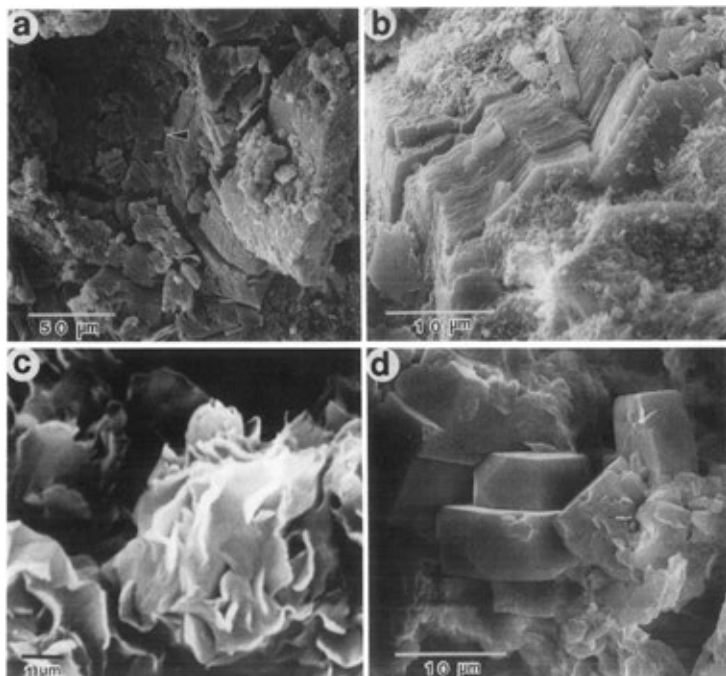


FIGURA 1.1. Micrografías de varios cristales de arcilla. Tomadas de A. L. Senkayi *et al.*, *Clays and Clay Minerals*, 32 (1983), pp. 259-271.

sobre las otras como si fueran platos y se mantienen juntas gracias a fuerzas electroquímicas. Cuando se las moja, las moléculas de agua lubrican la zona que hay entre las capas y permiten que los platos se deslicen con facilidad los unos sobre los otros. Esto les confiere a las arcillas su «plasticidad», que facilita el hecho de que los artesanos las moldeen en forma de cuencos, jarrones y otros objetos de todas las formas y tamaños. La mayoría de los niños aprenden a apreciar esta propiedad de muy pequeños, durante sus maratones de hacer «pasteles de barro» con sus amigos. Incluso de adultos, algunos seguimos obteniendo cierto placer mezclado con aprensión cuando vadeamos por las aguas de un lago y hurgamos en los sedimentos resbaladizos de arcilla del fondo con los dedos de los pies.

El tamaño microscópico y la estructura porosa y estratificada de las arcillas les confieren ciertas características únicas. Tienen una relación superficie / peso increíblemente elevada. ¡Un solo gramo —un pellizco— de polvo de arcilla puede tener la misma área superficial que un campo de béisbol! Los otros dos componentes minerales del suelo, la arena y el limo, tienen partículas mucho más grandes que las arcillas, pero menos área superficial expuesta. A fin de ilustrar esta distinción entre tamaño y peso, digamos que una partícula de arena que hemos dejado caer en un vaso de agua se hunde a un ritmo de dos o tres centímetros por segundo, mientras que una partícula de arcilla fina permanece suspendida y puede tardar doscientos años en descender la misma distancia.

Debido a que los átomos exteriores expuestos de las superficies de arcilla tienen carga electrostática, atraen a los átomos o moléculas con carga opuesta. Esa interacción puede cambiar las características de las arcillas mismas y afectar a las características químicas del medio cir-

cundante. Los agricultores y los jardineros saben que las arcillas de los suelos son importantes para la nutrición de los cultivos porque retienen en su superficie ciertos nutrientes esenciales, como por ejemplo ciertas formas con carga positiva del calcio y del magnesio, y les impiden que se vean arrastradas debajo de la zona de raíces por la lluvia o las aguas del riego. Los alfareros saben que ciertas arcillas se ponen de un color rojo intenso en el horno, siempre y cuando haya oxígeno en abundancia. Esas arcillas contienen átomos de hierro que reaccionan químicamente y se combinan con el oxígeno, causando el color rojo intenso. La hemoglobina de nuestra sangre, que contiene hierro, presenta un comportamiento parecido y adopta un color rojo intenso al oxigenarse.

Entre los tipos de moléculas que se pueden ver atraídas por las cargas superficiales de las arcillas, y retenidas por ellas, se cuentan muchos compuestos orgánicos, entre ellos ciertas formas de aminoácidos y nucleótidos. La hipótesis de que las arcillas sirvieron de plantilla para el secuenciado de las proteínas simples o los genes se basa en este hecho.¹² Además de su superficie cargada, los cristales de arcilla tienen unas formas muy intrincadas y provistas de muchos huecos y recovecos, que podrían servir para situar a las parejas de aminoácidos o de nucleótidos en la orientación correcta para facilitar la síntesis. Esto se parece al mecanismo por el cual las proteínas enzimáticas plegadas de gran tamaño de las células modernas catalizan la biosíntesis de macromoléculas.

La conjetura de que las arcillas pudieron ejercer el papel de catalizador en el origen de la vida tiene medio siglo y fue formulada inicialmente por el químico físico británico John Desmond Bernal¹³ a principios de la década de 1950. Una serie de experimentos llevados a cabo en

la década de 1970 demostraron que un tipo común de arcilla conocido como montmorillonita (llamada así por la ciudad francesa de Montmorillon, que fue donde se extrajo por primera vez) podía servir de catalizador de una secuenciación de aminoácidos especialmente preparados. Algunas de las cadenas moleculares parecidas a proteínas que se sintetizaron de esta forma tenían hasta sesenta aminoácidos de longitud. En la década de 1980, James Lawless, del Ames Research Center de la NASA en California, y otros descubrieron que se podía conseguir que los nucleótidos se enlazaran a varias arcillas cuando también había presentes en la solución cantidades mínimas de ciertos metales como el zinc o el cobre. Luego, durante los años noventa, J. P. Ferris y sus colegas consiguieron enlazar nucleótidos en forma de largas cadenas usando arcillas de montmorillonita como catalizadores. El procedimiento requirió cierto tratamiento preparatorio de los nucleótidos, pero aun así los resultados apoyaron la idea de que las arcillas podrían haber catalizado los primeros genes simples de ARN.

La capacidad para almacenar energía química es un requisito importante para la vida, y algunas arcillas presentan esta capacidad. La montmorillonita, así como otras arcillas comunes como la kaolinita y la illita, reaccionan químicamente con el ATP, la molécula que ejerce de «moneda de cambio energética» en casi todos los organismos vivos. Estas arcillas influyen en los lazos químicos de los fosfatos del ATP, que resultan cruciales para las propiedades de transferencia energética de esta importante biomolécula. Lelia Coyne, de la Universidad Estatal de San Jose, y otros han descubierto que las arcillas kaolinitas pueden por sí solas almacenar energía (recogida de fuentes radiactivas) y luego liberarla cuando se ven tras-

tornadas por factores medioambientales, como por ejemplo un proceso de humedecimiento o de secado o bien fluctuaciones en la temperatura.¹⁴

Graham Cairns-Smith, un importante químico de la Universidad de Glasgow, ha sido el promotor más importante de la idea de que las arcillas tuvieron un papel todavía más crucial en el origen de la vida. Él sugiere que las arcillas no sólo sirvieron como rudimentarios catalizadores enzimáticos, sino que fueron las precursoras de los actuales genes. Esta teoría se basa en el hecho de que la secuencia única de átomos de una superficie de arcilla forma la plantilla para sintetizar la réplica especular de esos mismos átomos, de manera parecida a cómo las secuencias de nucleótidos de las cadenas de ADN y ARN son la plantilla para su réplica. Además, cuando los cristales de arcilla se replican a sí mismos, a menudo su estructura asume irregularidades (mutaciones, si se quiere llamarlas así), y esas irregularidades se repiten (figura 1.2). Los cristales de arcilla son «aperiódicos»: aunque tienen una estructura organizada, sus patrones se parecen más a los de los tapices exóticos tejidos a mano que a los de un papel de pared manufacturado en una fábrica. Las irregularidades de los patrones de las arcillas son «heredables», igual que las mutaciones de los genes reales: pasan a capas o segmentos de cristales de arcillas que se desprenden y se convierten en las plantillas de cristales nuevos.

El famoso físico cuántico Erwin Schrödinger especuló sobre la naturaleza molecular de nuestros genes en la década de 1940, antes de que se descubriera su estructura. Predijo que serían cristales aperiódicos porque éstos podían retener «información» replicable basada en sus patrones de secuencias únicos. También señaló que di-

chos cristales permitían la evolución a base de sustituir ocasionalmente eslabones concretos de su cadena superficial de átomos. Y resulta que la doble hélice del ADN que desvelarían unos años más tarde Francis Crick y James Watson es un tipo de cristal aperiódico. Igual que las arcillas.¹⁵

El argumento de Cairns-Smith se basa en parte en la idea de que nunca desvelaremos los secretos del origen de la vida si nos limitamos a considerar únicamente los materiales que vemos en los organismos vivos de hoy en día. «En una calculadora de bolsillo no encontrarás una cuenta de ábaco de madera», explica ingeniosamente.

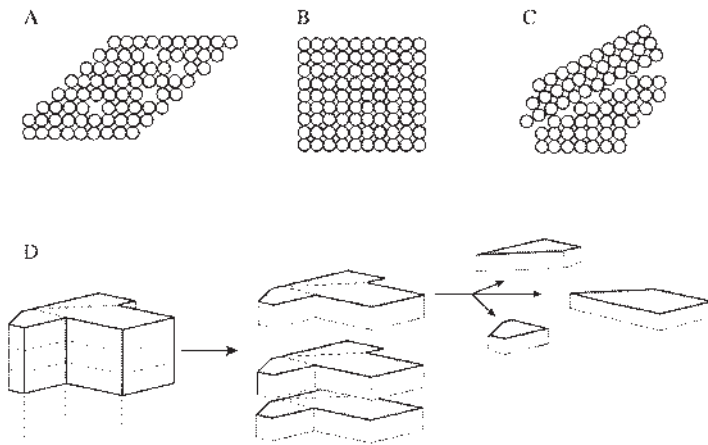


FIGURA 1.2. Entre los defectos comunes de los cristales de arcilla se cuentan: (a) la desaparición de componentes moleculares dentro de un entramado, (b) las sustituciones de componentes individuales y (c) una desalineación entre secciones del entramado. Esta clase de defectos son análogos a las mutaciones genéticas y pueden pasar a la «siguiente generación» cuando se desprenden los distintos segmentos o capas de cristales de arcillas, y (d) forman la plantilla de su propia réplica especular. Ilustración de Tamara Clark, adaptada de © 1985 George V. Kelvin (Revista *Scientific American*).

Los primeros organismos debieron de ser muy rudimentarios y estar hechos de materiales distintos a los que componen las células actuales. Es posible que la evolución empezara por los procedimientos más simples y fáciles. Las arcillas, afirma, son precursoras probables de los genes porque se ensamblan a sí mismas espontáneamente (con la ayuda de las fuerzas geológicas e hidrológicas), se replican a sí mismas y debieron de darse en abundancia en los principios de la Tierra.

Esta idea de los «genes de arcilla»¹⁶ se consideró bastante descabellada cuando Cairns-Smith la propuso inicialmente en la década de 1960. Sigue siendo controvertida, pero desde entonces han ido apareciendo lentamente datos experimentales favorables. La investigación más crucial se ha centrado en cómo nuestros genes basados en ácidos nucleicos pudieron haberse originado en un cristal de arcilla. Ya hace tiempo que se sabe que los aminoácidos y los ácidos nucleicos se encuentran a veces en la naturaleza, integrados en la estructura de las arcillas. Hay quien afirma que esto podría representar una fase híbrida de la evolución de la arcilla a los genes orgánicos. Además de estas pruebas circunstanciales, los investigadores han descubierto que el proceso de cristalización de algunos tipos de arcillas viene facilitado por la presencia de aminoácidos específicos o que quizá incluso requiera esa presencia. Además de sus efectos sobre la formación de arcillas, los aminoácidos y otras moléculas orgánicas pueden ejercer una poderosa influencia sobre las formas y tamaños de los cristales de arcilla a base de inhibir el crecimiento de ciertas facetas.

Podemos imaginar situaciones durante la evolución en las que la supervivencia, competencia y autorreplicación de aquellas arcillas provistas de moléculas orgánicas se

vieron favorecidas. Por ejemplo, un «defecto» en la forma de una arcilla causada por la presencia de una molécula orgánica en su estructura pudo causar que aquellos cristales pudieran adherirse mejor a los poros de la roca en vez de ser arrastrados por el agua, o bien pegarse a una superficie que estuviera constantemente bañada en los compuestos esenciales (nutrientes) necesarios para replicarse mejor a sí mismos. Otras arcillas pudieron clonarse más deprisa o mejor gracias a la influencia que sus componentes orgánicos tenían sobre las interacciones químicas con el entorno o sobre la cohesión entre placas. Es posible incluso que algunas arcillas desarrollaran la capacidad de fabricar moléculas orgánicas para obtener su propia ventaja selectiva.

La hipótesis (todavía por demostrar) de la «adopción de funciones genéticas» postula que en un momento dado una cadena sencilla de nucleótidos de rasgos parecidos al ARN se incrusta en un cristal de arcilla y facilita de algún modo la réplica de esa arcilla. Durante sus fases iniciales, ese ARN rudimentario tiene un papel secundario y opcional en este proceso, pero a lo largo de millones de ciclos de clonación, el ARN se va volviendo más sofisticado. Debido a que una macromolécula orgánica compleja como el ARN puede albergar más información que un cristal de arcilla y obtener un control más intrincado y selectivo de las operaciones, empieza a dominar la orquestación del proceso de clonación y de las funciones catalizadoras de la arcilla. Por fin el ARN lleva a cabo una «conquista genética» completa y la matriz de arcilla va perdiendo tamaño e importancia hasta desaparecer del todo. Cualquier cristal de arcilla que pudiera haber adoptado un ácido nucleico para beneficiarse de él habría sembrado las semillas de su propia destrucción.

La teoría del «gen de arcilla» sugiere que la progresión hacia la vida en nuestro planeta reflejó en cierta medida la manera en que se construye un puente. En calidad de no ingeniero, me maravillo cada vez que cruzo un puente de acero relativamente simple que hay cerca de mi casa. Da la impresión de que hacia el principio de su construcción tuvo que haber un paso físicamente imposible en el que los trabajadores y las vigas de acero estaban flotando en el aire. La realidad obvia es que, al empezar a construirse el puente, se levantaron estructuras especiales de andamiaje para sostener tanto a los trabajadores como el equipamiento. Una vez completado el puente, el andamiaje ya no es necesario y se desmonta. La lección aquí es que la construcción, igual que la evolución, casi siempre implica sustraer, además de sumar. La hipótesis de Cairns-Smith sostiene que los cristales de arcilla fueron el andamiaje de la evolución de los primeros genes verdaderos.

Durante las últimas décadas, los científicos han empezado a examinar otras sustancias inorgánicas comunes en los suelos, además de la arcilla, en busca de sus propiedades «parecidas a la vida». El químico alemán Günther Wächtershäuser ha postulado una teoría integradora relacionada con la pirita, comúnmente conocida como el *oro de los tontos*, que ha atraído a muchos seguidores. La pirita es un mineral cristalino muy simple que se puede sintetizar a partir del hierro ferroso y el ácido sulfhídrico, dos sustancias que abundan en muchos entornos de suelo y que también se encuentran en las proximidades de las fuentes hidrotermales de las profundidades del mar. La síntesis de la pirita se ve termodinámicamente favorecida bajo muchas condiciones y por tanto no requiere energía, sino que la *libera*. Esta liberación de energía se puede

usar para impulsar la síntesis de moléculas orgánicas, que luego se enlazan con la superficie altamente reactiva de los cristales de pirita. Igualmente, esa energía se podría usar para absorber carbono del monóxido de carbono o del dióxido de carbono en su entorno, algo parecido a la «fijación» del carbono que llevan a cabo los organismos fotosintéticos de hoy en día. La química superficial de la pirita la hace superior a muchas arcillas a la hora de crear lazos con los nucleótidos. Si conseguimos obtener datos experimentales que respalden las especulaciones acerca de los poderes de la pirita, podremos concluir que este «oro de los tontos» es mucho más valioso que el oro de verdad. Sin él, nunca habría existido vida en el planeta, y mucho menos una civilización humana con un ansia de metales preciosos.¹⁷

Los detalles de *cómo* pudo originarse la vida siguen eludiéndonos y todas las teorías siguen siendo muy controvertidas. Con respecto a *dónde* empezó la vida, sin embargo, parece que estamos más cerca de encontrar la respuesta. Los avances recientes de la biología molecular y de la genética tienden a apoyar las investigaciones más recientes en materia de química física y química del suelo: que la vida se originó en entornos extremos, quizá en las profundidades del subsuelo o dentro de los sedimentos de las fuentes hidrotermales de las profundidades marinas. Las nuevas herramientas han permitido a los científicos rastrear nuestras raíces genéticas hasta nuestros antepasados más primitivos. Podemos examinar las secuencias de nucleótidos del ARN de los organismos que viven en la actualidad y determinar con precisión considerable no sólo quién está emparentado con quién,

sino también quién tiene las raíces más profundas en el árbol de la evolución. Y resulta que los representantes vivos de nuestros antepasados más primitivos son un grupo muy diverso de microorganismos poco usuales que habitan algunos de los entornos subsuperficiales más hostiles que existen hoy en nuestro planeta. Estos *extremófilos*, como se denominan, son una historia fascinante en sí mismos, y el siguiente capítulo trata de ellos. La idea crucial aquí es que, dado que representan nuestras raíces genéticas más profundas, se puede hacer la conjetura razonable de que el lugar donde se originó la vida fueron unos hábitats del subsuelo parecidos a aquellos en los que hoy en día encontramos esos inusuales microorganismos.