

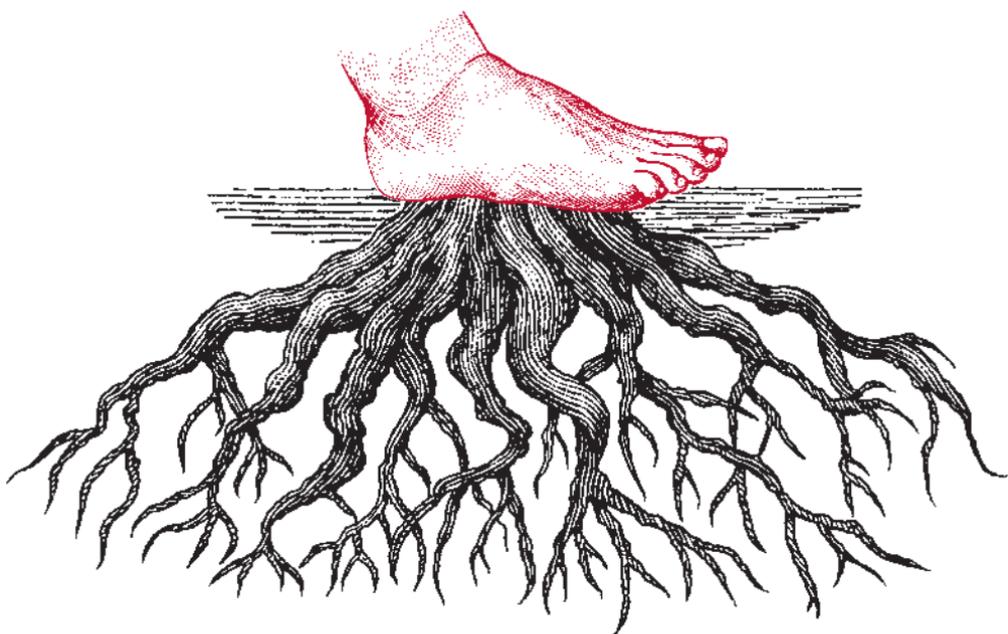
«Un viaje sorprendente e iluminador», *Booklist*.

David W. Wolfe

EL SUBSUELO

Una historia natural
de la vida subterránea

PRÓLOGO DE MÓNICA FERNÁNDEZ-ACEYTUNO



Seix Barral



Seix Barral Los Tres Mundos

David W. Wolfe

El subsuelo

Una historia natural de la vida subterránea

Edición revisada y actualizada

Prólogo de Mónica Fernández-Aceytuno

Traducción del inglés por

Javier Calvo

Título original: *Tales from the Underground*

© David W. Wolfe, 2001, 2019

Publicado originalmente por Perseus Publishing

Publicado de acuerdo con Basic Books, un sello de Perseus Books, LLC, subsidiario de Hachette Book Group, INC., Nueva York, N. Y., EE. UU. Todos los derechos reservados

© por la traducción, Javier Calvo, 2019

© Prólogo de Mónica Fernández-Aceytuno

© Editorial Planeta, S. A., 2019

Seix Barral, un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

Avda. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)

www.seix-barral.es

www.planetadelibros.com

Revisión y asesoramiento técnico: Dr. Luis Sampedro, Misión Biológica de Galicia (CSIC)

Charles Bell. Cortesía del Real Colegio de Cirujanos de Edimburgo: 200 (fig. 7.1.); Cortesía de Dean Biggins, U. S. Geological Survey, Biological Research Division: 244 (fig. 8.3.); Joseph Burton: 133 (fig. 4.1.); C. A. Edwards y P. J. Bohlen, *Biology and Ecology of Earthworms*, 3.ª ed. (Londres: Chapman and Hall, 1996): 183 (fig. 6.3.); Tamara Clark: 24 (fig. 1.1.), 27 (fig. 1.2.), 84 (fig. 2.2.), 103 (fig. 3.2.), 104 (fig. 3.3.), 109 (fig. 3.4.), 138 (fig. 4.2.); Tamara Clark, adaptada de: 1999 Nenad Jaksevic (*Discover Magazine*): 68 (fig. 2.1.); Tamara Clark, adaptada de: 1985 George V. Kelvin (*Scientific American*): 59 (fig. 1.2.); Cortesía de John H. Crowe, Unversidad de California, Davis: 32 (fig. 1.3.); Charles Darwin, *The Formation of Vegetable Mould Through the Action of Worms, Observation of Their Habits* (Londres: Murray, 1881): 193 (fig. 6.4.); J. W. Deacon, *Microbial Control of Plant Pests and Disease* (Washington, D. C., 1983): 214 (fig. 7.2.); Cortesía de Tom y Maria Eisner: 142 (fig. 4.3.); I. Gallaud, *Revue Generale de Botanique* 17 (1905), Ilustración 4: 154 (fig. 5.1.); Cortesía de Phylliss Greenberg: 253 (fig. 8.4.); Cortesía de Kansas State Historical Society: 263 (fig. 9.1.); Adaptado de R. L. et al., *The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect* (Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, 1998) y actualizado con datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente, © European Environment Agency, 2019: 282 (fig. 9.2.); Cortesía de Tom y Pat Leeson: 237 (fig. 8.1.); © Chaoqun Lu y Hanqin Tian, 2017: 145 (fig. 4.4.); Cortesía de Hugues Massicotte, University of British Columbia: 156 abajo / Cortesía de Ken Mudge, Cornell University: 156 arriba (fig. 5.2.); Cortesía del Johnson Space Center, NASA: 88 arriba y Cortesía del Johnson Space Center, NASA/Dr Carlton Allen: 88 abajo (fig. 2.3.); Cortesía de la Predator Conservation Alliance: 242 (fig. 8.2.); Caricatura en: *Punch*, 6 de diciembre, 1881: 178 (fig. 6.2.); Cortesía de Rutgers University Archives Collection/Dr. Selman Waksman: 218 (fig. 7.3.); A. L. Senkay et al., *Clays and Clay Minerals* 32 (1984): 259-71: 54 (fig. 1.1.); Cortesía de la Universidad de Illinois: 92 (fig. 3.1.); Litografía de Charles Darwin. Cortesía de Wellcome Trust, Londres: 177 (fig. 6.1.); y Tardigrado adaptado de © Dotted Yeti / Shutterstock: 351

Primera edición: octubre de 2019

ISBN: 978-84-322-3560-3

Déposito legal: B. 18.411-2019

Composición: Gama, S. L.

Impresión y encuadernación: CPI (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

NOTA: El editor quiere agradecer las autorizaciones recibidas para reproducir imágenes protegidas en este libro. Se han realizado todos los esfuerzos para contactar con los propietarios de los *copyrights*. Con todo, si no se ha conseguido la autorización o el crédito correcto, el editor ruega que le sea comunicado.

El papel utilizado para la impresión de este libro está calificado como **papel ecológico** y procede de bosques gestionados de manera **sostenible**.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

1 ORÍGENES

El origen de la vida parece [...] ser casi un milagro, de tantas condiciones que tuvieron que darse para que empezara.

FRANCIS CRICK,
*La vida misma: su origen
y naturaleza*

*A ver, ¿quién cree que un milagro sea una gran cosa?
Yo no sé de nada que no sea un milagro.
[...]
cada pulgada cúbica de espacio es un milagro,
cada yarda cuadrada de la superficie de la Tierra
está sembrada de milagros
y cada pie de su interior hierve de ellos.*

WALT WHITMAN,
Hojas de hierba

La Tierra no fue construida por manos delicadas. Fue forjada a lentos martillazos, por medio de la fuerza bruta de un bombardeo de meteoritos que duró cientos

de millones de años. Los suelos, los mares y nuestros antepasados microbianos primitivos emergieron en medio de una situación aparente de caos y catástrofe. El proceso empezó hace miles de millones de años, cuando todo nuestro sistema solar se estaba coagulando a partir de un remolino de gases calientes y polvo cósmico resultante de las explosiones estelares.¹ Algunos de los objetos que colisionaron con la Tierra en aquella fase eran planetesimales, objetos del tamaño de planetas pequeños. La energía cinética liberada por aquellos impactos literalmente hizo temblar a la Tierra hasta su mismo núcleo y fundió gran parte de su corteza rocosa y de su interior. Algunos fragmentos de planetesimales y de meteoritos se quedaron incrustados de forma permanente en la Tierra, mientras que otros pedazos salieron disparados al espacio como metralla gigante. La masa de la Tierra primordial se fue acumulando despacio, como un orbe que va creciendo a medida que el escultor va añadiendo arcilla, puñado a puñado. Al aumentar de tamaño, se incrementó la fuerza gravitatoria de la Tierra y atrajo cada vez más detritos espaciales errantes.

Es difícil establecer una fecha específica de nacimiento de nuestro planeta, teniendo en cuenta que su desarrollo fue gradual. Basando sus cálculos en el «reloj radiactivo» —las mediciones del nivel de descomposición radiactiva de ciertos elementos encontrados dentro de la corteza terrestre, como el uranio y el plomo—, la mayoría de los geólogos calculan que la edad de la Tierra es de unos 4.500 millones de años. Durante sus primeros mil millones de años, la Tierra experimentó unos dolores de crecimiento horribles. Justo cuando la frecuencia de los impactos de meteoro empezaba a reducirse, comenzaron

a desencadenarse erupciones volcánicas violentas por todo el globo a medida que el interior candente del planeta «soltaba sus gases». Cuando la temperatura de la superficie terráquea empezó a enfriarse por fin, el volumen gigantesco de vapor de agua que había en la atmósfera se condensó y comenzó a caer torrencialmente del cielo en forma de feroces tormentas de proporciones verdaderamente bíblicas. Las lluvias torrenciales duraron millones de años y ese proceso creó nuestros océanos, la hidrosfera que conocemos.

Las rocas metamórficas e ígneas originales de la superficie terrestre, dejadas atrás por las erupciones volcánicas y por los movimientos ascendentes de la capa inferior del manto, fueron progresivamente lavadas por las lluvias incesantes y sus minerales fluyeron hasta los océanos. Éste fue un primer paso esencial en la formación de los suelos primitivos que terminarían manteniendo una vibrante vida vegetal y animal. Aquellos suelos primitivos carecían de materia orgánica, pero contenían minerales de arcilla, arena y limo en diversas proporciones.

Las arcillas son únicas entre los componentes minerales del suelo.² Se trata de estructuras químicamente reactivas, microscópicas y cristalinas, que se forman a partir de soluciones saturadas de silicatos y óxidos metálicos. La arena y el limo, en cambio, son partículas grandes y químicamente inertes formadas por la simple erosión y pulverización de la roca. Hay arcillas que han cristalizado en las profundidades del manto de la Tierra, a temperaturas y presiones altas y luego han sido expulsadas a la superficie por los movimientos convulsivos de la Tierra. Este proceso es impulsado por el calor radiactivo de las profundidades del manto terrestre y forma parte

del mismo ciclo geológico de tectónica de placas que mueve gradualmente las cortezas continentales.

Cómo los componentes de polvo estelar de nuestro planeta consiguieron doblegar la tendencia termodinámica al desorden y organizarse hasta formar el intrincado diseño de los sistemas vivos es un enigma que lleva décadas desconcertando a los científicos. Lo que sí se sabe es lo siguiente: la vida —la biosfera— se originó en algún momento de aquellos tumultuosos primeros miles de millones de años de historia de la Tierra. Los microfósiles descubiertos en los últimos años, y los fósiles más grandes formados por colonias visibles de bacterias que se apilaban en unas marañas llamadas estromatolitos, ofrecen una evidencia inequívoca de que la vida microbiana ya estaba presente hace 3.500 millones de años, quizá todavía más. Teniendo en cuenta lo que hemos averiguado recientemente sobre el escenario previo a la emergencia de aquellas criaturas —bombardeo de meteoritos, epidemias de erupciones volcánicas, intensa radiación ultravioleta (no había filtro de ozono en la atmósfera superior)—, muchos científicos tienden a pensar cada vez más que los ancestros de las primeras formas de vida de la Tierra debieron de tener su origen muy por debajo de la superficie. Cualquier especie nueva que se hubiera aventurado fuera del útero protector de la Madre Tierra en aquellos primeros tiempos habría sido rápidamente destruida por alguna catástrofe de la superficie y su camino evolutivo se habría visto cortado de raíz. La joven Tierra era como una zona de guerra donde el lugar más seguro —el único donde se podía estar— era bajo tierra.³

La noción del subsuelo como cuna de la vida va en

contra de la popular idea vigente durante una gran parte del siglo xx de que la vida empezó en una masa poco profunda de agua, o quizá en las aguas superficiales del océano, donde la evaporación pudo concentrar el «caldo de cultivo» idóneo de ingredientes para que emergiera la vida. Esta teoría surgió de la especulación que llevó a cabo Charles Darwin de que la vida se originó en una «poza pequeña y cálida». Darwin escribió esto en 1871 en una carta privada e informal a su colega el botánico Joseph Dalton Hooker. No era una idea de la que estuviera particularmente seguro ni que tuviera intención de promover. Pese a todo, sus seguidores se tomaron el comentario muy en serio. La carta se ha citado en prácticamente todos los libros y artículos sobre el tema del origen de la vida que se han escrito desde los tiempos de Darwin.

Darwin seguramente se quedaría sorprendido y también un poco consternado si se enterara de cuánto ha influido su comentario informal en el pensamiento sobre esta cuestión en el siglo xx. En otros escritos manifestó con claridad diáfana que le parecía mejor dejar esta cuestión para las generaciones futuras, que sin duda tendrían mejores fundamentos para abordarla. Por ejemplo, en una carta de 1881 a Nathaniel Wallich, conservador de los Jardines Botánicos de Calcuta, Darwin se refiere a este asunto como *ultra vires* («más allá de los límites») de la ciencia de su época: «Ha expresado usted muy correctamente mis puntos de vista al declarar que yo dejé la cuestión del origen de la vida en el tintero por ser completamente *ultra vires*, dado el estado presente de la ciencia».

Aunque es posible que los detalles del origen de la vida puedan estar *ultra vires* para siempre, entramos en el siglo XXI teniendo muchas pistas emocionantes que seguir. La mayoría sugieren que la cuna de la vida fue un

entorno subterráneo, en vez de una «poza pequeña y cálida», posiblemente dentro de los sedimentos turbios del fondo marino o en las profundidades oceánicas dentro los poros inundados de la corteza continental. Como veremos, esta idea se ve apoyada no sólo por el hecho de que el subsuelo debió de ser el refugio más seguro frente a la violencia y la agitación climática de los primeros mil millones de años de la Tierra. El subsuelo también era el lugar donde se encontraban los ingredientes esenciales de la bioquímica primitiva, y donde hoy encontramos extraños microorganismos que se cree que son los descendientes directos de las primeras formas de vida de la Tierra.

Sólo un par de años antes de que Darwin escribiera su muy citada carta donde especulaba sobre la poza pequeña y cálida,⁴ otro famoso naturalista de la época, Thomas Huxley, había publicado un rompedor y muy leído ensayo titulado «Sobre las bases físicas de la vida».⁵ Aunque Huxley estaba de acuerdo con Darwin en que era prematuro intentar averiguar el origen de la vida, sí que explicaba que los organismos vivos se componen de átomos y que las actividades de la vida están regidas por las leyes de la física y de la química. Huxley profundizó mucho y llegó muy lejos en esta cuestión, teniendo en cuenta que todavía faltaba un siglo para que apareciera la disciplina de la biología molecular. Recibió muchas acusaciones de herejía religiosa, pero esto no fue nada nuevo para Huxley, que ya era conocido como partidario intrépido y elocuente de la teoría de la evolución de Darwin.

Huxley identificaba cuatro elementos como ingredientes primordiales para la evolución de la vida: hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno. Los análisis quími-

cos modernos verifican que, de los más de cien elementos que hay en la tabla periódica, esos cuatro constituyen más del 95 por ciento de los átomos presentes en el cuerpo humano. Lo mismo se aplica a las bacterias, los hongos, las lombrices, los tiburones blancos, las secuoyas gigantes o lo que uno quiera. Esta semejanza en la composición elemental de todas las formas de vida (que conocemos) es una idea en la que Huxley también hacía énfasis.

Resulta todavía más notable, sin embargo, el parecido entre la composición elemental de los organismos vivos y la del conjunto del universo. Las mediciones espectroscópicas recientes de las estrellas y del polvo interestelar confirman que los mismos cuatro elementos identificados por Huxley como componentes de la mayor parte de la biosfera también se encuentran entre los cinco que más abundan en el cosmos. El milagro de la vida, como veremos, reside en su complejidad, no en la escasez de ingredientes iniciales.

El hidrógeno constituye más del 90 por ciento de la materia del universo y representa más del 60 por ciento de los átomos del cuerpo humano. Todo ese hidrógeno se formó en la violenta explosión del Big Bang, hace quince mil millones de años. Es el más simple de todos los átomos, y su núcleo contiene un protón en torno al cual orbita un solo electrón. Todos los demás elementos que hay en el cuerpo humano se forjaron tiempo después en las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en el interior de las estrellas. En esas fusiones nucleares, los núcleos de elementos simples y ligeros, empezando por el hidrógeno, colisionaron hasta formar los núcleos mayores de los elementos más pesados. Tal como dijo William Fowler en 1983 en su discurso de aceptación del Premio

Nobel por su trabajo sobre el origen de los elementos: «Todos somos genuina y literalmente una pizca de polvo estelar». ⁶

La Tierra no es en absoluto excepcional en el universo por el hecho de contener los elementos básicos de la vida. De hecho, debido a cómo las cosas se organizaron durante la formación inicial de nuestro sistema solar, la Tierra contiene relativamente menos hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno que algunos de nuestros planetas vecinos más alejados del Sol. Pese a todo, el hecho de que tanto nosotros como todos nuestros cohabitantes bióticos estemos aquí demuestra que la Tierra contiene los bastantes elementos esenciales de la vida como para construir una biosfera próspera, *siempre y cuando exista un sistema para reciclar esos elementos*. Los organismos del suelo desempeñan un papel central en ese sistema de reciclaje, tal como explicaremos más tarde. La pregunta crucial aquí es: ¿por qué la vida se originó a partir de esos elementos básicos en nuestro planeta y presumiblemente no en los demás?

La gran ventaja que presenta la Tierra en tanto que planeta generador de vida no estriba en una mayor abundancia de elementos esenciales, sino en que muchos de esos elementos se combinaron en forma de moléculas específicas que facilitaron una evolución de la geoquímica a la bioquímica. El ensayo de 1871 de Thomas Huxley procede a identificar tres moléculas simples que resultaron esenciales para la formación de vida en la Tierra: agua (hidrógeno y oxígeno), ácido carbónico (carbono, hidrógeno y oxígeno) y amoníaco (nitrógeno e hidrógeno). La afirmación de Huxley ha aguantado el paso del tiempo. Todas las modernas teorías del origen de la vida reconocen la importancia de estas tres moléculas y coin-

ciden en que la abundancia de una de ellas —agua— es lo que hace excepcional a nuestro planeta azul.

Es en el medio acuático donde tiene lugar la química de todos los organismos vivos tal como la conocemos. Muchos de los demás compuestos esenciales para la vida resultan útiles sólo en presencia del agua. Su papel viene determinado por el hecho de si se disuelven o no en agua, o bien por el efecto que tiene el agua sobre sus propiedades electroquímicas. Se encuentra agua por casi toda la Tierra, tanto encima como debajo de la superficie. Hasta en los ambientes desérticos que nos parecen secos y sin vida a menudo hay florecientes comunidades microscópicas de organismos subterráneos nadando felices en las finas películas de agua que se adhieren a las arcillas y a las rocas porosas.

Antes de que apareciera la vida en nuestro planeta, fue dentro del agua, y en los suelos y sedimentos saturados de agua, donde se sintetizaron por primera vez muchos importantes compuestos orgánicos (que contienen tanto carbono como hidrógeno). Los compuestos orgánicos como los aminoácidos, los nucleótidos y los lípidos fueron las bases necesarias de las primeras proteínas, genes y membranas celulares, respectivamente. La síntesis de esas bases sólo pudo tener lugar espontáneamente si las leyes termodinámicas básicas de la naturaleza favorecieron las reacciones químicas, o bien si se produjo un suministro de energía destinado a vencer la barrera termodinámica. Igual que una pelota rueda colina abajo y no colina arriba, a menos que aportemos la energía necesaria para impulsarla, las reacciones químicas suelen rodar termodinámicamente colina abajo a menos que se aporte energía para que hagan lo contrario. Christian de Duve, bioquímico galardonado con el Premio Nobel,

opinaba que «el camino a la vida debió de producirse cuesta abajo de principio a fin».⁷

Pero la vida tal como hoy la conocemos no tuvo lugar espontáneamente. Tanto las biomoléculas como las interacciones entre sí presentan una organización muy compleja y, por tanto, van en contra de la tendencia termodinámica básica hacia la entropía o desorden. Los organismos vivos han batallado con éxito contra la entropía a base de desarrollar mecanismos para recoger energía externa (la obtención de energía solar por parte de los organismos fotosintéticos, por ejemplo) y usarla para ir colina arriba, para impulsar reacciones no favorecidas por la termodinámica. Cuando un organismo muere, pierde esa capacidad, la entropía gana la partida y las reacciones catabólicas descomponen las complejas biomoléculas en sus componentes elementales. La pregunta es: ¿cómo llegaron a existir esos elementos básicos de la vida cuya síntesis *no estaba* favorecida por la termodinámica antes de que existieran organismos vivos que obtuvieran la energía necesaria?

Una posibilidad es que algunas de las reacciones que requerían energía tuvieran lugar en las inmediaciones de otras reacciones que sí se vieran favorecidas y liberaran energía, estrechamente emparejadas con esas otras reacciones. Otra posibilidad sería la entrada de energía fortuita e impredecible procedente de fuentes externas como la radiación ultravioleta o los relámpagos. En 1951, Stanley Miller, que por entonces era estudiante de posgrado a las órdenes del químico físico Harold Urey en la Universidad de Chicago, llevó a cabo un experimento revolucionario sobre el origen de la vida que realizaba una demostración de esta última posibilidad.⁸ Dentro de un sistema de matraces, tubos de ensayo y tubos refrigeran-

tes, creó una atmósfera artificial compuesta de hidrógeno, amoniaco y metano y un «océano» de agua. A continuación hizo pasar chispas eléctricas por el gas para simular relámpagos que aportaran energía para las reacciones químicas. Menos de una semana después de este tratamiento, los contenidos líquidos se habían vuelto de un color rojo sangre intenso, y Miller decidió que era hora de analizar los resultados. Para sorpresa de los investigadores y del resto de la comunidad científica, un 15 por ciento del carbono original del gas metano aparecía en forma de varios aminoácidos distintos disueltos en agua. Aunque los aminoácidos no son ni mucho menos grandes macromoléculas, como algunas de las proteínas de las que forman parte, su síntesis a partir de una mezcla de elementos tan simples causó gran sorpresa.

Entre los demás productos importantes del experimento de Miller-Urey había formaldehído y cianuro de hidrógeno. El formaldehído era un resultado emocionante porque tiene la capacidad de reconstituirse en forma de una molécula anillada de azúcar llamada ribosa, que es un componente importante de nuestro material genético, el ARN (ácido *ribosa*-nucleico) y el ADN (ácido *desoxirribosa*-nucleico). El cianuro de hidrógeno se consideró inicialmente un producto secundario tóxico y no deseado, pero más tarde se mostró que podía llevar a la producción de adenina, otra molécula de importancia tremenda en el campo de la bioquímica. La adenina, como la ribosa, es un componente del ARN y del ADN, además de formar parte de la estructura del adenosín trifosfato (ATP), la molécula más importante para el almacenamiento y la transferencia de energía química en los organismos vivos.

En la década de 1970, unos cuantos científicos empe-

zaron a concluir que el enigma de la vida ya estaba prácticamente solucionado. Cocinar los «materiales de la vida» —aminoácidos, nucleótidos, lípidos— iba a resultar pan comido. Les añadías una pizca de energía, quizá un rayo o un poco de radiación ultravioleta a algunos elementos químicos comunes y... *voilà!* No era exactamente vida, pero los resultados eran lo bastante interesantes como para estimular la imaginación.

Sin embargo, los ánimos decayeron sustancialmente en la década de 1980 al aparecer nuevas evidencias obtenidas por geólogos y astrónomos que indicaban que los presupuestos sobre la atmósfera primitiva de la Tierra y sobre los océanos usados en el experimento Miller-Urey y en otros posteriores eran incorrectos. El hidrógeno gaseoso es un elemento demasiado ligero como para que el campo gravitatorio de la Tierra lo retuviera en nuestra atmósfera en cantidades significativas. Asimismo, aunque es posible que el metano y el amoníaco estuvieran presentes en algunas fases de la evolución de la atmósfera, las concentraciones que Miller y Urey postularon eran con toda probabilidad demasiado altas.

Justo cuando estaba empezando a parecer que los brillantes experimentos de Miller-Urey y de todos los demás habían sido inútiles, una serie de descubrimientos en algunos de los entornos subterráneos menos conocidos de la Tierra renovaron las esperanzas. Resulta que el hidrógeno, el metano, el amoníaco y otras sustancias químicas usadas por los pioneros investigadores del origen de la vida para sintetizar los elementos constituyentes básicos se encuentran en abundancia cerca de las fuentes hidrotermales de las profundidades marinas y en ciertas regiones profundas de la corteza terrestre. Estos entornos infrasuperficiales tienen temperaturas altas —a menudo

cercanas al punto de ebullición del agua— debido al calor geotérmico generado por el afloramiento de corrientes ascendentes del manto interno. Los cálculos del balance energético sugieren que esa energía térmica podría haber servido para impulsar la síntesis de los aminoácidos y los nucleótidos.

Aunque el descubrimiento ofreció una explicación razonable de cómo los elementos básicos de la vida pudieron sintetizarse, al terminar el siglo xx todavía estábamos muy lejos de resolver el misterio del origen de la vida. Irónicamente, fue uno de los mayores logros de la biología del pasado siglo —el descubrimiento de la función y de la compleja estructura molecular del ADN— lo que acabó dejando en punto muerto las investigaciones sobre el origen de la vida.

Los biólogos se maravillan del tamaño y de la complejidad del ADN: dos cadenas de nucleótidos entrelazadas en la famosa estructura de hélice doble, donde la secuencia precisa de los miles de nucleótidos de cada cadena determina el código genético. Pero aun en abundancia de nucleótidos, ¿cómo pudieron juntarse esos elegantes genes nuestros? Y lo mismo se puede preguntar acerca de la formación de proteínas complejas a partir de una sopa de aminoácidos. No es razonable pensar que esas cosas sucedieron gracias a un simple suministro de energía. En palabras del físico australiano Paul Davies, eso sería como «detonar un cartucho de dinamita debajo de un montón de ladrillos y esperar que se forme una casa».⁹

En las células modernas, las cadenas individuales del ADN forman la plantilla de su propia réplica especular durante las divisiones celulares. Este proceso sólo puede suceder si es catalizado por las proteínas-enzimas, que son también macromoléculas enormes, a menudo com-

puestas de cientos de aminoácidos plegados de formas peculiares. Los diversos dobleces y las extensiones parecidas a prótesis de las enzimas ayudan a mantener los nucleótidos adecuados muy juntos y en la orientación necesaria durante el proceso de síntesis del ADN, lo cual reduce el requerimiento de energía. Pero en un mundo prebiótico, antes de que existieran células vivas con instrucciones del ADN para secuenciar aminoácidos, ¿cómo se construyeron esas enzimas? Se trata de un problema de interdependencia desconcertante y sin salida. Resulta casi imposible imaginar la síntesis del ADN (o del ARN) sin unos componentes enzimáticos basados en proteínas que catalicen el engarce entre sí de los nucleótidos, y resulta igualmente difícil imaginar cómo esas enzimas necesarias, compuestas de cientos de miles de aminoácidos, se pudieron producir sin las precisas instrucciones del ADN, que las enzimas leen a partir de «copias de trabajo» constituidas por cadenas de una sola hebra de ARN.

Hoy en día, muchos científicos piensan que el enigma del origen de la vida se ha reducido a dos preguntas fundamentales. La primera es un problema tipo «la gallina o el huevo»: ¿qué vino primero: los genes que transportaban el código necesario para crear proteínas, o bien las proteínas enzimáticas capaces de catalizar la síntesis de los genes? La segunda pregunta es: fuera lo que fuera que apareció primero, ¿cómo se creó? Hay numerosas teorías que intentan resolver estos problemas, y una de ellas atribuye al suelo en sí —y, para ser más precisos, a los minerales arcillosos— el papel protagonista.

La idea no es nueva. Durante miles de años, antes de que hubiera ninguna explicación científica disponible,

los humanos ya vinculaban el suelo con la vida. En el capítulo segundo del Génesis, se nos dice: «Dios Nuestro Señor formó al hombre a partir del polvo del suelo». Resulta apropiado que, en ese relato bíblico, la primera persona en pasearse por el Jardín del Edén se llamara Adán, un nombre basado en la palabra hebrea que significa «suelo o arcilla», *adama*. Y el sustantivo latino *homo*, hombre, el mismo que usamos en nuestra designación género-especie *Homo sapiens*, deriva de *humus*, que se puede traducir como «relativo al suelo o la tierra». Muchas culturas nativas norteamericanas sienten una conexión particularmente fuerte con el suelo, tal como se refleja en la respuesta que dio el jefe Seattle en 1852 a la oferta del gobierno norteamericano para comprarle el territorio Noroeste a su tribu: «¿Cómo podemos comprar o vender el cielo o la tierra? La idea nos resulta extraña [...]. Formamos parte de la tierra y ella de nosotros».¹⁰

La explicación científica de la conexión entre el suelo y la vida tiene sus cimientos en la química básica. Sugiere que las superficies cargadas de electricidad estática de los minerales arcillosos sirvieron de enzimas primitivas y suministraron los emplazamientos catalíticos de los primeros procesos complejos de biosíntesis de la Tierra. Algunas de las macromoléculas resultantes pudieron ser cadenas simples de ácidos nucleicos, mientras que otras fueron cadenas de aminoácidos. Otra versión más radical de esta teoría sostiene que los cristales de arcilla en sí fueron los primeros «genes rudimentarios» autorreplicantes de la Tierra. Aquellos cristales de arcilla crecientes no estaban realmente vivos, pero sí fueron capaces de evolucionar y modelar su entorno de forma simple. La supervivencia y réplica de algunos de aquellos cristales pudo haberse visto favorecida por la incorporación de aminoácidos o

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

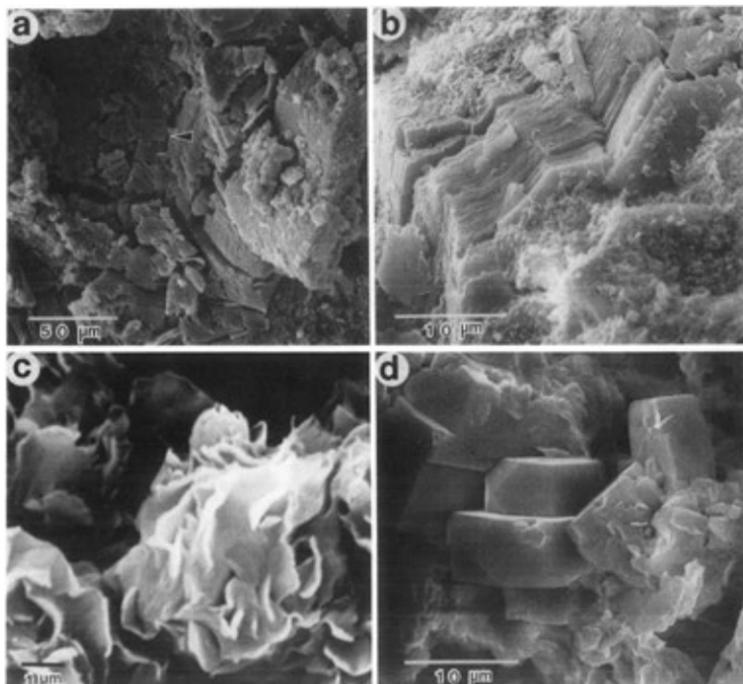


FIGURA 1.1. Micrografías de varios cristales de arcilla. Tomadas de A. L. Senkayi *et al.*, *Clays and Clay Minerals*, 32 (1983), pp. 259-271.

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.

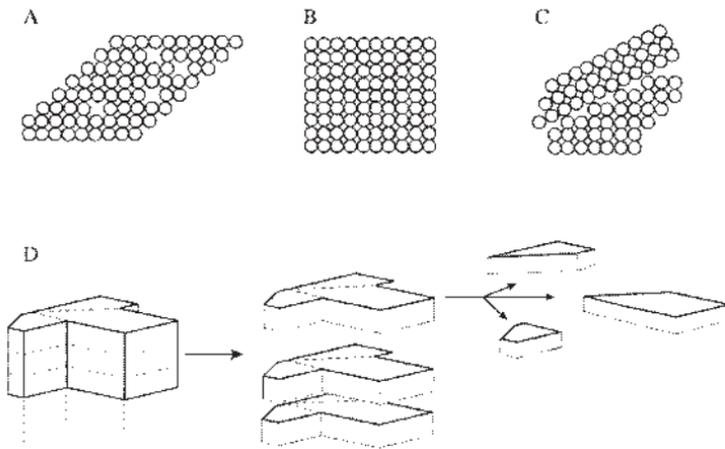


FIGURA 1.2. Entre los defectos comunes de los cristales de arcilla se cuentan: (a) la desaparición de componentes moleculares dentro de un entramado, (b) las sustituciones de componentes individuales y (c) una desalineación entre secciones del entramado. Esta clase de defectos son análogos a las mutaciones 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.