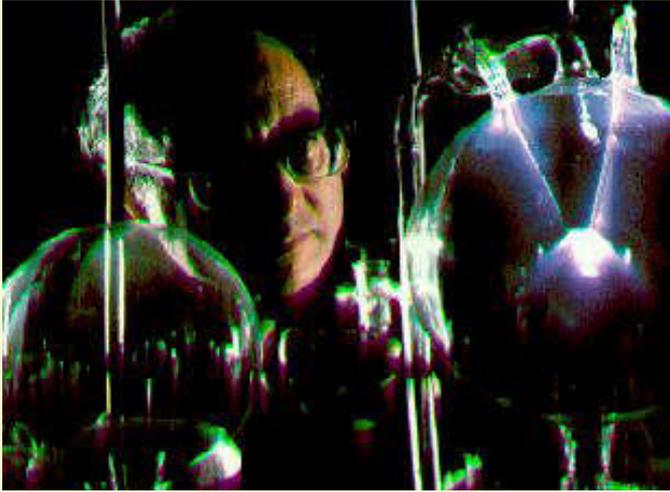


¿CÓMO COMENZÓ LA VIDA?



Por: **Frank Zindler**

Traducido y adaptado por **Ferney Yesyd Rodríguez**

Procedencia del texto:

<http://www.sindioses.org/cienciaorigenes/biopoyesis01.html>

www.omegalfa.es

Biblioteca Virtual

¿CÓMO COMENZÓ LA VIDA?

Por: Frank Zindler

Traducido y adaptado por Ferney Yesyd Rodríguez*

www.omegalfa.es
Biblioteca Virtual

Contenido

Parte 1: Abordando el problema

Parte 2: Polvo estelar en la Sopa Primordial

Parte 3: Las primeras células

"Y el Señor Dios formó pues al hombre del barro de la tierra, y sopló en sus narices el soplo de vida y el hombre se volvió un ser viviente. Y el señor Dios había plantado un jardín en Edén, al lado del oriente..." -Génesis 2:7-8

"Pero (y oh! que grande sería) si pudiéramos concebir en algún laguito cálido, con todo tipo de amoníaco, sales fosfóricas, luz, calor y electricidad, etc., presentes que se formará químicamente pronto un complejo de proteínas para sufrir cambios aún más complejos..." -Charles Darwin, Carta de 1871

* El ensayo original está disponible en "American Atheist Magazine" número de febrero. Se permite la reproducción de este ensayo para fines educativos y/o científicos siempre y cuando se mencione claramente nuestro sitio web, así como el nombre del autor del mismo. Se prohíbe su reproducción con fines comerciales. marzo y abril de 1989.

Procedencia del texto:

<http://www.sindioses.org/cienciaorigenes/biopoyesis01.html>

Parte 1: Abordando el problema

Pasó mucho tiempo para que los europeos comenzasen a pensar sobre el origen de la vida en términos naturalísticos. Antes del desarrollo de la bioquímica moderna, no era siquiera posible definir lo que era la vida, mucho menos buscar su origen. Más aún el estrangulamiento intelectual resultante del triunfo del cristianismo en el mundo occidental duró bastante después del período conocido como el "Iluminismo" que floreció en el siglo XVIII. El pensamiento mágico que permeaba las sociedades cristianas hizo imposible, aún para los grandes científicos, contemplar el origen de la vida en términos puramente materialistas.

Una de las grandes ironías de la historia de la ciencia es que un gran avance en el entendimiento científico causó un retroceso importante en la búsqueda del origen de la vida. En la década de 1860 cuando el coloso de la ciencia francesa, Luis Pasteur refutó la hipótesis de la generación espontánea —la idea que la vida puede provenir de la materia inerte (por ejemplo las larvas a partir de la carne en descomposición, o las bacterias a partir de un caldo de carne)—, él efectivamente rehusó la noción que sería científicamente respetable sustentar de que la vida podía haberse originado espontáneamente en el pasado remoto. Pasteur, a pesar de sus magníficos descubrimientos en lo que hoy se denomina enzimología, permaneció como católico romano durante toda su vida. De hecho, se dice que Pasteur murió con un crucifijo en una mano y tomado de su esposa con la otra. A pesar de sus estudios pioneros en los fundamentos puramente químicos de las células vivas, parece que él nunca desistió completamente de las creencias vitalistas que proliferaban tan fácilmente en la época religiosa en la que vivió. Ahora se sabe que él, en particular, admitía la posibilidad que la vida podía surgir espontáneamente como resultado de una "fuerza asimétrica" actuando en la materia orgánica e inorgánica.

Los vitalistas, debe recordarse, creían que los seres vivos no podían explicarse completamente en términos de materia y energía comunes. Traducido a un lenguaje más moderno la visión inherente del pasaje del Génesis citado arriba, los vitalistas creían que los seres vivos diferían de las cosas inertes debido a la posesión de un *elán* vital -una fuerza vital. Lo que debería haber sido un golpe fatal para esa idea realmente surgió en 1828 cuando el químico alemán Friedrich Wöhler sintetizó el compuesto orgánico urea a partir de cianuro de amonio, una sustancia inorgánica. (Los compuestos orgánicos fueron llamados así porque solo se encontraban en los organismos). Cuando Wöhler demostró que no eran necesarios riñones vivos para producir esta humilde sustancia, disipó mucha de la mística que había envuelto la química de la vida. En la época de los experimentos elegantes de Pasteur, con los que refutó la idea de la generación espontánea, se habían sintetizado diferentes sustancias "orgánicas" en los laboratorios. Una visión mecanicista de la vida estaba avanzando con firmeza, pero la autoridad de Pasteur la congeló: Tan solo en los años 1920 es que una visión completamente mecanicista y materialista de los sistemas vivos puede surgir y volver su atención hacía el problema de cómo surgió la vida en la Tierra primordial.

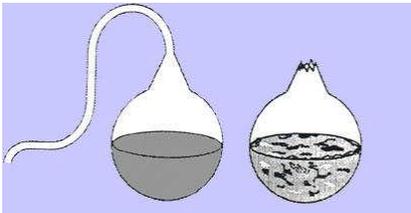


Figura 1. El experimento de Pasteur con el frasco de cuello de cisne. Pasteur colocó caldo en un frasco que fue esterilizado por ebullición. El cuello del frasco se modeló en forma de "cuello de cisne" para permitir que el aire entrara en la cámara del caldo pero que sirviese como trampa para las bacterias suspendidas en el aire. Para impedir que las bacterias fuesen succionadas

hacia dentro del frasco con el flujo de aire cuando el caldo hervido se enfriase, el aire que entraba fue esterilizado por una lámina de platino al rojo vivo temporalmente conectada a la boca del frasco. Cuando el cuello del frasco no fue quebrado el caldo permaneció claro y libre de bacterias, mientras que si el cuello se quebraba el caldo se volvía turbio y lleno de bacterias. Esto probaba que las bacterias tenían que haber venido con el aire y no habían sido creadas espontáneamente por el mismo caldo.

No sorprende que los primeros esfuerzos substanciales para estudiar el origen de la vida desde un punto de vista natural viniesen de la Unión Soviética, donde los puntos de vista completamente ateos estaban li-

bres para florecer, y de Inglaterra, donde la tradición Darwiniana siempre creciente habían vuelto a la Iglesia Anglicana tan impotente como la Monarquía. El teórico ruso fue un hombre llamado Alexander I. Oparín, y el pensador británico era el pensador ateo multifacético J. B. S. Haldane.

Fue en 1924 cuando Oparín divulgó sistemáticamente sus ideas de cómo la vida podía haberse originado, con la publicación de un pequeño libro titulado "*El Origen de la Vida*"^[1]. Este fue ampliado a un tratado mayor, "*El origen de la vida en la Tierra*"^[2] que sufrió revisiones progresivas a lo largo de la vida del autor (la tercera edición fue publicada en 1957). La primera publicación de Haldane sobre el asunto (en el que presenta la idea de la "sopa caliente y diluida", a la cual ahora llamamos "sopa primordial"), hasta donde puedo determinar apareció en 1928, en un ensayo publicado en *Rationalist Annual*.^[3]

Una vez que el tabú contra la investigación científica del origen de la vida se quebró, científicos de todo el mundo fueron tras el asunto, y los últimos 50 años atestiguan un crecimiento explosivo de informaciones e ideas relacionadas con el problema de la biopoyesis (la formación de sistemas vivos). Hoy, la Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida publica un buen periódico *Orígenes de la vida y evolución de la biosfera* "Origins of Life and Evolution of The Biosphere", que está enteramente dedicado al asunto de la biopoyesis. A la vez debemos admitir que no tenemos aún una teoría abaricante que explique la biopoyesis con un grado de confiabilidad y amplitud —como la del origen de las especies, o aún la del origen de los sistemas estelares y planetarios— pero nos estamos acercando rápidamente a tal teoría a una velocidad animadoramente rápida. No pasa una semana sin algún nuevo relato de descubrimientos relevantes para el problema de la biopoyesis.

¹ Alexandr I. Oparin, *Proiskhozhdenie Zhizni* [The Origin of Life] (Moscow: Izd. Moskovskii Rabochii, 1924).

² Alexandr I. Oparin, *Vozniknovenie Zhizni na Zemle*, 1ª ed. (Izd. Akad. Nauk SSSR, 1936); *The Origin of Life on Earth*, 3d English ed., trad. Ann Synge (New York: Academic Press, Inc., 1957).

³ Haldane, "The Origin of Life," *Rationalist Annual*, 1928; *Science and Human Life* (reedição; New York and London: Harper & Brothers, 1933). *Voltaar*

Fue, sin embargo, el propio Charles Darwin quien resolvió el problema que surgió con el experimento de Pasteur. En una carta citada en el inicio de este artículo, él explicó por qué la demostración de Pasteur de que la vida no surge espontáneamente hoy no prueba la noción de que la vida no podía haberse originado espontáneamente *en los primeros días* de la Tierra.

Con frecuencia se dice que todas las condiciones para la primera producción de un organismo vivo están presentes, que podrían haber estado siempre presentes. Pero (y oh! que grande sería), si pudiésemos concebir en algún laguito cálido con todo tipo de amoníaco, sales fosfóricas, luz, calor y electricidad, etc., presentes que se formará químicamente pronto un complejo de proteínas para sufrir cambios aún más complejos, en la época actual tal material podría ser instantáneamente devorado o absorbido, lo que no era el caso antes que las criaturas vivas se formasen.[⁴]

Resumiendo, es la presencia de la vida ya desarrollada lo que impide la emergencia de nueva vida en la Tierra. Darwin puede también notar que el frasco de Pasteur era además pequeño para permitir los trillones de diferentes interacciones químicas que deben ser necesarias, y que la vida de Pasteur era además corta para juzgar procesos que deben haber exigido millones de años para que fueran concluidos. Los científicos que intenten construir modelos teóricos de procesos que se han extendido por enormes volúmenes de espacio y vastos períodos de tiempo tienen que encontrar modos de escalar tanto el tiempo como el espacio. Fue apenas en los años recientes que comenzamos a descubrir como proyectar experimentos en los cuales escalonábamos el tiempo y el espacio.

Aunque Oparín consagró una considerable atención al problema que Pasteur opuso a los estudios del origen de la vida, Haldane no se impresionaba con la autoridad francesa. En su ensayo de 1928 "El origen de la Vida" él descartó los experimentos de Pasteur en un párrafo:

⁴ Oparin, The Origin of Life on Earth, p. 79.

*"Es difícil afirmar que cualquier lapso de tiempo disminuirá la gloria de las realizaciones positivas de Pasteur. Él, curiosamente, publicó pocos resultados experimentales. Un cínico sugirió que toda su obra no recibiría un doctorado de filosofía hoy en día! Pero cada experimento era definitivo. No he sabido nunca de alguien que haya tenido que repetir cualquiera de los experimentos de Pasteur con resultados diferentes de los del maestro. Aunque sus deducciones a partir de sus experimentos fueron algunas veces precipitadas. No es, tal vez, totalmente irrelevante que él haya tenido que trabajar, en sus últimos años, con la mitad del cerebro. Su hemisferio cerebral derecho fue severamente dañado por la ruptura de una arteria cuando apenas tenía 45 años, y los cerebros de los microbiólogos que le sucedieron mal compensaron ese accidente. Aún así durante su vida algunas de las conclusiones que dedujo de su trabajo experimental fueron desaprobadas. Él había dicho que la fermentación alcohólica era imposible sin la vida. Buchner la obtuvo con un extracto de lúpulo y libre de células. Y desde su muerte la brecha entre la vida y la materia no viva se ha disminuido grandemente."*⁵]

Antes de examinar los escritos de Oparín, Haldane, o de los investigadores subsiguientes que se apoderaron del problema de la biopoyesis, es necesario considerar primero lo que queremos explicar puntualmente. ¿Qué es exactamente la vida? Ignorando por un momento la cuestión de si los virus deben considerarse seres vivos podemos notar que todas las formas universalmente consideradas como vivas comparten ciertas características básicas. Por ejemplo, los seres vivos son celulares en su estructura y están conformadas por lo menos por una célula—un objeto gelatinoso rodeado por una membrana estructuralmente dinámica compuesta de lípidos (sustancias grasas) y proteínas—. Todos los seres vivos son capaces de reproducirse, por lo menos al nivel celular (las hormigas obreras y las monjas católicas, no tienden a reproducirse a nivel orgánico).

⁵ Haldane, *Science and Human Life*, pp. 143-144.

Todos los seres vivos son capaces de cambios evolutivos, es decir, producir descendencias diferentes, que difieren entre ellas en un cierto grado. Los seres vivos interactúan con su ambiente (eliminando desechos e ingiriendo materiales brutos necesarios para producir energía), sustituyen partes dañadas, y crecen. La energía producida puede ser mecánica (usada para el movimiento) o química (usada para sintetizar los componentes de la célula) La energía luminosa también puede ser absorbida y usada por algunas células, y ciertos tipos de células pueden aún producir luz - aunque la producción de luz no se considera un proceso fundamental para los sistemas vivos en general.

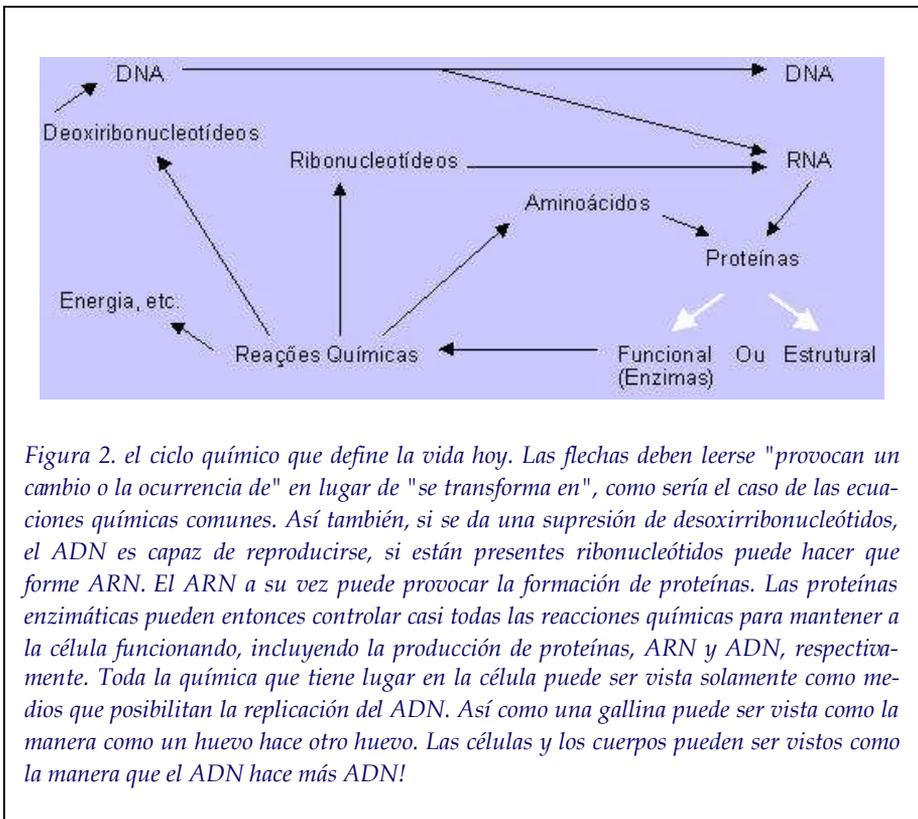


Figura 2. el ciclo químico que define la vida hoy. Las flechas deben leerse "provocan un cambio o la ocurrencia de" en lugar de "se transforma en", como sería el caso de las ecuaciones químicas comunes. Así también, si se da una supresión de desoxirribonucleótidos, el ADN es capaz de reproducirse, si están presentes ribonucleótidos puede hacer que forme ARN. El ARN a su vez puede provocar la formación de proteínas. Las proteínas enzimáticas pueden entonces controlar casi todas las reacciones químicas para mantener a la célula funcionando, incluyendo la producción de proteínas, ARN y ADN, respectivamente. Toda la química que tiene lugar en la célula puede ser vista solamente como medios que posibilitan la replicación del ADN. Así como una gallina puede ser vista como la manera como un huevo hace otro huevo. Las células y los cuerpos pueden ser vistos como la manera que el ADN hace más ADN!

A parte de las características citadas —las cuales se pueden encontrar en un libro didáctico de segundo grado desde 1920— podemos notar que todas las formas de vida modernas pueden ser vistas como sistemas conteniendo información, en los cuales ésta (específicamente las

instrucciones de cómo construir un organismo vivo de acuerdo con ciertas especificaciones) está almacenada en unas moléculas gigantes y autorreplicantes (los genes), que son mantenidos por un ciclo regular de cambios químicos involucrando diferentes tipos subordinados de moléculas. El ciclo químico que llamamos vida se muestra en la Figura 2. Los lectores notarán que la molécula que es la piedra fundamental en el ciclo químico de la vida es el ADN (ácido desoxirribonucleico) -la materia de la que los genes están hechos-. Dados los materiales brutos apropiados (moléculas de tamaño medio llamadas desoxirribonucleótidos), las moléculas de ADN son capaces de reproducirse. Entre tanto, para producir los materiales brutos es necesario un cierto número de reacciones químicas.

Como se puede inferir de la figura 2, casi todas las reacciones químicas en las células son reguladas por enzimas -proteínas que son capaces de acelerar las reacciones químicas, y hacer que estas sean realizadas con una alta precisión. Las enzimas, entretanto, como todas las proteínas, requieren la ayuda del ARN (ácido ribonucleico) para formarse. El ARN a su vez depende de la información almacenada en el ADN para contruirse. ¿Cómo comenzó ese ciclo de reacciones químicas interconectadas? Ese es el problema fundamental que tenemos que resolver.

En busca de lo primitivo

Es bastante cierto que los primeros seres vivos no eran elefantes ni orquídeas -y mucho menos seres humanos, como afirma Génesis 2:7! Por lo tanto para ayudar al esclarecimiento de los primeros seres vivos debemos olvidar tales formas complejas y altamente evolucionadas. De modo también obvio, los primeros seres vivos eran extremadamente primitivos y simples -más simples que cualquiera de los organismos de hoy en día. En la búsqueda de la naturaleza de los primeros seres vivos, claramente debemos estudiar las formas de vida más simples disponibles, en lugar de preocuparnos con organismos complejos como amapolas o pingüinos. Si pudiéramos conocer los orígenes de los

organismos más simples conocidos, el resto del mundo vivo puede ser explicado por los principios conocidos de la transformación evolutiva.

En la búsqueda de las formas más primitivas de vida tenemos que bajar mucho -aún más bajo que los tele-evangelistas. Eso reduce el campo a apenas dos candidatos: los virus y las bacterias. Si bien los virus son estructuralmente más simples que las bacterias, no parece que ellos sean más primitivos que estas. Más aún, existe una discusión sobre si ellos son completamente "vivos".

Los virus no tienen una estructura celular y están típicamente formados por dos componentes: una molécula núcleo de ADN o ARN, y una cáscara o envoltura compuesta por una pequeña variedad de moléculas proteicas. Muchos virus son tan simples que fueron sintetizados en el laboratorio hace años. Todos saben que los virus son parásitos, aunque porten información genética sobre como reproducirse, en realidad ellos solo consiguen hacerlo en el interior de las células de otros organismos, y es realmente el organismo hospedero el que provee la maquinaria para reproducir los virus!

No se conoce ningún virus de vida libre. Al contrario de todas las cosas indiscutiblemente vivas que se conocen, los virus se pueden cristalizar como la sal y el azúcar, y ser almacenados indefinidamente; una vez redisueltos son capaces de infectar las células hospederas, como si su "ciclo de vida" nunca se hubiese interrumpido!

En lugar de ser los virus los conectores entre los mundos vivo y no vivo, como antes se supuso, estos parecen ser ahora el producto de una larga evolución y representan el *no plus ultra* de reducción parasitaria. Así como los parásitos animales como la tenía pierden los ojos, el aparato digestivo y otras características anatómicas que sus ancestros de vida libre poseían, los virus parecen haber perdido todo menos lo absolutamente esencial, lo que los vuelve los parásitos más perfectos del mundo. Al haber perdido hasta la estructura celular, los virus son esencialmente "genes desnudos"-cubiertos apenas en unas pocas proteínas, que son necesarias para facilitar la entrada a las células hospederas y en la subversión de su maquinaria metabólica.

Si los virus no son las formas de vida más primitivas hoy en día, entonces debemos buscar entre las bacterias y sus semejantes -los llamados procariontes. A diferencia de los eucariontes (organismos con células que contienen núcleo y otras organelas complejas como los cloroplastos y las mitocondrias), los procariontes se caracterizan por una completa austeridad de construcción. Su genoma (o su conjunto completo de genes), en vez de estar organizado en cromosomas y estar rodeado por una membrana nuclear, típicamente consiste de un filamento largo y circular de ADN que está unido a la membrana celular. Para mantener su simplicidad general, las células procariotas tienden a ser menores que las células eucariotas: cuando hay menos por ser empacado el paquete es menor.

De todos los procariotas conocidos hoy, los menores y menos complejos son los micoplasmas, organismos semejantes a los de la pleuroneumonía (OSPN). Irónicamente estos organismos fueron descubiertos por Luis Pasteur, pero él fue incapaz de aislarlos y verlos, porque los microscopios electrónicos eran tan difíciles de encontrar como el actual rey de Francia. La pequeñez (y la simplicidad necesaria) de esos organismos es difícil de imaginar sin ayuda.

En un artículo clásico escrito hace ya tiempo en *Scientific American*,^[6] Harold Morowitz y Mark Tourtellotte hicieron algunas comparaciones para ayudar a los lectores a visualizar exactamente lo pequeños que son esos organismos. Los menores cuerpos elementales (de las OSPN) tienen cerca de 0,1 micra de diámetro -cerca de un décimo de diámetro de una bacteria común-. Eso es un centésimo del tamaño de las células de los tejidos de un mamífero, y cerca de un milésimo de diámetro de una ameba. Aún así, una célula OSPN está tan cerca del tamaño de un átomo como lo está de un protozooario de 100 micras! (ver Figura 3). Una medida mejor de su simplicidad es su masa, al darse el peso como una noción de la cantidad de materia que realmente está empacada dentro de la célula. Considerado en términos de masa, una ameba es un millón de veces mayor que una OSPN, y una rata de laboratorio es casi un billón de veces mayor que una ameba.

⁶ Harold J. Morowitz and Mark E. Tourtellotte, "The Smallest Living Cells," *Scientific American*, Marzo 1962, pp. 117-126. Voltar

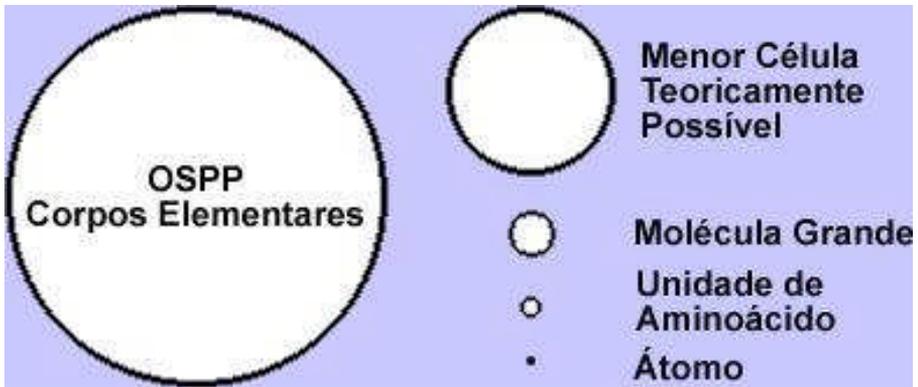


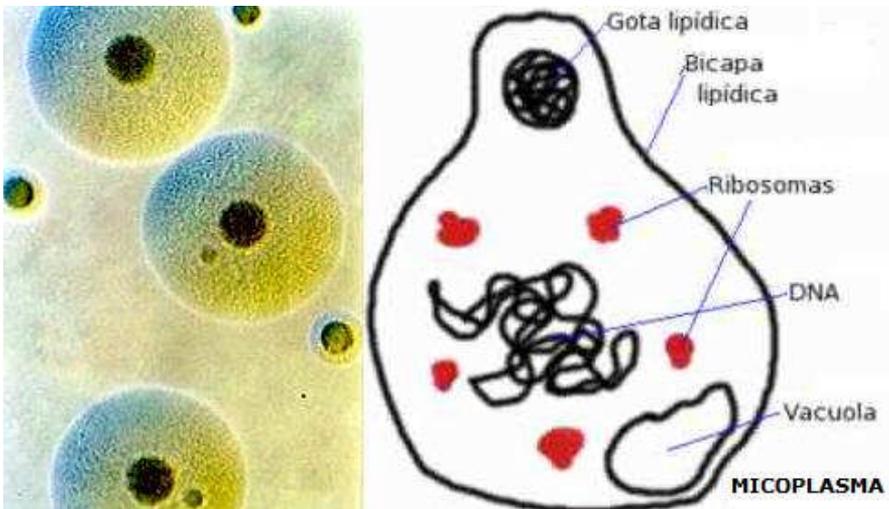
Figura 3. El cuerpo elemental (célula reproductiva) de un OSPN (organismo semejante a los de la pleroneumonía) comparado en tamaño a la menor célula teóricamente posible y a los componentes atómicos y celulares que la forman.

Hay límites teóricos de que tan pequeña puede llegar a ser una entidad auto-reproductora, y un número mínimo de "moléculas funcionales" que esta puede contener. El cuerpo elemental del OSPN está muy próximo a esa menor célula teórica, tan solo apenas dos veces su diámetro y ocho veces su masa. En términos de contenido molecular, el cuerpo elemental del OSPN es lo bastante simple para que la síntesis en el laboratorio no este del todo por fuera de los límites de las posibilidades en un futuro próximo.

Algunos números:

La menor célula hipotéticamente posible tendría que tener como mínimo 1,5 millones de átomos (sin contar los átomos de las moléculas de agua). El cuerpo elemental del OSPN contiene 20 millones de átomos. La molécula de ADN que codifica el cuerpo del OSPN tiene un peso molecular 2,88 millones de daltons, y la menor molécula teóricamente adecuada pesaría cerca de 360.000 daltons (un dalton tiene aproximadamente el peso de un átomo de hidrógeno), en términos de número de aminoácidos y unidades de nucleótidos necesarios (los

bloques de construcción de las proteínas y del ADN y el ARN respectivamente), el OSPN sobrevive con apenas 600.000, comparado con el límite posible de 75.000 (en comparación un OSPN "adulto" contiene cerca de 9,4 millones de tales bloques de construcción y las bacterias contienen números mucho mayores). La estadística más animadora, es la del pequeño número de macromoléculas (proteínas, ADN y ARN) necesarias para mantener un cuerpo elemental de OSPN funcionando: cerca de 12.000. Ese número es tan pequeño que se requiere ser patológicamente escéptico para sugerir que la creación de tal organismo en laboratorio será siempre imposible.



Está claro que la creación de un OSPN en el laboratorio no sería la prueba de que la vida tenía que haberse originado sin una orientación inteligente. Esa será nuestra tarea en la parte II ("Polvo estelar en la sopa primordial") y en la parte III ("Las primeras células") de ese artículo para mostrar que es posible simular las condiciones de la Tierra primitiva, y para explicar de comienzo como la química de la vida pudo haberse originado sin una inteligencia, y entonces como la organización dinámica de los sistemas vivos puede iniciarse.

Terminamos la Parte I con la certeza de que las formas de vida más simples hoy en día son de hecho muy simples, y que estas son un alivio realista para dirigir una tentativa a entender origen de la vida en el planeta Tierra. Estas no poseen cosas superfluas que nos desvíen de nuestra búsqueda, y nos permiten reconstruir los estadios intermedios que deben haberse desarrollado en la transición de lo prebiótico hacia el mundo de la vida. En las partes II y III veremos que la vida es un producto natural de la química cósmica, y que no hay necesidad de invocar poderes sobrenaturales o lo que quiera que sea - para introducir en las producciones de la Tierra el pulso de la vida.

Parte 2:

Polvo estelar en la Sopa primordial

El polvo de estrellas no está solo para componer canciones. Es la materia de la cual está hecha la vida. La vida es un fénix nacida de las cenizas cósmicas lanzadas en el espacio por los estertores de la muerte de las estrellas que ya no brillan más sobre nuestras cabezas. Nuestro Sol no estaba en la primera generación de estrellas formadas cuando el Big-Bang hizo posible la condensación de la energía y la materia, y la agregación de la materia en nebulosas y estrellas. Los teóricos nos dicen que las primeras estrellas estaban compuestas principalmente por hidrógeno, y que aún puede haber existido una gran cantidad de helio primordial, con trazas de litio y berilio. El material emanado en la explosión que generó el universo no contenía carbono ni nitrógeno, ni oxígeno, ni cualquier otro de los elementos más pesados que contienen nuestros cuerpos, o nuestro planeta, o nuestra estrella el Sol. Algunos de aquellos elementos, particularmente los más livianos, fueron generados por la fusión del hidrógeno primordial en las entrañas feroces de las estrellas de la primera generación. La mayoría de los elementos pesados, no parecen haberse formado durante la vida de esas estrellas sino durante sus muertes explosivas, cuando ellas se transformaron en novae o supernovas.

Ahora se vuelve claro que nuestra estrella de día, el Sol, como la vida que con él comenzó es también un fénix. Esta estrella surgió de las cenizas y de los gases crematorios lanzados en el espacio cuando las estrellas más viejas explotaban —como reactores nucleares de presión explotando por sus válvulas— creando vastas nubes funerarias, o nebulosas, de polvo y gas en las regiones interestelares de nuestra galaxia. A partir de la recondensación de tales nebulosas, tal vez llevada a cabo por una onda de choque ocasionada por una nova o una supernova, nació nuestro sol, con su séquito de planetas, satélites y cometas.

El mundo era un lugar muy diferente antes de haber dado luz a la biosfera. Sin la cobertura vegetal en la superficie de costra protocontinental la fuerza de la erosión era mucho más formidable de lo que es ahora. Hoy el flujo de las aguas lluvias se ha suavizado y ralentizado por la capa verde de vegetación que protege la superficie planetaria del ataque de la violencia aérea. Una capa de ozono, en la alta estratosfera, protege la vegetación de los rayos destructores del flujo del luz ultravioleta proveniente del Sol. Pero no siempre fue así.



Antes del advenimiento de las algas y sus descendientes, las plantas verdes, había muy poco oxígeno libre en la atmósfera. Antes que hubiesen plantas y algas, no había fotosíntesis capaz de producir oxígeno como subproducto⁷ y el único oxígeno libre que podría encontrarse en camino a la atmósfera de la Tierra debía haber sido una pequeña cantidad resultado de la ruptura de las moléculas de agua inducidas por la radiación en la atmósfera superior.

El oxígeno es una sustancia altamente reactiva, y no permanece durante mucho tiempo en la atmósfera. Es una continua reacción quemando

⁷ Existe una forma primitiva de fotosíntesis encontrada en ciertas bacterias que, si bien utilizan la energía de la luz, no producen oxígeno como subproducto.

material orgánico para producir dióxido de carbono, y oxidando el hierro y otros materiales en la corteza de la Tierra para producir capas rocosas con óxidos de hierro (redbeds). Si toda la vida súbitamente fuese extinta, dentro de aproximadamente dos mil años apenas habría cantidades insignificantes de oxígeno en la atmósfera! Es bastante obvio, por lo tanto, que antes de la existencia de seres vivos la atmósfera carecía de oxígeno.

El hecho que la atmósfera primitiva no tuviera oxígeno fue bueno durante los períodos en los cuales la vida surgió, pues el oxígeno es un enemigo feroz de todas las moléculas necesarias para la vida. Con oxígeno presente en la atmósfera los azúcares, aminoácidos y todos los otros compuestos que contienen carbono necesarios en la estructura de las células habrían sido destruidos poco después de su formación o -lo más probable- tendrían que haberse formado en primer lugar. Uno de los motivos para que la vida no se origine espontáneamente hoy es que la presencia de oxígeno lo hace imposible. (El otro motivo, ya conocido por Charles Darwin hace más de un siglo, es que cualquier molécula orgánica que se formase espontáneamente hoy en día sería devorada por los organismos ya vivos antes que pudiese realizar las organizaciones complejas necesarias para su autorreplicación). Aún así, hoy tenemos remanentes de una Tierra antes del oxígeno en muchas especies de microorganismos anaeróbicos que viven en nuestras heridas o que envenenan nuestros vegetales conservados de manera inapropiada. Prosperando en la ausencia de oxígeno, esos organismos primitivos son destruidos por el mismo gas que alimenta los "fuegos" de las formas de vida más altas.

Si bien nosotros poseemos una buena certeza de que la atmósfera de la Tierra no tenía oxígeno (y el escudo protector de su forma derivada, el oxígeno) en la época en que la vida evolucionó, hay dudas considerables sobre cual era su composición. Parece claro que la composición de la atmósfera cambió durante los primeros 500 millones de su existencia - el período durante el cual la vida se originó. Argumentando por analogía con las atmósferas de los planetas gigantes, tales como Júpiter y Saturno, los primeros estudiosos de la biopoyesis (el origen de la vida) asumieron que la atmósfera primitiva era bastante "reduc-

tora"[⁸] conteniendo sustancias como el hidrógeno (H₂), el vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), el amoníaco (NH₃), y el gas sulfhídrico (H₂S), etc.

Muchos de los primeros experimentos intentaron descubrir qué tipos de moléculas se podrían formar espontáneamente (las cuales examinaremos en seguida) empleando ese tipo de atmósfera. A pesar de que los persistentes es-



fuerzos por localizar rocas sedimentarias antiguas que tengan evidencia de haber sido expuestas a tal atmósfera han sido bastante frustrantes, y la mayoría de los estudiosos hoy sienten que la atmósfera - generada por las emanaciones volcánicas durante la separación y consolidación del núcleo de la Tierra- contenía principalmente hidrógeno, vapor de agua, nitrógeno (N₂), monóxido de carbono (CO) y gas sulfhídrico, con cantidades menores de metano, dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de azufre (SO₂). Hay motivos para suponer que esta se transformó gradualmente hasta una atmósfera compuesta principalmente de vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno y dióxido de azufre, con cantidades menores de monóxido de carbono, metano, gas sulfhídrico e hidrógeno. Yo no me sorprendo en que no hayamos encontrado cualquier roca del período más antiguo de la historia de la Tierra.

Nosotros sabemos hoy que la corteza terrestre está siendo continuamente reciclada por las fuerzas que causan la deriva continental; cuan-

⁸ Diferentes definiciones de reducido y oxidado se pueden encontrar en la literatura de química. Originalmente, 'oxidar' significaba adicionar oxígeno, y 'reducir' significaba adicionar hidrógeno, generalmente para substituir oxígeno. Una definición más moderna y genérica de 'oxidar' incluye la remoción del hidrógeno o de un electrón de una molécula, y 'reducción' es su adición. Se dice que los materiales ricos en hidrógeno son 'reducidos'.

to más viejo es un pedazo grande de tierra, mayor es la probabilidad de que ésta haya sido reciclada en los cinco mil millones de años en los que nuestro planeta ha existido. Más aún, hay motivos para creer que una atmósfera primitiva como fue asumida por los primeros investigadores no podría haber existido por mucho tiempo. Bien rápido, creo yo, ésta habría agotado componentes tales como el metano, el amoníaco, etc, por su conversión en los compuestos bioquímicos de los cuales las primeras cosas vivas se desarrollarían. Puede haberse demorado apenas unos pocos millones de años para que tal atmósfera haya sido sustituida por la menos reductora, hoy aceptada por la mayoría de los estudiosos. ¡Es muy probable que la evolución de los sistemas vivos ya estuviese ocurriendo en la época en que las rocas sedimentarias se formaron en cantidades significativas!

A pesar de las dudas que envuelven la naturaleza de la atmósfera primitiva de la Tierra, los científicos que buscan explicar los orígenes de los compuestos químicos necesarios para la formación de las células vivas se han enfrentado con más soluciones posibles de las que pueden manejar en el momento. Por ejemplo, se demostró, en ambientes simulados³, que los aminoácidos (los bloques de construcción de las proteínas) y otros compuestos bioquímicos importantes pueden haberse formado en un ambiente muy reductor, semejante a la atmósfera de Júpiter como en una atmósfera menos reductora hoy aceptada por la mayoría de los estudiosos. De hecho, cualquier atmósfera posible (o sea, una atmósfera libre de oxígeno) puede ser usada para generar un amplio espectro de los compuestos bioquímicos críticamente importantes.

Estos hechos son muy alentadores para las personas que buscan una respuesta no mágica a la pregunta "¿Cómo comenzó la vida?"; sin embargo, son frustrantes para los científicos que buscan respuestas muy precisas para todas las preguntas. Nuestra frustración aumenta, más aún, cuando percibimos que la atmósfera primitiva puede no haber sido el sitio principal de producción bioquímica: la astronomía espectroscópica muestra que tipos simples de moléculas biológicamente importantes pueden ser encontradas a través de nuestra galaxia, y el análisis de meteoritos (tales como las condritas carbonáceas)

muestran que la mayoría de las biomoléculas estaban presentes en la nebulosa solar aun antes que ésta se empezase a condensar para formar nuestro planeta, con o sin atmósfera!

Ya notamos que tenemos más *fuentes* adecuadas de las que requerimos para la producción de los compuestos químicos necesarios. De igual forma, poseemos más métodos adecuados de producción de los necesarios. Por ejemplo, en 1953 Stanley Miller (por aquel entonces estudiante de doctorado del ganador del Nobel Harold Urey en la Universidad de Chicago) ejecutó un experimento ahora clásico en el cual él simuló los relámpagos de la atmósfera primitiva pasando corrientes eléctricas a través de un cámara de gas que contenía gases semejantes a la atmósfera de Júpiter (ver figura 4). Para el deleite de todo el mundo menos de los creacionistas, Miller analizó "la sopa" resultante después que el experimento funcionó por varios días y descubrió aminoácidos y otras moléculas de importancia biológica. Desde entonces, variaciones del experimento de Miller han presentado casi todos los bloques de construcción químicos necesarios para formar células vivas.

Los relámpagos, entretanto, no eran las únicas fuentes de energía en la Tierra primitiva, y es tranquilizador saber que el experimento de Miller (como también los experimentos con atmósferas menos reducidas) se han hecho de nuevo usando radiación ultravioleta (una fuente de energía extremadamente importante en la Tierra primitiva antes que existiese la capa de ozono), radiación atómica (imitando las formas de alta energía abundantes en la nebulosa solar antes de la formación de la Tierra), y el calor (imitando los efectos del vulcanismo) como fuentes de energía -y en todos los casos fueron obtenidos los mismos resultados generales! La formación de los compuestos bioquímicos necesarios parece ser una consecuencia natural de la química cósmica, una vez dadas las condiciones planetarias minimamente adecuadas.

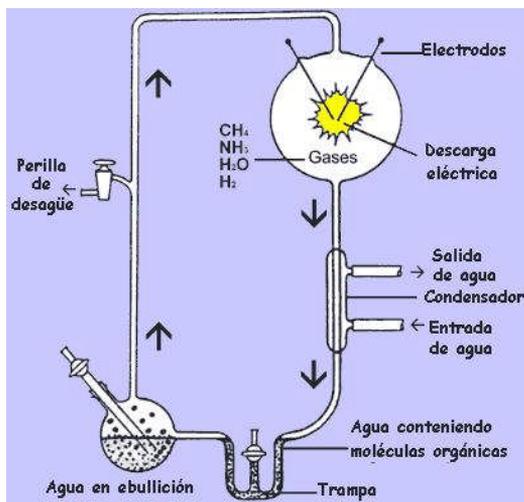


Figura 8. Diagrama del montaje usado por Stanley Miller para simular las descargas de los relámpagos en la atmósfera primitiva. Al condensar vapor de agua en agua líquida y colocando a hervir el agua en el frasco, los gases son forzados a circular en sentido horario y a pasar repetidamente entre los electrodos que descargan corriente. La mayoría de los productos más complejos producidos por acción de la corriente eléctrica sobre los componentes de la atmósfera fueron atrapados en la fase líquida del sistema (donde se podían ser examinados periódicamente durante el curso del experimento) e impedía que fuesen degradados por tener que pasar de nuevo a través de la cámara de descargas.

Los creacionistas afirman que es un fraude colocar una trampa para impedir la pérdida de los productos obtenidos. En realidad, la trampa de agua simula adecuadamente el papel del océano primitivo, en el cual las moléculas recién formadas se asentarían, protegiéndolas así de la desintegración causada por los relámpagos. Los creacionistas también critican variaciones de esas substancias en las cuales se substituyen las descargas eléctricas por radiación ultravioleta. La radiación, dicen ellos, descompondría los bioquímicos después de su formación, y así ninguna cantidad significativa de moléculas podrían acumularse para formar sistemas vivos. Los no-creacionistas, entre tanto, están concientes que la Tierra gira en su eje una vez por día, y que la luz ultravioleta no podría degradar las moléculas durante el período de la noche, cuando las partículas estarían depositándose de la atmósfera hacia los océanos, donde estarían protegidas de la degradación causada por la luz solar que volvería al día siguiente. De hecho, el Principio de Le Châtelier, una regla conocida por los químicos de las universidades en el segundo grado, nos dice que los océanos servirían de trampa aún durante el día para muchas de las moléculas creadas por la luz ultravioleta. Ahora si muchas de las moléculas fuese de hecho degradadas después de su formación, la presencia del mar como un pozo de depósito forzaría la reacción como un todo a proseguir en dirección de la construcción y no de la destrucción.

La química del Cosmos está reflejada en la composición de los elementos de una célula viva común. A pesar de la existencia de más de cien elementos químicos diferentes, aproximadamente el 95% del peso de una célula se debe a apenas cuatro elementos: oxígeno (cerca del 62%), carbono (cerca del 20%) y hidrógeno (cerca del 10%) y nitrógeno (cerca de 3%). En el Universo como un todo, esos cuatro elementos corresponden por cerca del 70% de la masa observada. La importancia universal de esos cuatro elementos es aún mayor si se ignora los elementos químicamente inertes como el helio y el neón, que juntos forman el 28% de la masa del Universo. Si nosotros calculamos las abundancias cósmicas de acuerdo con el número de átomos presentes, en lugar de la masa, los cuatro elementos más importantes representan el 99% de los átomos químicamente activos en el Universo!

Aparte de los "cuatro grandes", los seres vivos contienen un puñado de otros elementos comunes. En orden decreciente de importancia, podemos listar el calcio, fósforo, cloro, azufre, potasio, sodio, magnesio, yodo y hierro. En términos de abundancia cósmica (ignorando lo cuatro grandes y los elementos inertes) el orden relativo de abundancias de elementos es: magnesio, hierro, aluminio⁴, sodio y calcio (aproximadamente iguales en abundancia), fósforo y potasio. La materia de la vida es tan solo la materia común de las estrellas y nebulosas.

A pesar de las cualidades morfológicas de las proteínas de los organismos —encontradas en las formas apropiadas para la vida en nichos tan variados como escapes hidrotermales en el fondo de los océanos, las alturas congeladas de los Himalaya, y los ductos reproductivos de los calamares— a nivel químico los organismos muestran una similitud abrumadoramente simple. Las biomoléculas pertenecen a cuatro categorías principales —lípidos (grasas), carbohidratos (azúcares, almidones y celulosa), proteínas (enzimas y fibras estructurales), y ácidos nucleicos (ADN y ARN)— mas un pequeño número de compuestos "mixtos" importantes, como pigmentos, coenzimas, etc.

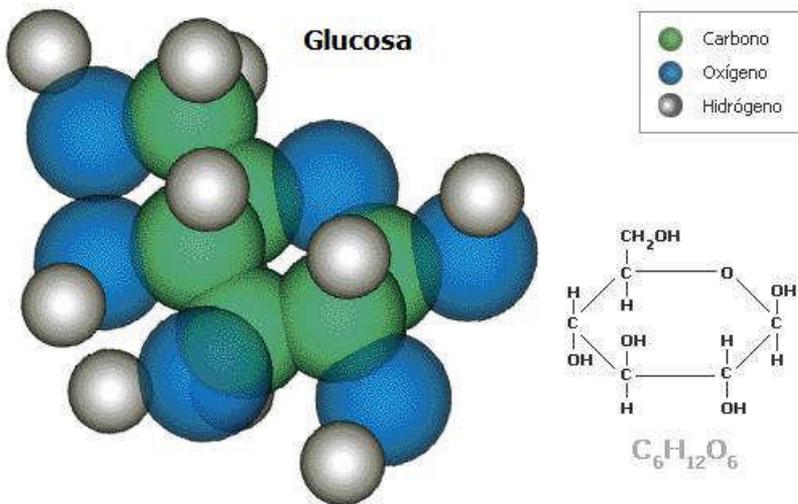
Considerando la lipofobia preponderante en nuestra cultura actual, es importante decir algo bueno sobre las grasas y apuntar que los lípidos

son -bien literalmente- de importancia vital. No solo sirven como fuente de energía y de átomos de carbono que pueden ser usados para construir casi cualquier otro tipo de molécula, las moléculas de lípidos (especialmente en las formas combinadas con fosfato) son el principal constituyente de las membranas de las células. No es exagerado decir que la vida sería imposible sin las membranas que impiden la disolución de las células, regulan las sustancias que entran y salen de la célula, sirven de lugar donde se procesan muchas reacciones químicas, y para limitar en compartimentos las células de modo que muchos proceso químicamente conflictivos puedan ocurrir simultáneamente. Imagine cómo sería intentar hacer un postre y una torta al mismo tiempo si ambos tuviesen que ser preparados en la misma taza! Debido a su propiedad de aislantes eléctricos, las membranas de lípidos permiten que ciertas células reciban una carga eléctrica, haciendo posible la evolución de los cerebros, y la redacción de este artículo.

Los carbohidratos incluyen los azúcares simples como los polisacáridos, el almidón y la celulosa, en los cuales millares de moléculas de azúcares simples (glucosa) se juntan para formar una molécula bien larga y fibrosa. A diferencia de los lípidos, que son compuestos principalmente de carbono e hidrógeno, los carbohidratos contienen aproximadamente tantos átomos de oxígeno como de carbono. Ellos son fuentes importantes de energía, hacen parte de las paredes celulares de las plantas, y de los componentes de almacenamiento de información en los ácidos nucleicos ADN y ARN. El ADN, el material del que están hechos los genes, contienen un azúcar de cinco carbonos, la desoxirribosa. El ARN, que ayuda a traducir la información almacenada en el ADN en proteínas contiene un azúcar, la ribosa. Además de los azúcares, los ácidos nucleicos contienen fosfato y cinco compuestos diferentes que poseen nitrógeno, denominados bases nitrogenadas (cuyos nombres comunes son adenina, timina, citosina, guanina y uracilo). Los ácidos nucleicos poseen la habilidad crucial de reproducirse: ellos son autocatalíticos.

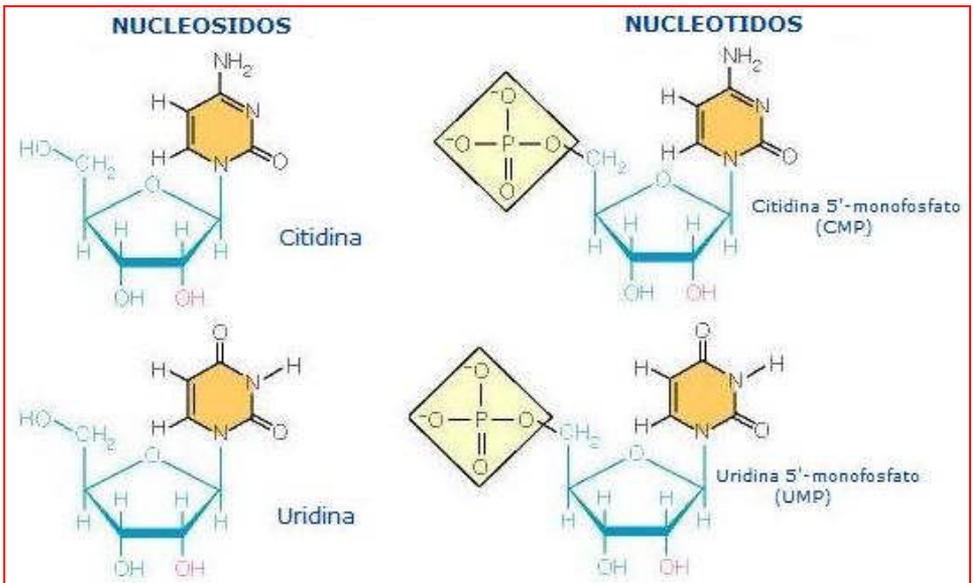
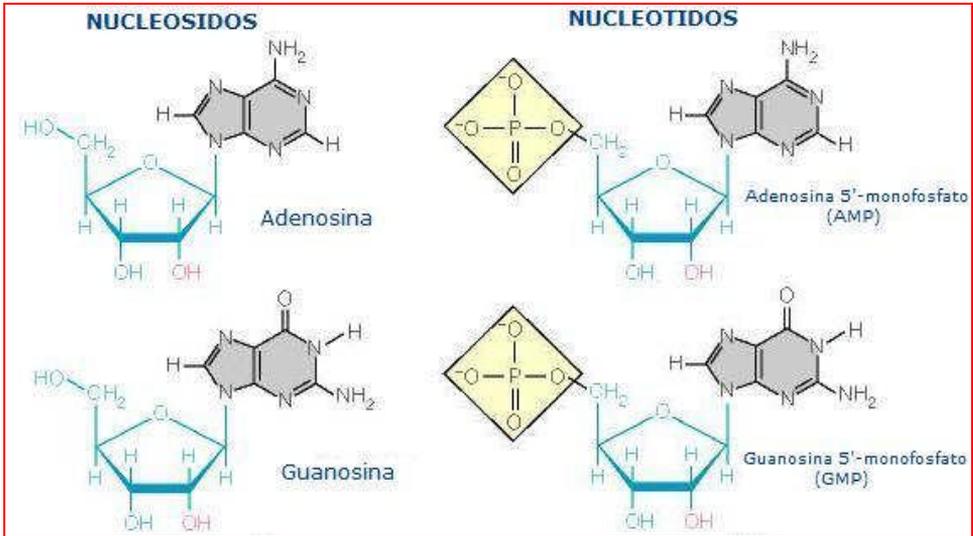
A diferencia de la celulosa, que es un polisacárido compuesto de miles de unidades de glucosa idénticas (monómeros) alineados, un ácido

nucleico es un polímero formado por cuatro⁹] tipos diferentes de monómeros (las bases nitrogenadas) juntos.



Cada nucleótido es en sí una entidad compleja, estando compuesto de una molécula de azúcar, una base nitrogenada y un grupo fosfato. La habilidad de los ácidos nucleicos para almacenar información genética deriva del modo no aleatorio en el cual los cuatro tipos de bases están alineadas a lo largo de la estructura de la molécula. Se puede pensar en las cuatro bases nitrogenadas como un alfabeto como la clave Morse, el cual solo contiene cuatro letras (A, T, C y G) puede codificar las "recetas" para hacer cualquier organismo. La diferencia entre los humanos, los musgos y sus ratones radica en que sus moléculas de ADN son diferentes.

⁹ En total hay ocho nucleótidos comunes: cuatro ribonucleotidos, conteniendo el azúcar ribosa y que son los bloques de construcción del ARN, y cuatro desoxirribonucleotidos, que contiene el azúcar desoxirribosa y que son los bloques de construcción del ADN. Tanto el ADN como el ARN contienen las bases adenina, citosina y guanina, pero en el ARN el uracilo es substituido por la timina encontrada en el ADN.



La última categoría importante de compuestos bioquímicos encontrados en la célula viva comprenden las grandes moléculas denominadas proteínas. También conocidas como polipéptidos, las proteínas son polímeros compuestos por veinte tipos diferentes de unidades de monómeros, los aminoácidos. Los aminoácidos tienen ese nombre por el hecho que contienen por lo menos dos componentes químicamente

activos: un grupo amino (-NH₂) y un grupo carboxilo (-COOH). Todos los aminoácidos contienen los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Varios de ellos también contienen el elemento azufre: Los aminoácidos pueden unirse cuando el grupo amino de una molécula reacciona con el grupo carboxilo de otra molécula para formar un enlace peptídico (la molécula doble que se origina se denomina dipéptido). Al unir cientos o miles de aminoácidos, se crea un polipéptido - una proteína. Las proteínas son extremadamente importantes como enzimas - moléculas gigantes sirven como catalizadores controlando toda una gran variedad de "matrimonios y divorcios químicos" que constituyen la condición viviente. Las enzimas proteicas producen también los nucleótidos necesarios para la replicación del ADN o para producir ARN.

Entre los compuestos mixtos de importancia bioquímica tan solo mencionaremos los pigmentos: Los pigmentos son mucho más importantes de lo que se podría suponer. Ellos hacen mucho más que colorear los corales o pintar los pétalos de las flores, su importancia principal tampoco la hace el hecho que estén en las células fotorreceptoras de las retinas humanas, permitiendo que los lectores lean este artículo! Algunos pigmentos, como la clorofila, permite que los seres vivos capturen la energía solar de los fuegos nucleares del sol. Otros pigmentos, tales como los citocromos, sirven para transferir esa energía solar - almacenada en forma de enlaces químicos - de un banco de energía celular a otro. En últimas, toda la energía que anima el pulso de la vida en la Tierra es luz estelar - y toda ella fue capturada por las antenas químicas conocidas como pigmentos.

Habiendo visto brevemente las necesidades químicas de los seres vivos, debemos ahora intentar responder la pregunta: ¿Cómo surgieron esos productos químicos durante los días de aurora de nuestro Planeta? ¿Cómo pudieron llegar a existir sin la ayuda de una inteligencia sobrenatural?

En el caso de los lípidos, nuestros problemas son pocos. La presencia de hidrocarburos en las nubes estelares y cometas, y la presencia de ácidos grasos (hidrocarburos que contienen dos átomos de oxígeno por

molécula a parte de carbono e hidrógeno) en los meteoritos hace probable que las sustancias grasas disponibles para la incorporación de protocélulas en el inicio. En cualquier caso, es mucho más fácil producir ácidos grasos y otros lípidos a partir de atmósferas con metano expuestas a descargas eléctricas o a superficies calientes de lavas volcánicas (el metano, debemos recordar, debe haber sido un componente menor de la atmósfera primitiva). Insolubles en agua, los lípidos habrían formado películas como membranas en las superficies de los primeros océanos. Dada la turbulencia de la acción de las olas, esas películas oleosas deben haberse quebrado frecuentemente para formar vesículas cubiertas por membranas y llenas de agua y otros componentes presentes en la superficie del agua.

Naciendo como los lípidos —o en la nebulosa solar antes que la agregación de microplanetas formasen la Tierra, o que en los procesos atmosféricos que formarían los lípidos— estaban los más importantes de los pigmentos, especialmente las porfirinas, los principales componentes de la clorofila, de los citocromos y del grupo hemo (el pigmento que da a la hemoglobina su color rojo).

La síntesis de los azúcares en la Tierra antigua tampoco era muy difícil, aunque esta representa un rompecabezas químico para el cual aún no se ha obtenido una información detallada. Se sabe hace muchos años que el formaldehído (H_2CO) —una de las primeras sustancias formadas por los experimentos de la cámara de descargas— puede ser polimerizado en azúcares simples en condiciones alcalinas, si están presentes catalizadores como el hidróxido de calcio o el carbonato de calcio (piedra caliza). Más interesante es el descubrimiento que una arcilla mineral común, el caolín, calentado a la temperatura de ebullición del agua puede volver soluciones diluidas de formaldehído en una gran variedad de azúcares -incluida la ribosa, necesaria para el ARN y el ATP.[¹⁰]

¹⁰ El ATP (trifosfato de adenosina) es extremadamente importante como moneda universal de energía en las células modernas. La energía tomada del sol o la producida a partir del alimento es almacenada en la forma de enlaces de fosfato de alta energía en la molécula de ATP. Esa energía puede ser utilizada para energizar

El problema intrigante asociado con los carbohidratos es este: Cuando los azúcares se mezclan con los aminoácidos (entre los productos más comunes de los experimentos de las cámaras de descargas eléctricas) estas se anularían mutuamente, interactuando por la reacción de Maillard para producir un producto marrón y feo que se parece a lo que se forma cuando se deja expuesta una manzana al aire. Tanto como sé, no se ha encontrado ningún uso para tales compuestos en el curso de la biopoyésis. Una posible solución viene de varias líneas de indicios. Primero que todo los azúcares no parecen haberse formado tan abundantemente como los aminoácidos y así también aún habrían aminoácidos suficientes para que se convirtieran en proteínas después de la "reacción marrón". En segundo lugar, excepto por los azúcares necesarios en los nucleótidos, no parece que las primeras protocélulas casi vivas tenían mucha necesidad de carbohidratos, y así la pérdida de algunas moléculas de azúcar no habría tenido un efecto prohibitivo en la biopoyésis. En tercer lugar, se descubrió que la estabilidad de los azúcares en verdad aumenta después que se han juntado las bases nitrogenadas (también producidas en la cámara de descargas eléctricas en otros experimentos). Una vez que pocos experimentos propusieran explicaciones de cómo los azúcares pueden haberse unido a la adenina y a otras bases nitrogenadas, es bastante alentador descubrir que los investigadores en el Laboratorio de Evolución Química de la Universidad de Maryland¹¹ tienen evidencias experimentales mostrando que por lo menos cinco nucleósidos (nucleótidos sin el grupo fosfato) pueden haberse formado directamente por la descarga de rayos en una atmósfera de metano, hidrógeno y agua! Adiciona un fosfato y tenemos nucleótidos listos para ser polimerizados en ARN y ADN. Adiciono otros dos fosfatos, y tenemos moléculas como el ATP: Con el ATP parece que no hay límites de lo que puede ser hecho.

Ya mencionamos que los aminoácidos están dentro de los productos más abundantes en los experimentos simulando la síntesis de la Tierra

productos químicos recalcitrantes y hacerlos ejecutar trucos que serían termodinámicamente improbables sin el pastoreo del ATP.

¹¹ Kobayashi, K., et al., "Abiotic synthesis of nucleosides by electric discharge in a simulated primitive earth atmosphere," *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, Volume 16, Nos. 3/4 (1986), pp. 277-8.

primitiva. Es interesante notar que los tipos más comunes de aminoácidos resultantes de las simulaciones de Urey-Miller (glicina, alanina, ácido glutámico, y aspartámico) son justamente cuatro de los cinco aminoácidos más frecuentemente encontrados en los organismos. La serina, el quinto aminoácido, se produce abundantemente en otros tipos de experimentos. Nuevamente, la química de la vida parece ser inherente a la química del Cosmos. En ese punto nosotros podemos explicar los orígenes naturales de la mayoría de las moléculas existentes en los seres vivos. Vimos que los lípidos, pigmentos, aminoácidos, bases nitrogenadas y azúcares pueden haberse formado fácilmente en la atmósfera primitiva - si de hecho estas no estuviesen desde el inicio como una herencia de la nebulosa solar que formó el sistema solar. Lo que queda para mostrar en este artículo es cómo los aminoácidos pudieron haberse polimerizado en proteínas (usando tan solo aminoácidos "levógiros") y como los nucleótidos pudieron haberse polimerizado en ARN y ADN.

Los problemas remanentes son un poco más engañosos que aquellos que examinamos anteriormente. Vamos primero a tratar el problema de los aminoácidos levógiros. Todos los aminoácidos, a no ser los más simples, la glicina, contiene lo que se llama un átomo de carbono asimétrico. Esto es simplemente un átomo de carbono unido por sus cuatro enlaces posibles a cuatro tipos diferentes de grupos químicos. Como ejemplo vamos a considerar el segundo aminoácido más simple, la alanina (ver Figura 5). El carbono asimétrico se ve como fluctuando en el centro de una pirámide triangular (tetraedro), con sus cuatro enlaces extendiéndose hasta los grupos químicos ubicados en los cuatro esquinas de la pirámide. Como podemos ver en la Figura 2, hay dos maneras diferentes por las cuales los grupos unidos pueden ser ordenados, y esos dos arreglos son imágenes especulares una de otra. Mirando ambas estructuras simultáneamente, los lectores pueden ver que la L-alanina "zurda"^[12] parece ser un reflejo en el espejo de la D-alanina "diestra". Del mismo modo que no hay forma de arreglar un guante izquierdo para transformarlo en uno derecho (a no ser girándolo-

¹² La letra L viene de la palabra latina *laevus*, 'izquierda', y la letra D viene de *dexter*, 'derecha.'

lo al reverso!), entonces no hay manera que la D-alanina pueda girarse o invertirse para transformarse en una L-alanina.

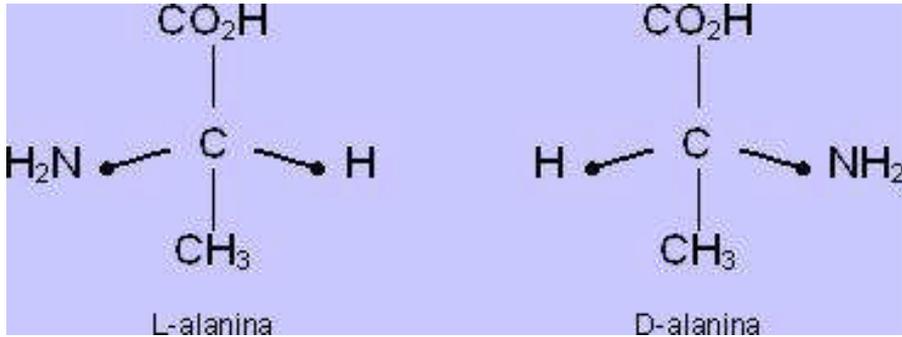


Figura 11. Formas dextrógiras (a la derecha) y levógiras (a la izquierda) del aminoácido alanina. Los seres vivos producen tan solo la variedad L- alanina, mientras que las síntesis artificiales producen una mezcla de ambas formas en proporciones iguales.

Un hecho curioso es que todos los aminoácidos que entran en la composición de las proteínas son exclusivamente de forma L. No se conoce ninguna proteína real que contenga aminoácidos D, si bien la bacteria *Bacillus brevis* produce una proteína semejante a un antibiótico conocido como gramacidina-S, que contiene D-fenilalanina, así como ornitina -que no pertenece al conjunto de los veinte aminoácidos encontrados en las proteínas comunes-. El por qué tan solo los aminoácidos son usados es un rompecabezas sin resolver. Es posible que las primeras formas de vida usasen una mezcla de moléculas dextrógiras y levógiras. Al fin de cuentas, cuando se producen aminoácidos en el laboratorio y en simulaciones de la Tierra primitiva, la mitad de las moléculas producidas son dextrógiras y la mitad levógiras. Pero cuando los seres vivos los producen todos son levógiros.

Hay una tendencia, cuando las mezclas de aminoácidos dextrógiros y levógiros se polimerizan, los polímeros contienen más componentes L

que D.[¹³] Es posible que los seres vivos simplemente han exagerado un desvío inherente a la química de la formación de péptidos. Ahora parece ser el caso, la solución para nuestro rompecabezas aguarda en más estudios por hacer. La discusión hasta ahora asumió que todos los compuestos químicos creados en la atmósfera más tarde o temprano acabarán como componentes de una "sopa primordial" -los océanos, mares y lagos del mundo recién nacido. Tal situación de hecho me parece estar establecida más allá de toda duda razonable. Pero si eso fuera verdad, se crea una dificultad: juntar los aminoácidos (y nucleótidos) en polímeros lineales involucra un proceso de deshidratación -remover una molécula de agua a cada par de moléculas que se unen. No parece obvio de primeras cómo podría removerse agua de unas moléculas que están disueltas en ella. Uno de los primeros en resolver el problema fue el profesor Sydney Fox, de la Universidad de Miami. Él demostró que el agua que contiene aminoácidos podría haber salpicado lava caliente, y al evaporarse el agua queda una membrana seca, la cual puede deshidratarse produciendo péptidos. Experimentalmente, esto se hizo, y resultó una proteína semejante a un polímero que Fox llamó "proteinoide". El proteinoide se parece mucho a las proteínas naturales, aunque menos regular en su estructura. Como las proteínas naturales, los proteinoides poseen características catalíticas -incluida la capacidad auto-catalítica-. Comparados con las enzimas modernas, entretanto, sus capacidades son poco débiles. Pero nosotros no debemos olvidar que antes del advenimiento de organismos que poseen enzimas sofisticadas, cualquier molécula que tuviese las mismas habilidades enzimáticas tendría una ventaja competitiva sobre las otras moléculas en la sopa primordial.

Las temperaturas volcánicas no son necesarias para deshidratar las proteínas (o los nucleótidos que las forman). James Lawless, un investigador del Centro de Investigación Ames de la NASA, en California, y sus colegas mostraron que cristales de arcilla podían catalizar la

¹³ Folsome, Clair Edwin, *The Origin of Life: A Warm Little Pond*, W.H. Freeman & Co., San Francisco, 1979, p. 150.

polimerización de dos aminoácidos y de dos nucleótidos.[¹⁴] Las moléculas que van a unirse son rociadas sobre superficies de arcilla, las cuales están sujetas a fluctuaciones entre condiciones calientes, secas, frías y húmedas - como puede ocurrir en lagunas en evaporación. Las arcillas que tenían zinc fueron capaces de unir nucleótidos para producir ácidos nucleicos. Es interesante que el ADN llegase a polimerarse, la enzima moderna que ayuda al ADN a reproducirse, también contiene zinc.

Las arcillas que contienen cobre recogen y unen una gran variedad de diferentes tipos de aminoácidos. Las arcillas que contienen trazas de níquel absorberán y polimerizarán tan solo los veinte tipos de aminoácidos encontrados en las proteínas. ¿Por qué sucede que a partir de una centena de aminoácidos diferentes posibles, tan solo un conjunto de veinte componen las proteínas en todos los organismos, de los peces a los filósofos? Por mucho tiempo fue un misterio.

Ahora los detalles esperan a ser explicados, así como los orígenes de los ingredientes químicos de la vida son ahora razonablemente bien comprendidos. Pero la vida es más que simplemente un bulto de productos químicos. Como la llama brillante de una vela, la vida es flujo. La vida es un patrón dinámico mantenido por un flujo continuo de materia y energía, por un equilibrio delicado entre la materia que entra y sale. ¿Cómo la llama que es la vida se puede equilibrar entre la muerte y la no vida? Este es el tema de la Parte 3, el artículo "Las primeras células"

¹⁴ Schmeck, Harold M., "Clay on Shores of Ancient Seas Viewed as Key to Origin of Life," The New York Times, Octubre 15, 1977, p. 26C.

Parte 3:

Las primeras células

La célula viva -de hecho la propia vida- se equilibra entre la muerte que aguarda a todas las formas mortales y el mundo no viviente de la naturaleza prebiótica de la cual surgió. La célula, envuelta en una membrana, universalmente la estructura que surgió como el portador patrón del estado vivo en la Tierra es -a pesar de las visiones ingenuas de ciertos materialistas del siglo XIX- más que un saco de productos químicos, a pesar que las sustancias químicas son realmente todo lo que ella contiene. Así mismo, no hay ninguna "fuerza vital" para animar sus átomos a la vida, o para dejarlos muertos al partir. La célula viva es un sistema dinámico, en cambio constante en el cual las sustancias químicas se tornan ordenados por un tiempo en estructuras microscópicas, tan solo para disolverse nuevamente cuando otras moléculas se juntan para formar los mismos tipos de estructuras nuevamente, o para sustituirlas nuevamente en la misma estructura. Las organelas de las cuales las células están hechas no son más estáticas que la llama de una vela. En cualquier instante, la vela exhibe un patrón dinámico de casamientos y divorcios químicos, de procesos que producen energía y procesos que la consumen, de estructuras formándose y estructuras desapareciendo. La vida es proceso, no una cosa.

¿Cómo ese proceso ordenado llegó a existir? Una vez que la célula es una entidad altamente ordenada y no aleatoria (evitando, la torpe regularidad de un cristal), se puede pensar en ella como un sistema que contiene información^[15]. La información es un ingrediente que adi-

¹⁵ Este texto contiene información debido a la forma altamente no aleatoria de la posición en la superficie de los elementos que llamamos letras. si cortásemos todas las palabras, mezcláramos y ubicáramos sobre una página en blanco, la información estaría altamente reducida. si las palabras fueran cortadas en letras individuales la información estaría totalmente perdida. De la misma forma, si una células "contiene" información debido a la manera en la cual sus elementos moleculares

cionado, trae a la vida lo que serían átomos no vivos. ¿Cómo -nos preguntamos- la información puede ser introducida sin una inteligencia creativa sobrenatural? Este es el problema que la ciencia aún tiene que responderse, lo que colocaría a Dios en la categoría de completamente desempleado.

Los científicos que buscan dar cuentas del contenido de información de las células vivas se ven enfrentados con el hecho que la información y la apariencia de diseño también pueden encontrarse en la naturaleza no viva, en sistemas que ninguna adulto supondría seriamente que es evidencia de un diseño inteligente. Los patrones y filigranas que se forman en nuestras ventanas en invierno son atribuidos por los niños, a los esfuerzos inteligentes de Jack Frost (un personificación del frío), pero aquellos de nosotros mayores de diez años de edad sabemos que la habilidad de formar estas hermosas figuras están en la propia naturaleza del agua. La "información" sobre cómo formar estructuras intrincadas de cristal es inherente a la estructura submolecular del agua, del modo como los electrones orbitan los átomos de hidrógeno y oxígeno que los constituyen. La sustancia más simple que contiene información, junto con lo que frecuentemente parece ser un programa diciendo interactuar con el mundo. En el caso de los sistemas vivos, la cantidad de información y programación que direcciona los patrones encontrados en las moléculas individuales está aumentando en grado gigantesco. Aún así la célula entera puede ser considerada como un sistema conteniendo información, de hecho es que la mayoría del contenido de la información de una célula está presente en la forma de moléculas informativas gigantes como el ADN (que contiene la "receta" para hacer un organismo entero de un tipo en particular) o las enzimas (proteínas que pueden ser vistas como herramientas moleculares con las cuales la receta almacenada en el ADN es traducida en acciones).

están ubicados en el espacio y en el tiempo. La manera en la cual el ADN (el material genético de la célula) contiene informaciones - con sus cuatro tipos de "letras" (A, T, C y G) se debe a la secuencia de estas para formar mensajes largo - es exactamente análogo a la manera como esta frase contiene información debido a la forma en la cual las letras del alfabeto romano fueron dispuestas.

Se argumenta con frecuencia que las leyes de la probabilidad van contra la idea de que las principales moléculas informativas de la célula pudiesen surgir espontáneamente. "Las probabilidades de que una molécula de una enzima pudiese formarse a partir de los aminoácidos adecuados, en la secuencia exacta, es tan pequeña que si usted tuviese diez opciones por segundo, usted no obtendría una molécula de enzima en un trillón de trillones de años" Hay mínimo tres fallas principales en las premisas que fundamentan ese argumento. Primero de todo, que cuando los veinte aminoácidos de los cuales están hechas las proteínas reaccionan promiscuamente los unos con los otros, y que todas las combinaciones posibles tienen igual probabilidad. En verdad, existe una tendencia definida del modo como los aminoácidos mezclados se combinan (polimerizan) para formar péptidos y polímeros semejantes a proteínas. Sydney Fox, uno de los mayores experimentadores que estudian el problema de la biopoyesis (el origen de la vida), relata que "los diversos aminoácidos no se polimerizan aleatoriamente; al contrario, ellos tienen una gran habilidad de auto-instruirse. Las secuencias formadas son altamente específicas... y los polímeros producidos son de una heterogeneidad agudamente limitada...^[16]" El resultado último de esa tendencia en el modo de cómo los aminoácidos se juntan para formar "proteínoides" (polímeros semejantes a proteínas que se forman espontáneamente cuando las mezclas de aminoácidos secos son calentadas) es que las moléculas capaces de catalizar reacciones biológicamente útiles (o sea, los tipos de reacciones ahora catalizadas por enzimas) tienen mayor probabilidad de formarse que las moléculas incapaces de actividad enzimática. La química orgánica tiende a favor de la vida.

El segundo problema es que el argumento falla al comprender el papel de la selección natural operando al nivel molecular. Es de conocimiento común, por ejemplo, que la probabilidad de conseguir una mano perfecta en bridge es extremadamente pequeña. Pero, si la persona pudiera "seleccionar" todas las espadas de la primera distribución de cartas, y devolver las cartas indeseadas al tallador (junto con las cartas

¹⁶ Sidney W. Fox, *The American Biology Teacher*, vol. 43, n° 3, Marzo 1981, p. 129.

de las otras tres manos), una y otra vez, cada vez dejando las favorables y devolviendo las no deseadas, en poco tiempo se obtendrá "una mano perfecta". Cuando la selección natural opera a nivel celular en las protocélulas (estructuras semejantes a células pero que no son capaces de controlar sus capacidades reproductoras o de garantizar la transmisión hereditaria de información con pocos errores), cualquier "paso en la dirección correcta" tenderá a conservarse, y cualquier paso en dirección errada tendrá que volver al "tallador".

La tercera falla, la más seria en los argumentos que con frecuencia se dan contra la posibilidad de un origen natural de las moléculas informativas, es la presunción de que la molécula en cuestión (por ejemplo, una enzima catalasa) debe ser idéntica a un patrón moderno altamente evolucionado. Como todas las enzimas, la catalasa es una proteína, una molécula muy grande compuesta de aminoácidos reunidos. Su principal función en las células modernas es romper el peróxido de hidrógeno en agua e hidrógeno. Esto es muy importante, una vez que el peróxido es muy destructivo para la maquinaria molecular de la célula. Además de su estructura de aminoácidos, la catalasa también contiene un grupo hemo, que a su vez se compone de un anillo de porfirinas (ver Figura 6) y un átomo de hierro.

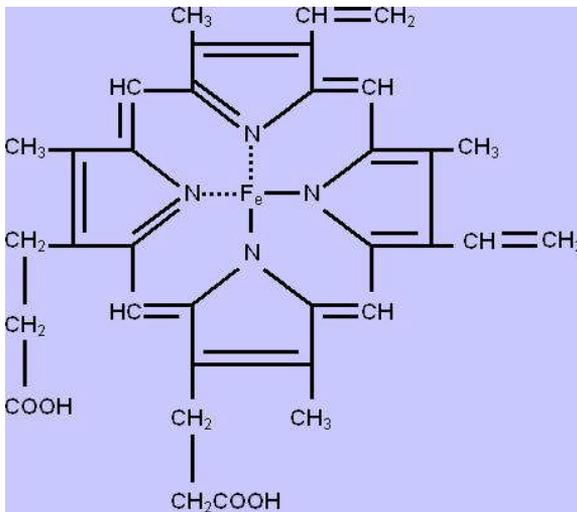


Figura 6. La fórmula estructural del grupo hemo, el pigmento encontrado en la hemoglobina, la catalasa y otras enzimas (los átomos de carbono ocupan todos los lugares en la estructura donde se encuentran las líneas rectas)

Nosotros podemos admitir inmediatamente que el origen espontáneo de una molécula moderna de catalasa, con sus cuatro conjuntos de 505 aminoácidos unidos en

un orden muy específico, es altamente improbable. Pero lo que raramente se nota es que el hecho de que las primeras células no necesitaron de la molécula de catalasa entera (eso si ellas requerían de alguna catalasa, en un ambiente conteniendo muy poco oxígeno libre!).

En las primeras células, teniendo que lidiar con pequeñas cantidades de peróxido, cualquier molécula que pudiese hacer el trabajo de la catalasa en una forma tenue habría conferido alguna ventaja sobre las células que no pudiesen degradar el peróxido. De hecho el propio ión hierro (Fe^{++}) es capaz de romper el peróxido. Si el hierro fuera combinado con un anillo de pirrol (la porfirina^[17]" el superanillo" mostrado en la Figura 6 está compuesta de cuatro anillos de pirrol arreglados a lo largo de los lados del cuadrado), su habilidad catalizadora aumenta varias veces. Si el hierro fuese combinado con el anillo de porfirina del grupo hemo, sus propiedades catalizadoras aumentan varias veces en relación con un ión de hierro libre. Finalmente, adicionar la parte proteica de la molécula de catalasa aumenta la actividad en diez millones de veces!^[18]

Es claro que para que la vida se originase no fue necesario que estuviese presente la catalasa o cualquier otra macromolécula ahora encontrada en las células. Todo lo que era necesario era que hubiesen moléculas capaces de hacer el trabajo de esas macromoléculas - al

¹⁷ Debe recordarse que se ha demostrado que las moléculas de porfirina se forman espontáneamente sobre las condiciones de la Tierra primitiva, y varios tipos de porfirina han sido encontrados en meteoritos, objetos formados en la nebulosa solar antes que la Tierra se tornara un planeta.

¹⁸ En la catalasa, como en otras enzimas, apenas una pequeña parte de la estructura de la proteína está involucrada en la formación del así llamado sitio activo, la parte de la molécula que realmente porta los compuestos químicos necesarios para su función. Frecuentemente, grandes partes de una enzima son refinamientos evolutivos que van a determinar si la molécula será disuelta en el citoplasma de la célula o se va a unir a las membranas de la célula, determina las circunstancias sobre las cuales una enzima será activa o inactiva, etc. De los centenares de aminoácidos que forman una enzima típica, generalmente apenas una docena de ellos, más o menos, están involucrados en su actividad catalizadora; y el resto de las moléculas generalmente poseen varias substitutiones de aminoácidos sin alteraciones importantes en la actividad enzimática. Las primeras enzimas, las cuales ciertamente eran moléculas muy pequeñas, contenían apenas la secuencia de aminoácidos esenciales para la actividad enzimática. cuanto más pequeña la enzima, es claro, mayor será la probabilidad que esta se llegase a formar espontáneamente.

menos un poquito. Es claro y razonable esperar que las protoenzimas de las protocélulas deberían tener una semejanza química clara con, por lo menos una parte de sus contrapartes en las células modernas, y sería posible mostrar como las enzimas modernas se desarrollarían a partir de estructuras más simples de sus protoenzimas ancestrales. Están siendo descubrimientos en esa área a un paso acelerado.

Las así llamadas rutas metabólicas son realizados por las células actuales para sintetizar materiales necesarios, convertir en alguna forma químicamente útil la energía solar capturada por los pigmentos, y romper tanto materiales brutos y desechos. La comparación de rutas metabólicas de las bacterias, plantas y animales primitivos revela muchas pistas de cómo esas rutas podrían haberse originado. Es bastante claro que las rutas metabólicas evolucionaron precisamente de la manera como ellas trabajan: paso a paso. En ninguna época en la evolución de la vida un camino entero se formó de una sola vez.

La hipótesis heterotrófica

Para entender como las rutas metabólicas se desarrollaron en el curso de la evolución de la vida, es necesario examinar el modo en el que las primeras protocélulas llegaron a existir. El primer análisis detallado de ese problema fue hecho por el bioquímico ruso Alexander I. Oparín en 1924.^[19] Oparín fue famoso por su formulación de la así llamada hipótesis heterotrófica. La palabra heterotrófica viene de los términos griegos heteros ("otro" o "diferente") y trophé ("comida" o "alimento") y se refiere al hecho de que los primeros seres vivos eran incapaces de sintetizar su propio alimento a partir del dióxido de carbono y el agua del modo como las plantas ("autótrofas") lo hacen, pero fueron un tanto más dependientes de las fuentes de alimento externas a sí mismas. Los animales modernos se denominan heterótrofos secundarios, ya que ellos han perdido la capacidad fotosintética y dependen de

¹⁹ Alexandr I. Oparin, Proiskhozhdenie Zhizni [The Origin of Life] (Moscow: Izd. Moskovskii Rabochii, 1924).

comer otros animales y plantas como fuentes de energía y materiales brutos.

De acuerdo con Oparín, las protocélulas (que él pensó habrían sido aglomerados coloidales de moléculas) que se formaron en la "sopa primordial" de complejos orgánicos constituyentes de los lagos y océanos primitivos del mundo. Una vez que se formaron las protocélulas con la capacidad de autorreplicación, ellas se habrían sustentado consumiendo el caldo remanente del cual surgieron.

Pues este es el ambiente que debía existir al principio ...



Oparín



En el inicio, las protocélulas serían capaces de utilizar compuestos complejos²⁰ que podrían haberse integrado en la estructura de la protocélula sin cualquier otra alteración. A medida que el tiempo pasaba, las complejas moléculas de "alimento" fueron utilizadas, dejando moléculas de menor complejidad que podrían ser usadas con tan solo un cierto grado de modificación química.

Sin embargo, algunos autores han imaginado este estado de la evolución química como una "crisis" en el desarrollo de la vida, y suponen que fue un accidente afortunado en una protocélula afortunada el desarrollo de la habilidad de usar moléculas de alimento un poco más simples "antes que el tiempo las acabase o que ellas muriesen de hambre sin moléculas complejas", pero la realidad de la química hace la situa-

²⁰ Debido a las restricciones de la Segunda Ley de la Termodinámica, los compuestos orgánicos simples serían los componentes más comunes de la "sopa", y los más complejos serían los menos comunes. Las moléculas más complejas generalmente tendrían el contenido de información más alto y serían menos favorecidas desde un punto de vista termodinámico.

ción menos espantosa. Deberíamos recordar que el punto donde la sopa fue agotada de casi todas las moléculas de alimento más complejos, deberían haber billones de protocélulas. A medida que las moléculas de alimento más deseables se hacían más y más escasas, algunas de las protocélulas deberían haberse desintegrado, volviéndolas a ellas mismas alimento para las protocélulas remanentes aún intactas. Es muy probable que se halla desarrollado un tipo de equilibrio entre las protocélulas que se desintegraban y otras células absorbiendo sus restos y reproduciéndose, hasta que una protocélula en particular adquirió un enzima o dos que la hacían capaz de utilizar un segundo tipo de moléculas menos complejas y aún abundantes en la piscina primordial. Capaz ahora de utilizar una nueva y abundante fuente de alimento, esa nueva protocélula, mutante iría a multiplicarse rápidamente hasta sustituir los otros tipos obsoletos que exigían un tipo altamente complejo de moléculas ahora agotadas en el medio. Mucho tiempo después, el segundo tipo de molécula de alimento se habría agotado, y la competición se habría desarrollado nuevamente, resultando una protocélula que podría utilizar un tercer tipo de alimento químico (aún más simple)

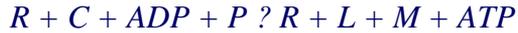
El modelo de aglomerado autosuficiente

¿Podría esto estar vivo?

La sopa primordial en la cual comenzó la vida contiene una larga variedad de complejos orgánicos, variando en tamaño de lo muy pequeño a lo muy grande, ricas en energía. Las moléculas grandes, ricas en energía (tales como el complejo hipotético C es concebido compuesto por dos partes principales L y M. Romper el enlace químico entre L y M iría a liberar energía. Esa energía podría ser usada inmediatamente para unir un grupo fosfato (P) a una molécula de difosfato de adenosina (ADP), una forma de "moneda energética" casi universal en las células modernas. El ATP es un compuesto rico en energía. Muchas de las sustancias en la sopa tendrían que poseer capacidad catalizadora, es decir, la habilidad de acelerar reacciones químicas sin que ellas fuesen usadas en el rompimiento de la molécula de alimento C, con

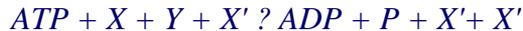
liberación de energía. De modo general ese proceso puede resumirse en la ecuación:

Ecuación 1.



Al mismo tiempo se puede suponer que había en la sopa ciertos complejos que eran autocatalizadores, es decir, capaces de ayudar en la síntesis de más moléculas similares a ellas (Sidney Fox mostró que ciertos proteínoides de hecho facilitan la producción de más proteínoides, aunque no se sabía si el nuevo proteínoides es precisamente igual al viejo). En el siguiente modelo la molécula X' se concibe como autocatalítica, acelerando su propia formación de sus dos complejos principales X & Y, dada una fuente de energía como el ATP (cuando el ATP cede energía, este es degradado de regreso a ADP y un fosfato). De modo general, este proceso se puede resumir en una segunda ecuación:

Ecuación 2:



El aglomerado hipotético mostrado arriba se concibe formado por dos fases, una fase matriz compuesta de X' y una o más partículas del catalizador R. En tal estructura las reacciones químicas descritas en las ecuaciones 1 y 2 podría esperarse que tuviese lugar en la frontera entre las fases, donde las de R hacen contacto con la fase X'. A medida que el aglomerado sintetiza más X', este crecerá de tamaño hasta hacerse hidrodinámicamente inestable, tras lo cual se quebrará en dos o más aglomerados hijos. Si los aglomerados hijos tuviesen un poco de R, ellos serían capaces de continuar la actividad semejante a la vida del modelo.

Futuras evoluciones del modelo involucrarían la habilidad de romper L y M en productos más pequeños, extrayendo más energía de sus enlaces químicos (el punto final sería alcanzado cuando las moléculas pudiesen desdoblarse hasta el agua y el dióxido de carbono). La evolución también involucraría adquirir la habilidad de sintetizar precursores de las formas X & Y cada vez más simples, hasta el dióxido de

carbono, agua, minerales inorgánicos, y la luz del sol fuesen necesarios. Cada uno de esos desarrollos evolutivos exigiría la adición de nuevos catalizadores (proteínoides, pigmentos, iones minerales, etc) en la estructura del modelo de arriba.

A medida que la sopa primordial se diluía en un océano, donde las protocélulas heterotróficas agotaban cada vez moléculas más simples, llegó un punto en el que sería imposible una mayor reducción de la complejidad de las moléculas de "alimento". En ese punto, nuestras primeras células verdaderas serían capaces de mantenerse con tan solo dióxido de carbono, agua y minerales orgánicos. Esas células se habrían convertido en los primeros autótrofos - organismos sin dependencia de otros organismos, como de la sopa remanente. Esos autótrofos serían capaces de ejecutar la fotosíntesis, capturando la energía del sol y usándola para combinar el dióxido de carbono y agua para formar azúcar. El azúcar, por su vez, sería re-trabajado con complejos inorgánicos con nitrógeno, azufre, fósforo y otros elementos para formar las sustancias necesarias para mantener y mejorar la calidad de lo que en ese punto debía llamarse "vida".

El origen de la estructura celular

Así como intentamos explicar como los productos químicos de la vida llegaron a existir, tenemos que explicar como surgieron las estructuras celulares cuando disponemos de un exceso de posibilidades plausibles. Parece que hay más posibilidades de las que necesitamos. Oparín estaba impresionado con la habilidad de las proteínas y otras macromoléculas en solución de aglomerarse para formar suspensiones de conjuntos complejos conocidos como coacervados. A medida que esas partículas vagaban absorbían más moléculas de la solución circundante y realmente crecían en tamaño. Cuando alcanzaban cierto tamaño, las partículas se reproducían, a veces por un proceso que recordaba la formación de levaduras, a veces por simple fisión irregular. Los aglomerados hijos, a su vez, crecían, se dividían, crecían y se dividían, hasta que las moléculas de materia bruta fuesen agotadas en el medio. Oparín mostró experimentalmente que muchas enzimas y grupos de

enzimas se podían juntar en aglomerados de coacervados y podían llevar a cabo actividades metabólicas -incluso imitando las actividades de caminos metabólicos cortos.

Sydney Fox de la Universidad de Miami, por otra parte, mostró que cuando mezclas de aminoácidos secos son humedecidas, estos se polimerizan en un material semejante a las proteínas llamado proteinoide. Los proteinoides son de gran interés teóricamente porque estos usualmente poseen habilidad catalizadora. Estos no son capaces de catalizar la formación de ácidos nucleicos (ADN o ARN), pero son capaces de catalizar la formación de más proteinoides! En resumen, los proteinoides exhiben una habilidad reproductora primitiva.

Además de poseer habilidades químicas interesantes, cuando los aglomerados entran en contacto con el agua, los proteinoides pueden reunirse en estructuras que sugieren protocélulas. Llamadas "microesferas" por Fox, esas partículas microscópicas también pueden crecer por acreción, proliferar a través de la fisión y ramificarse por varias generaciones hasta el punto de participar en una comunicación interpartículas a través de la transferencia de material^[21].

Los marigránulos, descubiertos por el pescador japonés Fujio Egami^[22], también se han propuesto como un modelo de proteocélulas. Egami descubrió que adicionando compuestos simples como formaldehído e hidroxilamina (compuestos formados fácilmente sobre las condiciones de la Tierra primitiva) al agua de mar enriquecida con elementos tales como molibdeno, zinc y hierro, era posible producir no tan solo aminoácidos, lípidos y otros materiales bioquímicamente importantes, sino que además era posible hacer que los aminoácidos se polimerasen en péptidos y materiales semejantes a las proteínas. Mejor aún, si eran dejados por varios meses, el agua de mar que contiene esos polímeros presentaría unas pequeñas estructuras semejantes

²¹ Duane L. Rohlfsing, "The Development of the Proteinoid Model for the Origin of Life," *Molecular Evolution and Protobiology*, ed. Koichiro Matsuno, Klaus Dose, Kaoru Harada, and Duane L. Rohlfsing (New York: Plenum Press, 1984), pp. 29-43.

²² Fujio Egami, "Chemical Evolution in the Primordial Ocean and the Role of Transition Element Ions" [em Russo], *Izvestiya Nauk SSSR, Seriya Biologicheskaya*, no. 4, 1980, pp. 519-526.

a las células - los marigránulos. A diferencia de los proteinoides de Fox, los marigránulos están delimitados por una superficie de lípidos semejantes a una membrana. La similitud de la estructura de los marigránulos con la estructura de las células comunes es un tanto mayor que la de esta con la de las microesferas. Como las microesferas, los marigránulos son también capaces de crecimiento y reproducción indisciplinada. Si bien los marigránulos poseen habilidades catalizadoras, los estados de "metabolismo" de los marigránulos aún no progresado como aquellos de las microesferas de Fox.

Hace un tiempo, en un encuentro anual de la Asociación americana para avance de la Ciencia, David Deamer^[23] de la Universidad de California en Davis relató estudios que el realizó sobre materiales extraídos del meteorito Murchison. Algunos de los materiales grasos (lípidos) extraídos del meteorito^[24] eran capaces de reunirse en vesículas delimitadas por membranas que se asemejaban mucho a pequeñas células. Como las membranas de las verdaderas células las membranas de Deamer eran capaces de incorporar compuestos como pigmentos, tales como pireno, y exhibían algunas capacidades catalizadoras. Es razonable suponer que membranas como esas, formando estructuras vesiculares hechas como resultado de la espuma de las olas, habrían envuelto gotas de coacervados, microesferas proteinoides y marigránulos, y habrían aumentado grandemente la complejidad de las protocélulas. Más importante, tales protocélulas compuestas, delimitadas por membranas serían capaces de ejecutar una gran variedad de tareas químicas diferentes de forma simultánea, debido a las diferentes capacidades de sus varios componentes. La complejidad y propiedades de tales protocélulas llegarían muy cerca de las de las células primitivas.

Quizás la característica más importante de las entidades protocelulares discutidas es que ellas serían capaces de cambio evolutivo a través de

²³ David W. Deamer, "Amphiphilic Components of Carbonaceous Meteorites: Origins of Membrane Structure," AAAS Abstracts: 14-19, Enero 1989, San Francisco, p. 24.

²⁴ Se debe recordar que muchos meteoritos contienen material primordial creado en la nebulosa solar antes de la formación de la Tierra. Encontrar materiales formadores de membranas en meteoritos es un indicio muy bueno que materiales semejantes estarían presentes en la Tierra naciente.

la selección natural. Las protocélulas que adquirieron combinaciones útiles de protoenzimas y otros materiales útiles tenderían a sobrevivir, y las protocélulas que no las tuviesen tenderían a disolverse. La fusión de protocélulas capaces -de forma separada- de importantes funciones vitales habrían llegado a formas competentes con un gran potencial de sobrevivencia. Casi ciertamente que el principio de "supervivencia del más apto" es más antiguo que la propia vida.

Los primeros serán los últimos

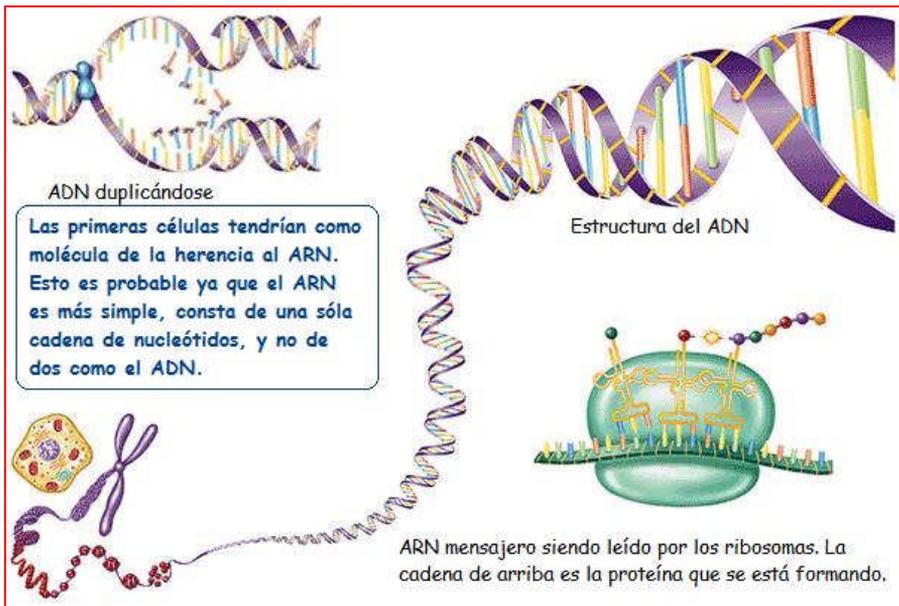
En todas las formas de vida actuales, el ADN es el depositario de la información hereditaria. Es la información almacenada en el ADN que hace la diferencia entre un hombre, un ratón y un musgo. En las células modernas, el ADN permanece separado de los procesos metabólicos, pasando sus instrucciones al ARN mensajero, el cual conduce la síntesis de proteínas - un proceso que es altamente complejo y que claramente es producto de una larga serie de desarrollos evolutivos. El conjunto de reglas que relaciona el "deletreo" de la molécula de ADN y la secuencia de los aminoácidos de las proteínas se conoce como "código genético"[²⁵].

Es de consenso general que el ADN no estaba presente en las primeras células. Antes del advenimiento del ADN, el ARN podría haber servido como material genético en las primeras células, exactamente como ocurre en ciertos virus. La cuestión que aún permanece es si las células primitivas podrían o no haber existido sin ARN, usando proteínas como principales moléculas de información. Vimos anteriormente que los proteínoides de Fox tenían la habilidad de formar más proteínoides - así teóricamente siendo capaces de formar sistemas autorreplicantes- y ellas podrían haber catalizado la formación del ADN y el ARN a partir de sus bloques de construcción. ¿La vida atravesó una fase de proteínas antes de la evolución del código genético? ¿O las proteínas

²⁵ El código genético frecuentemente es confundido con el mensaje genético. El mensaje genético y el contenido entero de la información de la molécula de ADN - la receta que ella contiene. El código genético es la regla de correspondencia entre la estructura del ADN y la estructura de la proteína.

propriadamente dichas (a diferencia de los proteínoides que son ciertas formas más irregulares en su estructura que las proteínas) solo son posibles con un sistema de síntesis dirigido por ácidos nucleicos?

Un gran número de trabajos se han publicado sobre el origen del código genético, y no es posible resumirlo todo aquí. Entretanto, debe mencionarse las impresionantes sugerencias hechas por A.G. Cairns Smith de que el ciclo ADN-ARN-Proteínas de las células modernas fue precedido por formas primitivas que no poseían ninguno de los compuestos bioquímicos principales de ahora son característicos de las células. De acuerdo con Cairns Smith, los primeros sistemas replicantes no eran tampoco orgánicos, eran minerales! Específicamente, estos serían cristales de arcilla autorreplicantes. Sombras de *Génesis* capítulo dos.



Cairns-Smith deja claro que los cristales de arcilla no solo se replicaban, sino que además podían transmitir información de una generación de cristales a la siguiente. Defectos en los cristales, análogos a las mutaciones, podrían pasarse del cristal padre al cristal hijo. Él muestra

que un tipo de selección natural puede operar en un tipo de poblaciones de cristales de arcilla, y que los cristales de arcilla pueden fácilmente haber comenzado a crear y usar sustancias orgánicas para estabilizar sus microambientes y aumentar sus posibilidades de supervivencia y reproducción. Una vez que se conocen varias arcillas que pueden catalizar la formación y la polimerización de aminoácidos, imitar la fotosíntesis y dirigir la formación de ácidos nucleicos, es asombroso —y no forzado-- suponer que un montaje de código genético de ARN y proteínas puede haber ocurrido sobre la superficie de un cristal de arcilla y cuando la combinación surgió, esta podría haber subsistido sin la ayuda de un sustrato de arcilla.

Cairns-Smith compara el sistema delicadamente balanceado de ácidos nucleicos-proteínas con un arco. De la misma forma que un arco no puede mantenerse sin la presencia del fundamento principal, y este no puede mantenerse sin el apoyo del resto del arco, así también en las células vivas los ácidos nucleicos no pueden funcionar sin la actuación de las proteínas enzimáticas, y las proteínas enzimáticas no pueden ser producidas sin la ayuda de los ácidos nucleicos.

Para hacer un arco de piedras es necesario un andamio de algún tipo para apoyar las piedras antes que estas estén todas en el lugar y poderse apoyar las unas a las otras. Es frecuente el caso que un proceso de construcción incluya cosas que están ausentes en el resultado final. De esa forma, en la evolución, se pueden sustraer cosas. Eso puede llevar a un tipo de dependencia mutua de componentes que es una característica resonante de la maquinaria central de control bioquímico.[²⁶]

Sea como fuese las futuras investigaciones podrán mostrar cual fue el papel, en el caso de los cristales de arcilla como andamios que permitieron la construcción del código genético, y es bastante claro que el ADN -el primer ministro del gobierno bioquímico- fue en verdad un refinamiento tardío y no hacía parte de las primeras células.

²⁶ A. G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story* (Cambridge University Press, 1985), p. 115.

Y llegó el oxígeno...

Los seres vivos más primitivos que podían realizar la fotosíntesis lo hacían sin liberar oxígeno a la atmósfera. No está claro cuándo ese tipo de fotosíntesis dominó el escenario primitivo. Hace casi 2.500 millones de años atrás, un cierto número de algas fotosintéticas evolucionó, desarrollando una forma nueva y mejorada de fotosíntesis que liberó oxígeno en el océano y en la atmósfera. Para las primeras formas de vida, el oxígeno fue la primera forma de "desecho tóxico", y la selección natural llevó al desarrollo de enzimas (como la catalasa) que podían proteger a las células de los efectos dañinos del oxígeno^[27]. Por fin las células adquirieron la habilidad de convertir la adversidad en ventaja y, en verdad llegaron a usar el oxígeno como un medio de "quemar" su combustible (azúcar y otras moléculas simples) que permitían aumentar en gran forma las cantidades de energía con la cual podían ejecutar varios tipos de actividades nuevas. Una tornó posible, gracias a la respiración aeróbica basada en el oxígeno, generar enormes cantidades de energía en períodos de tiempo cortos, las células pudieron volverse móviles, y los primeros animales unicelulares se hicieron posibles.

El movimiento es la esencia de la animalidad, el movimiento significativo era inviable antes del aprovechamiento del oxígeno. Fue la utilización del oxígeno lo que llevó al surgimiento de los heterótrofos secundarios, los animales. No hay almuerzo gratis en la naturaleza, y las primeras células que adquirieron las mutaciones que les permitieron moverse fácilmente en su mundo acuático tuvieron que sacrificar la maquinaria necesaria para hacer fotosíntesis. En lugar de crear su propio alimento a partir de elementos sencillos, ellas podían simplemente engullirse a sus vecinos más lentos y digerirlos a través de las enzimas que habían desarrollado tiempos atrás.

²⁷ El oxígeno y su alta reactividad química, es como un toro en una tienda de cristales cuando corre suelto en la célula. A no ser que sus movimientos sean direccionados cuidadosamente, es probable que este ataque y arruine muchas de las moléculas informacionales de la célula. Este podría hasta matar a la célula.

Una vez que el paso de movilidad celular aceleró en la actividad animal, el curso futuro de la evolución se tornó más claro, por lo menos en sus contornos generales. Habría una ventaja selectiva para las células que se agrupasen para formar organismos multicelulares, animales tan grandes como para buscar y devorar la vegetación primitiva del mar. Una vez que los animales herbívoros se hicieron abundantes, la selección natural llevaría al surgimiento de los carnívoros -animales que generalmente tienen que ser más móviles (y por tanto más inteligentes) que los herbívoros.

Eso dio inicio a la primera versión de una "carrera armamentista" que continúa hasta hoy. Con la selección natural cazando los herbívoros, la selección natural tendería a seleccionar a los herbívoros más rápidos y más expertos, haciéndolos más difíciles de cazar. Esto a su vez provocó la selección de carnívoros aún más rápidos y expertos. Por fin ciertos carnívoros adquirieron la habilidad de usar y hacer herramientas -armas con las cuales tener una ventaja decisiva e irreversible sobre los herbívoros. El oxígeno iría a propiciar un segundo tiempo en la historia de la vida: el descubrimiento del fuego.

El *Homo sapiens* sería mejor descrito como *Homo prometheus*, a causa del héroe mítico que robó el fuego de los dioses y lo trajo a la tierra para el bien de nosotros, los mortales. Así pues la historia humana es, en un sentido profundo, la historia del fuego y de las tecnologías secundarias que generó, y la ciencia es una parte de esa historia. Con el fuego, Sydney Fox calienta rocas magmáticas, las pulverizó con soluciones de aminoácidos, y analiza los proteínoides que se forman sobre su superficie. Stanley Miller pasó chispas a través de atmósferas primitivas para atestiguar la formación de la química de la vida. Las chispas eléctricas, claro está, resultan de corrientes eléctricas generadas a kilómetros de distancia por los fuegos del carbón y el petróleo producidos en las generadoras. Los fuegos de la ciencia brillan fuertemente, gracias al proceso generador del oxígeno desarrollado por humildes algas hace muchos eones -algas que ahora buscamos entender.

La pregunta que Darwin no esperó poder responder -que Newton, Galileo y los genios antiguos no osaron siquiera formular- está próxima a ser respondida. Miles de científicos en cientos de laboratorios se están aproximando al problema del origen de la vida. Es fascinante contemplar el proceso que se ha hecho, a pesar del hecho que el estudio experimental de la biopoyesis es apenas más viejo que la memoria de la segunda guerra mundial. Cuando nací, hace unos 60 años, difícilmente alguien podía sospechar que los productos químicos de la vida serían tan simples y fáciles de producir. Cuando me formé en la facultad, nadie podría haber sospechado la facilidad con la cual las protocélulas y los marigránulos se podrían haber formado en el agua de mar. Y quién podría esperar encontrar la construcción de membranas celulares en meteoritos?

Si la vida como la conocemos es o no el resultado de un "golpe de estado genético" -de sistemas orgánicos suplantando los sistemas autorreplicantes minerales- o sí el código genético tuvo un origen aún insospechado, está por definirse. Pero nosotros conoceremos la respuesta, y esta se encuentra muy cercana. ■

www.omegalfa.es
Biblioteca Virtual