

El Origen de la Célula

Cómo se originaron las células? Uno de los rompecabezas más complicados del origen de la vida es cómo se formaron las primeras células y su metabolismo. Pudiera pensarse que las primeras células fueran como los organismos más pequeños y simples que viven hoy en día, los microbios conocidos como micoplasmas.

Las células de los micoplasmas son realmente diminutas, más de mil millones de veces menores que un protozoo, y albergan tan sólo una fracción del ADN y de las proteínas normalmente presentes en una célula. Pero todos los micoplasmas son parásitos, versiones menores y simplificadas de microorganismos mayores de vida libre, y sólo pueden crecer y reproducirse en el interior de otras células, por lo general de mamíferos, un modo de vida claramente imposible para las primeras formas de vida.

Las bacterias comunes ofrecen un modelo alternativo, pero los microbios de vida libre son demasiado complejos, compuestos de cientos de polímeros diferentes (entre ellos, unos quinientos tipos de ARN), más de un millar de enzimas y decenas de miles de moléculas. Las primeras células debieron ser considerablemente más simples.

Para conocer cómo eran las primeras células es necesario levantar el velo evolutivo que separa la vida actual de sus principios. Esta tarea apenas ha comenzado. Los avances en la comprensión de la historia temprana de la vida sólo se producen progresivamente, así que hasta que no se disponga de un modelo del origen de los monómeros y los polímeros parecería ocioso atacar esta compleja cuestión.

Pero aunque apenas se conozca nada con certeza acerca del origen de la vida celular, sí está claro que ocurrió según una secuencia de tres estadios:

1. Es probable que ya existieran sistemas químicos que la mayoría de científicos describirían como vivos antes de que fueran empaquetados en células. La evidencia fósil de este estadio precelular pudiera no llegar a descubrirse nunca, puesto que su composición química sería demasiado frágil para conservarse, pero se cree que durante un cierto periodo la Tierra primitiva estuvo poblada por moléculas vivas, genes desnudos primordiales de ácidos nucleicos capaces de autorreproducirse.
2. A causa de su composición química, estos y otros compuestos orgánicos del caldo primordial habrían acabado por agregarse en diminutos lóbulos protocelulares, ancestros potenciales de células con pared celular. Las pruebas empíricas de este estadio parecen haberse evadido también de la historia, si bien es posible que algún día se hallen células fósiles más antiguas que las más antiguas conocidas en la actualidad.
3. Las primeras células estarían impulsadas por una forma sencilla de metabolismo que estableció las bases para la evolución posterior de una maquinaria metabólica más compleja.

Consideremos cada uno de estos estadios por separado.

El problema de la gallina y el huevo

La vida puede multiplicarse solamente si la información química almacenada en los ácidos nucleicos de los cromosomas se copia y se transmite a la descendencia. La mayor parte de esta información dirige la síntesis de proteínas enzimáticas, entre las cuales se encuentra un tipo especial (las polimerasas) que se necesitan para copiar los propios ácidos nucleicos. Así pues, ¿qué fue primero, los ácidos nucleicos necesarios para sintetizar las polimerasas, o las enzimas necesarias para sintetizar los ácidos?

Durante muchos años, los intentos por resolver este problema, que recuerda al de la gallina y el huevo, se centraron en el ADN y el papel que desempeña en la fabricación de proteínas enzimáticas. Pero como el propio ADN es un producto de la evolución, una versión joven y más

avanzada de un ácido ribonucleico antecesor más primitivo, la atención pasó a centrarse sobre el ARN como almacén de información genética primigenio de la vida.

A principios de los años ochenta, este cambio de enfoque recibió su recompensa con el descubrimiento de los ribozimas, un tipo especial de ARN que no sólo alberga información, sino que además actúa como un sistema multienzimático. Aunque todos los ribozimas modernos son largos y complejos, las cortas partes que tienen propiedades enzimáticas son más sencillas y pudieran asemejarse a los ARNs de la vida primitiva.

Al igual que las proteínas enzimáticas, los ribozimas pueden dividir moléculas o unir las, y algunos pueden realizar ambas funciones. Algunos son auto-divisivos, capaces de seccionar una parte de la propia molécula y volver a unir los trozos resultantes. Otros pueden cortar una parte de ellos mismos y moverla a otro lugar en la molécula. Aun otros son capaces de ensamblar hebras de ARN.

Aunque no se ha encontrado ningún ribozima capaz de hacer una copia completa de sí mismo, el repetido cortar y pegar de que son capaces algunos demuestra una habilidad elemental para la autorreproducción. Algunos experimentos en los que se juntan en tubos de ensayo varias versiones de estos híbridos de gen y enzima muestran cómo habría podido iniciarse su evolución. Esta serie de descubrimientos recientes hace razonable la concepción de un mundo precelular en el cual genes desnudos primordiales de ARN se reprodujeran a sí mismos sin la ayuda de proteínas enzimáticas.

El objetivo último de crear vida en un tubo de ensayo, de fabricar a partir de cero moléculas vivas que se autoensamblen y se autorreproduzcan es cada vez menos un tema de ciencia-ficción.

Las células son como burbujas de jabón. Es obvio que los sistemas vivos necesitan células. Si los jugos de los organismos no estuvieran contenidos, se desparramarían, se mezclarían con el medio y perderían el orden. Esta separación, que quizá no fuera necesaria para los genes desnudos primordiales, se hizo obligatoria a medida que la vida ganó en complejidad.

La clave para entender el origen de las células está en el adagio de los profesores de química: lo semejante disuelve a lo semejante. El aguarrás y la pintura se mezclan fácilmente porque son químicamente semejantes. Pero el agua y el aceite no se mezclan porque su estructura química es muy diferente.

Las moléculas de agua (H_2O) tienen forma de V con los dos átomos de hidrógeno en las puntas de la V y el átomo de oxígeno en la base. Gracias a esta disposición, las moléculas de agua funcionan como diminutos imanes: en un polo están los hidrógenos con carga positiva, y en el otro polo, el oxígeno, con carga negativa. Las moléculas de aceite, en cambio, no están cargadas, cual trocitos de plástico o de madera. Así, las moléculas de aceite forman bolas en el agua porque tienen más afinidad entre ellas (lo semejante disuelve a lo semejante) que con el agua que las rodea.

Los jabones son compuestos especiales que construyen un puente entre el agua y el aceite. Los átomos cargados de uno de los extremos de una molécula de jabón el extremo hidrófilo (con afinidad por el agua) se disuelven en agua. El resto de la molécula es hidrófobo (con aversión al agua). Una larga cadena de átomos de hidrógeno y carbono químicamente semejante al aceite y la grasa, en los que se disuelve fácilmente. El jabón funciona porque mientras uno de los extremos se mezcla con el agua, el otro extremo disuelve la grasa.

Las células tuvieron su origen en procesos químicos parecidos. El caldo primordial era un ligero consomé en el cual los compuestos orgánicos hidrófobos se juntaban en grumos de forma natural según el parecido de su estructura química. Entre estos compuestos se contaban cadenas de hidrógeno y carbono, hidrocarburos como las colas de las moléculas de jabón. Algunas de estas moléculas tenían un extremo cargado eléctricamente y, cual jabones, tendían a agregarse formando pequeñas burbujas en las que los extremos cargados de las moléculas apuntaban hacia el agua y las colas hidrófobas se congregaban en el interior, mezclándose con otros compuestos orgánicos hidrófobos.

Podemos vislumbrar el origen de las células por este proceso, aunque sólo vagamente. Aunque fina y frágil, la piel de las burbujas protegía los compuestos orgánicos concentrados en su interior, donde podían reaccionar y formar nuevas configuraciones. Con el tiempo, una segunda capa de moléculas semejantes al jabón se combinó espalda contra espalda con la primera para formar una película de dos capas, una estructura semejante a la de las membranas de las células actuales. La capa externa separa la célula del medio externo, y la capa cargada interna encierra una mezcla acuosa de compuestos orgánicos. Más tarde, esta doble capa flexible se robusteció con la adición de proteínas a la membrana. Estas ayudaban a mantener un intercambio controlado de nutrientes y desechos con el exterior. Todavía había de reforzarse con una robusta banda de carbohidratos y proteínas que la transformó en una resistente cápsula, como la que conforma las paredes celulares de las bacterias actuales. La estructura física, la configuración genética y los primeros mecanismos de producción de energía de las células evolucionaron al unísono desde el origen de la vida, y no uno tras el otro.

Pero una buena parte de la maquinaria metabólica no evolucionó hasta mucho más tarde, millones de años después de que aparecieran las primeras células.

Los fundamentos de la vida

El metabolismo, el conjunto de procedimientos que permiten a las células fabricar y romper moléculas, es sorprendentemente simple. No se inventaron más que unas pocas vías, casi todas ellas versiones revisadas de vías más antiguas. El metabolismo se erigió como las murallas de una ciudad medieval, construidas en estadios sobre las piedras colocadas por generaciones anteriores.

La historia del metabolismo no es más que un ejemplo de cómo la evolución construye poco a poco sobre sistemas ya existentes. Por qué opera la evolución de este modo es fácil de comprender. Las células son como relojes increíblemente intrincados, compuestos por un número enorme de partes que para funcionar dependen de otras por vías complejas.

Las grandes modificaciones conducen al desastre. Pero se pueden hacer pequeños cambios, y un pequeño cambio tras otro acaban por dar lugar a una modificación notable. Este principio de conservadurismo y economía, una importante lección sobre el proceso evolutivo, ayuda a resolver rompecabezas tan interesantes como por qué los humanos respiran oxígeno y por qué la vida se divide entre consumidores y consumidos.

Se conocen alrededor de dos millones de especies de organismos vivos (y quedan de tres a cinco veces más especies por conocer). Para mantenerse vivas, todas ellas requieren dos cosas esenciales: CHON y energía. La reproducción y la evolución van de la mano. Los organismos no pueden evolucionar sin reproducirse, pero para reproducirse requieren CHON, para formar la descendencia, y también energía.

Sólo se han inventado dos modos de satisfacer estas necesidades: autotrofia, la estrategia de las plantas; y heterotrofia, la estrategia de los animales.

Los fundamentos de la vida Para satisfacer el requerimiento de CHON (moléculas de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno), los autótrofos (que se alimentan a sí mismos; del griego autos, uno mismo, y trophos, alimentar) absorben nutrientes simples (generalmente dióxido de carbono, agua, nitrato y fosfato) y construyen con ellos las moléculas orgánicas que los han de sustentar. Algunos autótrofos (los llamados quimioautótrofos) obtienen la energía para la síntesis de moléculas orgánicas de reacciones químicas no alimentadas por la luz, pero la mayoría son fotosintetizadores (o sea, fotoautótrofos), plantas o microorganismos semejantes que obtienen la energía de la luz del sol para fabricar compuestos orgánicos simples como la glucosa. En ambos tipos de autótrofos, parte de la energía absorbida se almacena en los enlaces químicos que unen C, H, O y N, y puede liberarse más tarde cuando el organismo la necesite.

Los autótrofos se construyen a sí mismos y se alimentan a sí mismos: toman CHON del medio para fabricar compuestos orgánicos que pueden luego romper para utilizar la energía que almacenan.

Los animales y organismos semejantes (protozoos, hongos y la mayoría de los microbios no fotosintetizadores) siguen una estrategia diferente, la heterotrofia (que se alimentan de otros; del griego heteros, otro, y trophos, alimentar). Los heterótrofos obtienen CHON de la comida y la energía de los enlaces que unen los átomos en las moléculas orgánicas de la comida. Tal como Oparin intuyó hace décadas, los animales son metabólicamente más sencillos que las plantas. Los heterótrofos usan alimentos preparados: sólo necesitan romperlos. En cambio, las plantas y otros autótrofos tienen que hacer su propia comida para luego romperla.

La estructura del mundo vivo actual no es compleja. Sólo existen dos requerimientos, CHON y energía, y sólo dos estrategias principales para satisfacerlos, la autotrofia y la heterotrofia. El mundo vivo siempre ha tenido aproximadamente esta misma estructura, pero ésta, igual que la propia vida, ha evolucionado desde unas raíces más simples. Cada una de las dos estrategias se da en dos versiones, una primitiva (que evolucionó primero) y otra más avanzada (que evolucionó después). La diferencia radica en si el oxígeno molecular (O_2) desempeña un papel o no. En la forma primitiva de la fotosíntesis no se produce oxígeno y, al igual que la forma primitiva de la heterotrofia, tiene lugar en un ambiente anaerobio, es decir, en ausencia de oxígeno.

Pero el oxígeno es fundamental en las versiones avanzadas de ambos: la forma avanzada de la fotosíntesis produce oxígeno y la forma avanzada de la heterotrofia lo consume en la respiración.

Dos requerimientos, dos estrategias principales y dos únicas versiones de cada estrategia: una primitiva y otra avanzada.

Una vez inventadas por los microbios primitivos, mucho antes de que aparecieran las plantas, este modelo se ha transmitido a todos los ecosistemas. Por eso el mundo está dividido entre heterótrofos que consumen y autótrofos que son consumidos (y por eso nosotros, como otros heterótrofos, dependemos tanto de la vida vegetal).

La evolución es notablemente conservadora! Esta es una buena historia, pero es cierta? Los microbios están relacionados sólo remotamente con las plantas y animales actuales. Cómo pudieron transmitir sus mejunjes metabólicos a lo largo de miles de millones de años y billones de generaciones?

La evolución preempaquetada

Se sabe la respuesta, y los actores son dos grupos de eubacterias: las cianobacterias y las bacterias purpúreas.

La forma avanzada de la fotoautotrofia, la fotosíntesis oxigénica (que produce oxígeno), fue inventada por las cianobacterias hace unos 3.500 millones de años cuando la Tierra se encontraba en su infancia. Mucho más tarde, hace quizá tan sólo 2.000 millones de años, uno de sus descendientes fue tragado por un organismo unicelular eucariota. Como la cianobacteria capturada (pero no digerida) llevaba consigo la maquinaria metabólica para la fotosíntesis, se estableció entre ambos organismos una relación simbiótica (yo por ti, tú por mí). La cianobacteria funcionaba como una práctica factoría interna de comida, mientras que el huésped eucariota proporcionaba refugio (este tipo de relación recibe el nombre de endosimbiosis). Con el tiempo, la alianza se hizo más fuerte, la mayoría de los genes de la cianobacteria se transfirieron al huésped y los endosimbiontes evolucionaron hasta convertirse en las estructuras que hoy conocemos como cloroplastos, unos cuerpos celulares protegidos por una membrana (orgánulos) que albergan el aparato fotosintetizador en los fotoautótrofos eucariotas como las plantas.

Una secuencia de eventos similar condujo a la formación de la célula eucariota, que respira oxígeno: bacterias purpúreas endosimbiontes evolucionaron hasta convertirse en las factorías de energía aeróbicas de las células eucariotas, los orgánulos cilíndricos conocidos como mitocondrias. La evolución de la endosimbiosis proporcionó a los eucariotas la maquinaria metabólica para la fotosíntesis y la respiración ya preempaquetada y lista para usar en unos sistemas ya probados y perfeccionados.

La validez de la lección persiste: la evolución es realmente conservadora y económica!

La evolución preempaquetada explica por qué se encuentra el mismo tipo de fotosíntesis en las plantas y en las cianobacterias, pero no explica sus inicios. Es una versión refundida de una invención más temprana o se inventó desde cero en las cianobacterias hace miles de millones de años? Y qué origen tuvo la respiración aeróbica? La respiración requiere oxígeno; entonces, cómo pudo establecerse si no había oxígeno en la atmósfera primitiva?

En pocas palabras, si la evolución sólo construye sobre algo que ya existe, cómo se producen las invenciones?

La forma de vida más primitiva extrae energía de la fermentación del azúcar

Empecemos por el principio. Entre las formas de vida más primitivas existían algunas que realizaban la glucólisis, una forma de fermentación (metabolismo anaerobio) basada en escindir una molécula de seis carbonos de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) en dos moléculas de tres átomos de carbono de piruvato. La reacción produce energía, que se libera al romperse los enlaces químicos de la glucosa, y parte de esta energía se almacena para su uso futuro en un compuesto denominado ATP (trifosfato de adenosina, en sus siglas inglesas). Cada vez que se escinde una molécula de glucosa se forman dos unidades de energía (dos moléculas ricas en energía de ATP).

La glucólisis es casi tan antigua como la vida misma. Es fundamental para la vida y se da en todos los organismos. Un paquete de diez reacciones aceleradas por sendas enzimas es demasiado grande para haberse originado más de una vez. Además se trata del mecanismo biológico de producción de energía químicamente más sencillo, se produce en el citosol acuoso de las células (en lugar de precisar un orgánulo o membranas como en los sistemas más avanzados), libera mucha menos energía que los mecanismos más avanzados y es anaerobio como corresponde al ambiente primitivo.

La glucólisis requiere glucosa. Pero los experimentos sobre la Tierra primitiva del tipo del de Miller demuestran que en el caldo primordial se encontraban muchos otros azúcares. Así pues, por qué se convirtió la glucosa en el combustible universal de la vida? Probablemente porque es particularmente resistente, siendo el azúcar de seis carbonos menos sensible a cambios de temperatura, acidez y otros. En un ambiente severo, la glucosa era el azúcar más fácil de obtener.

De acuerdo con esta concepción (de Oparin-Miller), la Tierra primitiva estaba poblada por microorganismos heterótrofos anaerobios que se alimentaban de glucosa en el caldo primordial. Pero al multiplicarse, estas células simples habían de acabar por agotar el suministro de glucosa. Si no hubiera aparecido una nueva fuente de glucosa, habrían acabado al borde de la extinción y la glucólisis se habría perdido para siempre.

Una nueva fuente de combustible

El problema era la escasez de glucosa. Para mantenerse, la vida necesitaba encontrar una fuente de glucosa más abundante. Se halló una solución inicial en la evolución de unos microbios capaces de fabricar glucosa por sí mismos mediante una suerte de glucólisis al revés. La fabricación de glucosa (técnicamente, biosíntesis de glucosa) comporta once pasos enzimáticos. Siete de éstos utilizan los mismos enzimas que la glucólisis, pero operan en sentido inverso. Para construir un sistema de fabricación de glucosa no se tuvo que cambiar la glucólisis para nada, se duplicaron los genes de siete de los enzimas y sólo hubo que añadir cuatro enzimas adicionales. En lugar de inventar un nuevo juego de genes y enzimas, la evolución fue conservadora y económica.

Cómo puede el mismo juego de enzimas catalizar una secuencia de reacciones químicas hacia delante y hacia atrás?, y por qué sólo se transfirieron a la nueva vía siete de los enzimas de la glucólisis, y no los diez? Imaginemos un tren de juguete que se mueve sobre una vía. Si la vía se extiende sobre un plano, se necesita la misma fuerza para moverlo en un sentido que para moverlo en el opuesto. Así ocurre con la mayoría de las reacciones catalizadas por enzimas: con la misma facilidad que el enzima acelera la reacción en un sentido, la acelera en el sentido opuesto. Se trata de reacciones reversibles. Pero el caso es diferente si la vía discurre por una colina. Para que el tren suba la cuesta se necesita energía adicional, mientras que cuando el tren baja por la cuesta se libera energía (debido a la gravedad).

De igual modo, las reacciones enzimáticas que o bien consumen energía o bien la liberan (liberada o absorbida por moléculas de ATP) sólo ocurren fácilmente en un solo sentido. En esencia, son irreversibles. Durante la glucólisis, dos de las reacciones requieren energía mientras que una tercera la libera. Estos son los tres pasos irreversibles que catalizan los cuatro nuevos enzimas inventados para la biosíntesis de glucosa. No obstante, esta solución a la escasez de combustible habría sido, a lo sumo, una solución temporal, un parche. Las células que fabrican glucosa de este modo usan tres veces más energía de la que obtienen durante la fermentación de la glucosa. Ningún organismo puede sobrevivir durante mucho tiempo consumiendo más energía de la que produce. Al igual que cargar gastos a una tarjeta de crédito, esta solución, válida a corto plazo, a largo plazo sólo puede traer problemas.

Pero la biosíntesis de glucosa fue un punto de partida que pronto dio pie a la solución definitiva al problema energético de la vida: la evolución de una nueva vía de síntesis de glucosa que usaba la energía de la luz.

Pero antes era necesario solucionar otro problema.

El nitrógeno plantea un problema: Aunque la glucosa es una fuente práctica de carbono, hidrógeno y oxígeno, la vida también necesita nitrógeno para las proteínas, los ácidos nucleicos y el ATP. Cuál es la fuente de nitrógeno? Para que los microbios heterótrofos anaerobios prosperen basta con proporcionarles glucosa (fuente de CHO y energía) y amoníaco (fuente de N). Ambos debían ser abundantes cuando se originó la vida, pero el amoníaco (NH_3) pronto se hizo escaso. La luz UV rompe fácilmente los enlaces químicos que unen el nitrógeno al hidrógeno en el amoníaco. Como prácticamente no había oxígeno molecular (O_2) en la atmósfera primitiva, la capa de ozono (O_3) estratosférico que hoy forma un escudo contra la radiación UV no existía y el amoníaco se destruía con rapidez. El nitrato (NO_3), la otra fuente de nitrógeno utilizada por muchos otros microorganismos, era también escaso. En la actualidad se forman grandes cantidades de nitrato cuando el nitrógeno y el oxígeno se combinan durante las tormentas eléctricas, pero esto no podía ocurrir en la atmósfera primitiva porque no contenía oxígeno.

Debido a la necesidad de obtener nitrógeno, la escasez de amoníaco y de nitrato planteaba un serio problema para la vida. Sólo quedaba otra fuente por explotar: el abundante gas nitrógeno de la atmósfera. Pero los átomos de nitrógeno de N_2 están unidos fuertemente mediante tres enlaces. Para romperlos era necesario inventar un nuevo sistema enzimático. El agente responsable de combinar el nitrógeno atmosférico con el hidrógeno y fijarlo en forma de amoníaco se denomina nitrogenasa o complejo Nif, y la pieza clave del complejo es una proteína, la ferredoxina. Como la fijación de nitrógeno es una reacción energéticamente muy costosa, el complejo Nif sólo entra en acción como último recurso cuando ya se ha agotado el suministro de amoníaco y nitrato. Un sistema tan costoso no hubiera evolucionado de no haber sido esencial para la vida.

El complejo Nif movido por la ferredoxina, data de los primeros estadios del origen de la vida, cuando no había oxígeno en la atmósfera. La mayoría de las eubacterias primitivas y de las arqueobacterias pueden fijar el nitrógeno atmosférico; en cambio, los eucariotas, que evolucionaron mucho más tarde, no pueden.

Al igual que otros sistemas enzimáticos antiguos, la fijación de nitrógeno se frena en presencia de trazas de oxígeno molecular. La fijación de nitrógeno tiene lugar sólo si el sistema enzimático está aislado del O_2 .

Incluso en cianobacterias productoras de oxígeno, que han desarrollado células y mecanismos químicos especiales para proteger el sistema de fijación de nitrógeno.

Cómo se originó la ferredoxina?

Los cincuenta y cinco aminoácidos que forman la ferredoxina de una bacteria típica (*Clostridium*) están ordenados de una manera que desvela la historia de la molécula.

La proteína comenzó con sólo cuatro aminoácidos. El gen de este cuarteto se multiplicó repetidas veces para formar un gen mayor de una protoferredoxina compuesta por veintiocho aminoácidos, es decir, siete cuartetos unidos en una cadena. Mutaciones posteriores añadieron otro aminoácido y cambiaron otros de lugar. y luego el gen esta proteína de veintinueve aminoácidos se duplicó para dar lugar a una ferredoxina primitiva de cincuenta y ocho aminoácidos de longitud.

Tras varias mutaciones, se eliminaron tres aminoácidos de uno de los extremos de la molécula para formarse finalmente la ferredoxina del *Clostridium* actual. Utilizando como pieza de construcción el cuarteto inicial, la ferredoxina evolucionó simplemente por copia y reestructuración de un sistema que ya funcionaba. Nuevamente, la evolución fue conservadora y económica.

La copia de genes debió de ser especialmente frecuente durante el desarrollo inicial de la vida, cuando el CHON y la energía eran escasos. En experimentos de laboratorio con bacterias cultivadas en medios pobres se ha visto que las que sobreviven son casi invariablemente mutantes que poseen varias copias extra de enzimas metabólicas. Aun en un medio normal, se encuentran genes duplicados en aproximadamente una de cada mil bacterias, de modo que en mil millones de bacterias (un tamaño normal para una colonia de organismos tan pequeños) hay más o menos un millón con copias extra.

Mientras haya al menos una copia que funcione, las otras pueden mutar sin causar problemas y así se producen a veces genes que codifican enzimas más rápidos que los originales. Una vez iniciado el desarrollo de la vida, la copia de genes le dio abundante grano al molino evolutivo. Según el esquema bosquejado hasta el momento, la estrategia primera de la vida fue la heterotrofia anaerobia, para la cual se obtenía CHO del consomé primordial, N del nitrógeno atmosférico (y de amoníaco y nitrato, si había) y energía de la fermentación.

Pero la glucosa era un combustible escaso incluso después de que algunas células encontraran una manera de producirlo. Este problema se solucionó con la aparición de los autótrofos capaces de hacer la fotosíntesis, un proceso que produce grandes cantidades de glucosa (a diferencia de los mecanismos no biológicos) de un modo energéticamente rentable (a diferencia de la biosíntesis de glucosa).

La fotosíntesis se puede hacer de dos maneras, una primitiva y otra avanzada, que tienen mucho en común. Utilizan pigmentos parecidos y procedimientos químicos semejantes para fabricar el mismo producto (glucosa) a partir de la misma materia prima (dióxido de carbono) mediante una vía metabólica prácticamente idéntica (la biosíntesis de glucosa usando energía de la luz) y ambas se encuentran en miembros del dominio de las eubacterias.

Los fotosintetizadores primitivos, que eran variedades de bacterias fotosintéticas, utilizan bacterioclorofila para captar la luz y no producen oxígeno como producto derivado (es decir, es un proceso anoxigénico). Los fotosintetizadores avanzados, las cianobacterias, utilizan clorofila (del mismo tipo que se encuentra en las plantas) para captar la energía de la luz y su fotosíntesis es oxigénica, es decir, libera oxígeno.

Ambos tipos de fotosintetizadores pueden usar asimismo la energía de la luz para auxiliar la absorción de materia orgánica del medio, un modo de vida (fotoheterotrofia) que es aún más primitivo que la fotosíntesis. A lo que parece, la energía de la luz se utilizaba primero para coadyuvar a la heterotrofia y sólo más tarde para la biosíntesis de glucosa en los fotosintetizadores autótrofos: otro ejemplo del conservadurismo y la economía de la evolución.

Aunque estrechamente relacionadas, las dos formas de fotosíntesis difieren en varios aspectos. Las dos combinan hidrógeno y dióxido de carbono para fabricar glucosa, pero el hidrógeno tiene distinta procedencia. En el proceso primitivo, el hidrógeno proviene del gas hidrógeno (H_2), de pequeños compuestos orgánicos o de sulfuro de hidrógeno (H_2S). En la fotosíntesis avanzada, el hidrógeno siempre procede del agua, y esta es la razón por la cual se libera oxígeno, que queda libre cuando la molécula de H_2O se escinde para utilizar el hidrógeno. Para usar el hidrógeno del gas o de compuestos orgánicos no hace falta mucha energía, y para usar el hidrógeno del H_2S apenas algo más (78 kilocalorías).

Pero el hidrógeno y el oxígeno están fuertemente unidos en las moléculas de agua y para separarlos hace falta invertir mucha más energía (118 kilocalorías). La fotosíntesis primitiva, la anoxigénica, requiere menos energía que la avanzada. Por ello, la primitiva es más sencilla. Utiliza un solo fotosistema sensible a la luz para captar la energía de la radiación solar, mientras que la fotosíntesis avanzada utiliza dos fotosistemas, vinculados por una cadena de enzimas que transfieren energía del uno al otro.

La evolución es casi siempre conservadora y económica. Sin embargo, la fotosíntesis avanzada requiere más energía y es más compleja que la primitiva. Qué compensa estos inconvenientes?

La guerra de gases microbiana

Parte de la respuesta radica en la disponibilidad de hidrógeno. En las formas que los fotosintetizadores primitivos podían usar, el hidrógeno era localmente abundante (en fuentes termales y fumarolas, por ejemplo, donde burbujea el H₂S hasta la superficie), pero debía de ser escaso en otros lugares. El agua, en cambio, existía en casi todos los ambientes. Al poder usarla, los fotosintetizadores avanzados disponían de nuevos ambientes que colonizar.

Las interacciones con el oxígeno molecular eran si cabe más importantes. Mientras que bastan trazas de oxígeno libre para inactivar los enzimas que usan las bacterias fotosintéticas primitivas para fijar nitrógeno o fabricar bacterioclorofila, las cianobacterias, que realizan la fotosíntesis oxigénica, crecen sin problema en presencia de oxígeno. Esta diferencia tuvo un enorme impacto sobre la historia de la vida.

Imaginemos lo que ocurrió cuando el primer productor de oxígeno apareció en escena. Los microbios de esta nueva cepa mutante, las primeras cianobacterias, compartían un ambiente de aguas someras con su ascendencia genética. Las bacterias fotosintéticas anaerobias, donde los dos grupos competían por la luz. Pero los recién llegados traían consigo una ventaja contundente en la lucha darwiniana. Su nuevo tipo de fotosíntesis producía oxígeno molecular, un gas tóxico para sus vecinos anaerobios. Había estallado una guerra de gases entre los microorganismos!

Los ascendentes bacterianos se encontraban en una situación desesperada, incapacitados para fijar gas nitrógeno o fabricar bacterioclorofila. Su supervivencia estaba en entredicho: sólo podían retirarse o morir. Gracias a unos cuantos trucos aprendidos tempranamente en su historia, las bacterias primitivas se retiraron y sobrevivieron.

Cuando estos fotosintetizadores primitivos se originaron y empezaron a evolucionar, el mundo estaba prácticamente desprovisto de oxígeno libre y bañado en la letal radiación UV. Para fotosintetizar tenían que estar expuestos a la luz del sol, pero si intentaban crecer en donde hubiera demasiada luz, no lo contaban. Para solucionar este problema, vivían en los fondos lodosos de los mares someros, protegidos de la radiación UV por una capa de agua, y además muchos desarrollaron la capacidad de deslizarse para así poder escapar de ambientes demasiado expuestos. Cuando las cianobacterias productoras de oxígeno invadieron la escena, los anaerobios incapaces de moverse seguramente murieron a montones, pero las bacterias fotosintéticas capearon el temporal retirándose a un ambiente libre de oxígeno dentro de los lodos del fondo. Los fotosintetizadores primitivos, primitivos pero listos, sobrevivieron huyendo de la zona de guerra.

En la actualidad, las cianobacterias y las bacterias fotosintéticas viven armoniosamente en comunidades laminares de estromatolitos, donde coexisten porque disponen de pigmentos distintos para captar la luz. Los productores de oxígeno pueblan la capa más superior y los fotosintetizadores anoxigénicos las capas inferiores (y aun las bacterias anaerobias que no necesitan luz pueden habitar en capas inferiores). Aunque la clorofila de las cianobacterias absorbe la mayor parte de la luz, esto no acaba con las bacterias fotosintéticas subyacentes porque su bacterioclorofila es sensible a la luz de una longitud de onda tal que se filtra hasta donde habitan.

Por qué respiramos oxígeno?

Según el dicho, la basura de uno es el tesoro de otro. Para los anaerobios, el oxígeno no sólo es el desecho de otros organismos; es un veneno mortal. Pero para los aerobios ocurre todo lo contrario: el oxígeno es un elixir, la esencia que propulsa el proceso sobre el que depende su propia vida, la respiración aerobia. Cómo funciona y cómo se formó? La respiración aerobia tiene tres partes.

En primer lugar, la glucólisis rompe la glucosa, produciendo piruvato y dos moléculas de ATP (más agua) por cada molécula de glucosa. En segundo lugar, se escinde el piruvato en un sistema cíclico (el ciclo del ácido cítrico), en el que se forman dos nuevos ATPs, electrones y dióxido de carbono. En tercer lugar, el oxígeno interviene en un proceso por el cual los electrones provenientes del ciclo del ácido cítrico se conducen por una cadena de transportadores de electrones impulsados por enzimas. En este proceso se producen treinta y dos ATPs más. En total, treinta y seis moléculas de ATP por cada molécula de glucosa.

Respirar oxígeno por esta vía aerobia representa un enorme avance con respecto a la vía más primitiva de fermentación de la glucosa (que consiste sólo en la glucólisis). Por el proceso primitivo se obtienen tan sólo dos moléculas de ATP por cada molécula de glucosa metabolizada, lo que equivale a un magro 2 por 100 de la energía almacenada en una molécula de glucosa. Mediante el proceso aerobio se obtienen treinta y seis, un descomunal 38 por 100 de la energía disponible (y una eficiencia superior a la de la mayoría de motores de automóviles, que es del 25 por 100).

Cuáles son las raíces evolutivas de este proceso vital y tan notablemente rentable? El origen de la primera parte, la glucólisis, ya se ha explicado. Heredada de heterótrofos anaerobios primitivos, precede en mucho a la aparición de formas de vida que respiran oxígeno. La segunda parte, el ciclo del ácido cítrico, también proviene de otras manos, una versión invertida del ciclo de reacciones oscuras de la fotosíntesis bacteriana. Y la tercera, la parte que consume oxígeno, es una versión renovada de los mecanismos químicos que enlazan los dos fotosistemas sensibles a la luz de los fotosintetizadores oxigénicos.

Con la renovación y reutilización de procesos inventados con anterioridad, la evolución nuevamente se muestra conservadora y económica. Las raíces evolutivas de la respiración aerobia pueden verse en los niños cuando juegan. Cuando corren rápido y con esfuerzo, a veces les dan agujetas y tienen que descansar un momento para recuperar el aliento. Por qué se ahvia entonces el dolor? Las agujetas se producen cuando los músculos utilizan el oxígeno tan rápido que no queda suficiente para realizar la respiración aerobia. A medida que la deficiencia de oxígeno aumenta, la glucólisis produce más piruvato del que puede metabolizarse y el exceso se convierte en el ácido láctico causante de las agujetas. Al recuperar el aliento, se restablece el equilibrio entre el suministro de oxígeno y la producción de piruvato. Con tiempo suficiente, el ácido láctico acumulado se convierte en glucosa (por la vía de la biosíntesis de glucosa), que vuelve a entrar en el ciclo de la respiración. El ejercicio vigoroso obliga a los humanos y al resto de los animales a volver a sus orígenes metabólicos primitivos, la glucólisis y la biosíntesis de glucosa, dos procesos inventados por microbios anaerobios en un pasado geológico distante

Los cuatro estadios del desarrollo del metabolismo moderno

El metabolismo que impulsa los ecosistemas actuales evolucionó en cuatro estadios, todos ellos, salvo el primero, versiones refundidas de los que habían existido anteriormente:

1. Heterotrofia anaerobia (fermentación) Entre las vías metabólicas más tempranas se cuenta la glucólisis, una vía química sencilla usada por los heterótrofos anaerobios para generar energía al romper la glucosa que obtenían del medio. A medida que se agotaba el suministro de glucosa, las células inventaron una versión inversa de la glucólisis, la vía de biosíntesis de glucosa. Esta vía permitía fabricar más glucosa, pero sólo servía de medida provisional, puesto que requería más energía de la que producía. El suministro de glucosa seguía siendo bajo. Y el nitrógeno, en formas que los organismos primitivos pudieran utilizar, también era escaso, un problema que sólo se solucionó con la invención de la fijación de N₂ mediante un complejo enzimático con ferredoxina. Sin embargo, el coste energético seguía siendo alto.

2. Fotoautotrofia anaerobia (fotosíntesis anoxigénica) La capacidad de captar la energía de la luz mediante pigmentos, resultado de la evolución en los heterótrofos anaerobios, mejoró los medios de absorción de compuestos orgánicos del medio. La modificación de esta maquinaria, basada en la bacterioclorofila, permitió asimismo usar CO₂ en lugar de compuestos orgánicos como fuente de carbono celular. Al vincularse este mecanismo con la vía de la biosíntesis de glucosa, desarrollada más tempranamente, nació la fotoautotrofia anoxigénica, una forma primitiva de fotosíntesis por la cual la energía de la luz captada por un solo fotosistema se utiliza en la síntesis de glucosa, el combustible celular universal. Este mecanismo era rentable y proporcionaba abundante glucosa. Así la vida rompía al fin su dependencia de compuestos orgánicos de origen no biológico. Sin embargo, pasaba a depender de un suministro de hidrógeno que sólo era abundante localmente.

3. Fotoautotrofia aerobia (fotosíntesis oxigénica) La evolución produjo a continuación una forma de fotoautotrofia más compleja que se basaba en dos fotosistemas de clorofila sensibles a la luz que estaban vinculados y usaban una fuente particularmente abundante de hidrógeno: agua (H₂O). Esta nueva forma cianobacteriana de fotosíntesis basada en la escisión del agua liberaba oxígeno, un gas tóxico para los anaerobios competidores. Incapaces de sobrevivir en este ambiente, algunos anaerobios se extinguieron mientras que otros se retiraron a un ambiente más tolerante. Las cianobacterias quedaban libres para colonizar vastos espacios en toda la superficie de la Tierra, soberanos indiscutibles de un nuevo reino.

4. Heterotrofia aerobia (respiración aerobia) La creciente abundancia de oxígeno molecular que la fotosíntesis cianobacteriana bombeaba al medio ofrecía una oportunidad de oro a la vida. Cuando se combina oxígeno con sustancias orgánicas se libera energía rápidamente (como ocurre en los incendios, por ejemplo). Este es el eficiente mecanismo de obtención de energía que explota la última invención metabólica, la respiración aerobia. Este proceso se realiza en tres pasos.

El primer paso, la glucólisis, se tomó prestado y sin modificar del proceso de fermentación de las bacterias anaerobias. El segundo paso, el ciclo del ácido cítrico para la generación de electrones, es una versión refundida de un proceso químico inventado por las bacterias fotosintéticas. El tercer paso, una vía metabólica que consume oxígeno, es una versión modificada del sistema de transporte de electrones de la fotosíntesis oxigénica.

Al vincular estos tres procesos, la vida consiguió una nueva y potente herramienta para la obtención de energía.

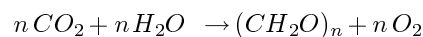
Los procesos metabólicos clave de la vida actual (la heterotrofia y la fotoautotrofia, anaerobias y aerobias) evolucionaron en microorganismos hace miles de millones de años. Tanto si energía y CHON circulan entre plantas y animales, como ocurre hoy, o tan sólo entre microorganismos, como ocurría en el pasado distante, se utilizan los mismos sistemas y se aplican las mismas reglas. Los ecosistemas actuales no son, en este sentido, nada modernos. Son sólo versiones a gran escala de aquel primer ecosistema que se estableció entre microorganismos primitivos.

Fotosíntesis basada en el Sulfuro



Tiene una barrera de energía pequeña.

Fotosíntesis basada en el agua



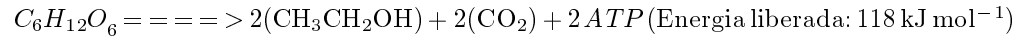
La utilizan la mayoría de las plantas actuales. Fue inventada por las cianobacterias.

Quimiosíntesis

Es la producción de moléculas orgánicas, usando energía química de fuentes termales a alta temperatura. Es probable que ésta sea la primera forma de energía utilizada por los seres vivos.

Los carbohidratos generados por fotosíntesis o quimiosíntesis son usados para formar enlaces de fosfatos ricos en energía, en base a fermentación y respiración.

Fermentación



Azúcar(glucosa) \implies Alcohol(etanol) + Dioxido de Carbono + energía

Respiración

