

Tema 22. El origen de la vida y su interpretación histórica. Evolución precelular. La teoría celular y la organización de los seres vivos.

1º ESO. Bloque III.
4º E.S.O. Bloque 2. Tema 6: La evolución (nuevo currículo)
1º Bach. Bloque 6 Nuevo currículo..
2º Bach. Biología. La célula y la base físico-química de la vida (provisional)

SUMARIO

22.1. Introducción. Interpretación histórica del origen de la vida.

22.2. Evolución química (Evolución abiótica).

22.2.1. La Tierra primitiva. Atmósfera y modificaciones.

22.2.2. Evolución precelular. Distintas teorías

1. HIPÓTESIS DE LA PANSPERMIA
2. HIPÓTESIS DE LOS COACERVADOS.
- 2-A) SÍNTESIS DE MONÓMEROS EN LA ATMÓSFERAS PRIMITIVA:
- 2-B) SÍNTESIS DE POLÍMEROS EN EL MAR PRIMITIVO
3. HIPÓTESIS DE LAS MICROSFERAS PROTEINOIDES.
4. HIPÓTESIS DE LA APARICIÓN DEL GEN
5. OTRAS TEORÍAS

22.3. Evolución celular

22.3.1. Las primeras células: Formación y Propiedades.

22.4. Evolución nutritiva

22.4.1. Heterotrofismo.

22.4.2. Autotrofismo: Fotosintetizadores y quimiosintetizadores

22.4.3. La revolución del oxígeno

22.5. La teoría celular y la organización de los seres vivos

22.5.1. Niveles de organización celular

22.1. Introducción. Interpretación histórica del origen de la vida.

El concepto de **generación espontánea** por el cual "ciertas entidades vivas pueden aparecer de repente, por azar, a partir de la materia y con independencia de toda clase de padres" refleja la experiencia de numerosos observadores, que se remontan a los tiempos de Babilonia, de la antigua China y de la Grecia clásica. En palabras de A. Oparin "siempre que el ser humano se ha encontrado con la aparición inesperada y exuberante de cosas vivas, lo ha considerado un ejemplo de la generación espontánea de la vida".

El primero en cuestionarla fue el médico italiano del siglo XVII **F. Redi** experimentando con carne de serpiente muerta de la que extrajo algunos gusanos blancos de su carne putrefacta y, aislándolos, obtuvo moscas demostrando que se trataba de larvas (aislando la carne con gasa tupida demostró que eran las moscas quién contaminaban la carne). A pesar de ello se siguió manteniendo el nacimiento de los "microbio" por generación espontánea (**Needham** en el siglo XVIII calentando sobre ascuas caldo de carne en matraces más o menos sellados en los que seguían existiendo "animáculos" dentro de los matraces). La réplica de **Spallanzani**, que realizó la misma experiencia con más cuidado, concluyó que Needham no había tomado las suficientes precauciones al sellar los frascos. **Pasteur** (1862) asestó un golpe casi definitivo a esta teoría con la experiencia que le supuso un premio de la Academia de Ciencias Francesa:

Demostó que los supuestos casos de generación espontánea se debían a la contaminación de los caldos por microorganismos transportados por las partículas de polvo del aire. Utilizó matraces con cuello de cisne. En su interior los caldos esterilizados por calentamiento permanecían estériles, las partículas de polvo con bacterias quedaban atrapadas en el cuello; si a los matraces, se les suprimía el cuello, los microbios proliferaban en el caldo al cabo de 48 horas. Aunque el golpe a la teoría fue prácticamente definitivo algunos investigadores (**Bastian**) persistieron en mantenerla al utilizar esporas muy resistentes a la destrucción por el calor.

A comienzos del siglo XIX se pensaba que la diferencia esencial entre los seres vivos y los inanimados radicaba en la diferencia de los compuestos químicos empleados en su construcción. Los compuestos orgánicos tenían "fuerza vital", mientras que las sustancias inorgánicas no las tenían. **Wohler** (1828) obtuvo urea (sustancia orgánica) a a partir de sustancias inorgánicas. El posterior descubrimiento de compuestos orgánicos en meteoritos y otras experiencias similares a las de Wohler reforzaron la hipótesis de que los seres vivos podían haber aparecido con posterioridad a la de sus componentes.

Después de los trabajos de Pasteur y Darwin, se hacía cada vez más difícil concebir la génesis de los seres vivos sin pensar en un desarrollo evolutivo de la materia. Durante el 1920-1930, distintas publicaciones formularon hipótesis y abrieron nuevos caminos a la investigación. Por primera vez se pensó en extender el concepto de evolución a la materia inanimada. Se buscaba una síntesis que situara el problema del origen de la vida, en su totalidad, en un contexto evolutivo. El autor de la síntesis fue el bioquímico soviético **A. I. Oparin** (1924), poco antes del biólogo inglés **J. B. S. Haldane** (1929). Sus puntos de partida diferían muy poco. Ver apartado 22.2.2.

Actualmente se supone que la vida se ha originado a través de una serie de acontecimientos que elevaron la organización de la materia inerte a niveles sucesivamente superiores. Los átomos se combinaron formando compuestos simples; estos se combinaron formando compuestos más elaborados,

y estos últimos produjeron finalmente complejos que a su vez se agregaron en unidades "vivientes", es decir, en células.

La evolución puede considerarse como un proceso de transformación de la materia desde el origen del Universo. En este proceso se engloba tanto la evolución de la materia inorgánica como la de la materia orgánica. Respecto a este último aspecto, se deben tener en cuenta dos grandes procesos: la etapa del origen de la vida y la evolución biológica. La primera comprende el conjunto de procesos químicos y bioquímicos que posibilitaron la transformación de materia inorgánica en orgánica y de ésta en los primeros seres vivos. La segunda comprende el conjunto de procesos relativos a la herencia de los caracteres biológicos desde los organismos vivos más sencillos a los más complejos.

De momento los detalles de estos procesos se conocen sólo parcialmente. Parte del conocimiento actual es el resultado de una proyección retrospectiva de los tipos y actividades existentes actualmente. Por ejemplo, de los virus, bacterias y otras formas primitivas existentes, se deduce cómo deben de haber sido las primeras formas vivientes. La Astronomía, la Física y la Geología nos ayudan a entender el probable carácter físico de la tierra primitiva. Experimentos de laboratorio nos han permitido comprobar la verosimilitud de algunas de las teorías que especulan sobre el comienzo de la vida.

Todo esto nos permite dar una explicación bastante plausible del origen de la vida que abordamos en este tema.

22.2. Evolución química (Evolución abiótica).

Las rocas más antiguas que se conocen son unas rocas ígneas, que se han datado en 3.800 millones de años. De acuerdo con esto, si ya entonces existía una Litosfera rígida, es probable que la Tierra estuviera formada hace unos 4.600 millones de años, según el contenido de diversos isótopos de Pb, coincidente con la calculada por los meteoritos.

La Tierra se inició como una masa de átomos libres, de hidrógenos y otros tipos, que se ordenaron según su peso. Los más pesados, como el Fe y el Ni, en el centro de la Tierra. Los átomos más ligeros como el Al y el Si formaron una capa intermedia. Los más ligeros (H, N, O, y el C se agruparon constituyendo las capas más externas.

Nuestro planeta reunía las condiciones idóneas para que se formase lo que podríamos llamar sustrato de la vida. Estas condiciones significan unos caracteres planetarios especiales y la presencia de sustancias químicas necesarias:

- a) Se trata de un **planeta no demasiado grande** (en caso contrario tendría intensas reacciones moleculares y consecuentemente mucho calor); está girando en una órbita situada a una distancia adecuada, con una radiación solar relativamente estable. Según Oparin y Fesenkov, sólo reunirían esta condición uno de cada 100.000 planetas.
- b) Se habían formado ya los distintos **elementos químicos necesarios para las moléculas orgánicas**. El H, C, N y O, elementos de los más abundantes en la Tierra, constituyen hasta el 90 % de los organismos. En segundo término el S, P, Na, K, Mg, Ca, Cl, Fe, etc. hasta llegar a los 20 que son la casi totalidad de los que constituyen los seres vivos.
Al comienzo las t° fueron, probablemente, demasiado altas para la formación de moléculas. El calor excesivo rompe los enlaces entre átomos tan pronto como estos se constituyen. A medida que la tierra fue enfriándose se empezaron a establecer enlaces atómicos relativamente estables. Aparecieron con profusión las moléculas a medida que desaparecían los átomos libres.
- c) **Presencia de agua**, sustancia que pudo aparecer en estado líquido bastante pronto en la Tierra. Buen disolvente y estabilizador de la t° , supone un medio ideal para que en su seno tengan lugar reacciones químicas.
- d) Una **atmósfera primitiva** con metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua, quizás CO_2 , pero sin oxígeno, por lo tanto una atmósfera reductora. Sin oxígeno, ni por tanto ozono, las radiaciones UV, incluso las de longitud de onda más corta, alcanzarían la superficie. Las t° debieron ser tales que el agua, el metano y el amoníaco persistieron en forma gaseosa, y desde entonces la Tierra dispuso de una atmósfera exterior. La existencia de esta atmósfera reductora, no obstante, ha sido cuestionada recientemente.

La primera atmósfera de la Tierra desapareció arrastrada por los vientos solares que actuaban al comienzo de la formación del Sol. Cuando se estabilizaron las reacciones de fusión del hidrógeno, cesaron las convulsiones del Sol y el viento solar perdió su ímpetu. Ello permitió que poco a poco la superficie de la Tierra se fuera enfriando y quedaran atrapadas en su interior gases que sólo pudieron escapar a través de fisuras de la corteza. La gran actividad volcánica de aquella época arrojó al exterior gran cantidad de vapor de agua que, al condensarse, formó el agua de los mares y océanos.

Otros gases también liberados por las emanaciones volcánicas fueron retenidos por las fuerzas gravitatorias del planeta y formaron una segunda atmósfera: el CO₂ reaccionó, en parte, con los silicatos en presencia de agua y dio origen a las rocas calizas; el nitrógeno permaneció en la atmósfera; mientras que el oxígeno, más activo, se combinó con el hidrógeno para dar agua y también con los minerales de la corteza, formando óxidos como la limonita o la sílice. La desaparición del oxígeno de la atmósfera, permitió que la segunda atmósfera rica en vapor de agua, amoníaco, metano, hidrógeno, nitrógeno y otros gases más raros, tuviera **carácter reductor**.

22.2.1. La Tierra primitiva. Atmósfera y modificaciones.

En la etapa de los primeros 500-600 millones de años en la existencia de la Tierra (etapa pregeológica) se irían diferenciando sus diversas capas; la contracción gravitatoria, los impactos de los planetesimos (tema 1) y meteoritos y la desintegración de elementos radiactivos ocasionaron tal aumento de t^a que los diversos compuestos químicos tuvieron movilidad suficiente para diferenciarse por densidades. El grado de fusión alcanzado es discutido, según unos la fusión alcanzaría los 400 Km. más superficiales, según otros alcanzaría zonas mucho más profundas.

Las temperaturas superficiales haría que compuestos como el agua, CH₄ y NH₃ estuvieran en forma gaseosa, junto con el H₂ y el CO₂, desde entonces la Tierra dispuso de una atmósfera exterior.

El consenso geológico actual apoya la idea de que la atmósfera vino del interior de la Tierra no de la Nebulosa inicial. Las opiniones sobre su composición varían; no obstante las más actuales se decantan por la presencia de N₂, CO₂, vapor de agua y un poco de H₂; nada de CH₄, NH₃ ni O₂. Esta **atmósfera es fundamentalmente neutra**, con un ligero poder reductor. Una atmósfera de NH₃ y CH₄ habría sido destruida en pocos miles de años por las reacciones químicas desencadenadas por la acción de la luz solar. El progresivo enfriamiento de la Tierra hizo que alguno de estos gases se licuaran y algunos líquidos se solidificaran. Las sustancias pesadas próximas al centro de la Tierra fueron, posiblemente, las primeras en licuarse y solidificarse, aunque no del todo, ya que la Tierra conserva parte del núcleo fluido y deformable. Las nubes de vapor de agua se condensaron en lluvia que contribuyó al enfriamiento de la corteza y empezó a ser retenida por esta en forma líquida (se especula con la existencia de enormes aguaceros que duraron siglos), así se formaron los **primitivos océanos**. En los mares primitivos se acumuló gran cantidad de sustancias disueltas, entre otras, sales minerales procedentes de la erosión de la corteza. Además, es probable que con frecuencia hicieran erupción, a través de la corteza, grandes masas de lava fundida y de gases que incorporaron sus materiales al contenido mineral de las aguas terrestres y de la atmósfera. Así los océanos adquirieron relativamente pronto su salinidad y la incrementaron algo todavía en las edades subsiguientes.

Podemos considerar estos dos acontecimientos (atmósfera y océanos) como los acontecimientos claves que harían posible, más tarde, el origen de la vida.

22.2.2. Evolución precelular. Distintas teorías

La evolución protobiológica es el proceso de transformación progresiva de los polímeros hasta la formación de las primeras células. Se han propuesto diferentes teorías para explicar este proceso. Entre ellas se encuentran las siguientes:

1. HIPÓTESIS DE LA PANSPERMIA

Arrhenius, a finales del siglo XIX, sostuvo que los primeros seres vivos de la Tierra provenían de un conjunto de esporas o panspermia, procedentes de otros planetas, que se trasladaron por el espacio. **F. Crick**, que junto con Watson descubrió la estructura molecular del ADN, y F. Hoyle también apuestan por un origen extraterrestre de la vida sobre la Tierra, pero no el origen de la vida misma.

En el lapso de quince años han podido identificarse casi sesenta moléculas orgánicas (alcohol, formaldeído,...) en el espacio. En 1976, la sonda espacial Giotto, detectó en el núcleo del cometa Halley, un polímero del formaldeído llamado polioximetileno (POM). La prueba del origen extraterrestre de estas moléculas orgánicas surgió en 1987, en el estudio de los aminoácidos hallados en el meteorito de Murchison, que había caído en Australia hacía 18 años. Estos aminoácidos contenían isótopos de H y N, raros en la Tierra pero abundantes en las nubes de polvo interestelar.

En 1996 un equipo de científicos de la NASA y de la Universidad de Stanford (California) han localizado componentes orgánicos en un meteorito procedente de Marte, lo que levantado grandes expectativas sobre la posibilidad de vida en este planeta, esto reforzaría la teoría de la panspermia.

2. HIPÓTESIS DE LOS COACERVADOS.

Oparin, en la segunda década de este siglo, propuso la hipótesis de la aparición de los primeros seres vivos a partir de los **coacervados**. Se trata de unas gotas microscópicas formadas por una envoltura de moléculas de polímeros y por un medio interno, en el que podría haber algún enzima, que quedaría aislada del exterior. Estas gotitas se habrían formado en el mar primitivo, al ponerse en contacto espontáneamente los polímeros en solución acuosa.

Según Oparin, los coacervados tendrían un metabolismo muy sencillo, efectuado por algún tipo de molécula catalítica incorporada del medio externo. Los coacervados crecerían al captar moléculas del exterior y se dividirían al alcanzar un tamaño crítico.

Lo característico de la investigación de Oparin fue la **construcción de sistemas artificiales** mediante la incorporación de enzimas en el interior de las gotitas. Comprobó que si se añadía un enzima específico (extraído de una célula viva, por ejemplo, la fosforilasa), inmediatamente quedaba acumulada en el interior del coacervado. Si luego se añadía glucosa-1-Fosfato, las moléculas de azúcar difundían hacia el interior de las gotitas y se polimerizaban por acción del enzima para dar almidón, que permanecía en el interior. El consiguiente aumento de tamaño continuaba hasta alcanzar un tamaño crítico, en el que el coacervado se dividía en dos, cada una de las cuales continuaba creciendo siempre que dispusiera de enzima fosforilasa en su interior.

En su forma madura, la teoría se puede resumir como sigue:

- 1) La Tierra, por la época en la que comenzó la vida, tenía una **atmósfera reductora**.
- 2) Esta atmósfera se vio expuesta a diversas formas de **energía** (relámpagos, radiación solar, calor volcánico) que condujeron a la **formación de compuestos orgánicos**.
- 3) Estos compuestos, en palabras de Haldane "debieron acumularse hasta que los océanos alcanzaron la consistencia de una sopa caliente diluida" (**sopa prebiótica** o primigenia).
- 4) La vida se desarrolló en esta sopa merced a transformaciones ulteriores, permaneciendo durante mucho tiempo en los océanos primitivos.

La existencia de la "sopa prebiótica" está siendo cuestionada por que se precisaría una enorme cantidad de energía para mantener todo un océano en este estado y además tenderían, sus componentes, a polimerizarse como se demostró con el "alquitrán" del experimento de Miller.

Esta hipótesis no explica como podrían evolucionar los coacervados, al carecer de información genética. Algunos científicos consideran a esta teoría como un paradigma acabado, ya que no parece ser un modelo adecuado para el estado de los conocimientos actuales.

2-A) SÍNTESIS DE MONÓMEROS EN LA ATMÓSFERAS PRIMITIVA:

A principios de los años cincuenta, **S. Miller** y **H. Urey** diseñaron un aparato que, en el laboratorio, simulaba las características de la atmósfera primitiva. Introdujeron en el aparato una mezcla de **CH₄, NH₃, H₂ y vapor de agua**¹. Estos gases fueron sometidos a una serie de descargas eléctricas, que intentaban reproducir los aportes de energía que recibía la atmósfera reductora primitiva. Al cabo de varios días comprobaron que se formaban moléculas orgánicas sencillas, como seis aminoácidos, aldehídos, unos pocos ácidos carboxílicos sencillos (fórmico, acético), etc. Este experimento no supuso un hecho aislado.

¹ Podría contener una pequeña cantidad del oxígeno consecuencia de la disociación de la molécula de agua por la radiación ultravioleta (efecto Urey)

En realidad, su inspiración y su impacto estaban vinculados a las circunstancias históricas que le precedieron. El experimento fue muy bien recibido como prueba de la teoría propuesta por el ruso Oparin y el inglés Haldane independientemente, en los años veinte.

El equipo empleado por Miller tenía tres elementos esenciales: matraz con agua hirviendo, el vapor de agua desprendido entraba en un compartimento. Este compartimento, en el que estaban el resto de componentes de la atmósfera primitiva, contenía dos electrodos entre los que se hacía saltar una chispa eléctrica lo suficientemente intensa. Una vez los vapores habían atravesado la descarga, penetraban en una zona más fría, donde se condensaban y formaban gotitas de agua. Estas gotitas refluían al matraz. El experimento duró una semana y según progresaba el agua del matraz tomó primero un color rojo y luego pardo-amarillento. Recojidos y analizados los componentes del matraz al cabo de una semana se comprobó la desaparición del CH_4 y los átomos de carbono aparecían ahora en distintas sustancias orgánicas. El producto dominante era un material insoluble, constituido por una red de átomos de carbono y otros elementos conectados de forma laxa e irregular. Esta sustancia cubría las paredes del aparato, sustancias como estas (alquitranes, resinas, polímeros), aparecen con frecuencia en las reacciones orgánicas. Un 15 % del material no se convirtió en alquitranes y pudo analizarse. Proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos o grasas no se han identificado nunca en los experimentos de Miller-Urey. Al no añadirse fosfato en el experimento no pudieron formarse nucleótidos pero sí nucleósidos, pero no ocurrió así. Los aminoácidos aparecían tanto en su forma D como L (sólo la L forma parte de los seres vivos).

Resumiendo las sustancias que se producen en mayor cantidad es el alquitrán. Entre las moléculas sencillas producidas, quizá unas trece admitirían el calificativo de significativas. Sólo dos de los cincuenta compuestos estructurales (**alanina y glicina**) figuran como productos del experimento. Estos productos no guardan mucho similitud con los de los seres vivos en cambio sí guardan un paralelismo asombroso con la composición de cierta clase de meteoritos (condritos carbonosos). Por eso se aventura que los experimentos de Miller pueden haber remediado alguno de los procesos que acontecieron en los gases reductores de la nebulosa solar originaria y que dieron lugar a los compuestos preservados en los meteoritos.

Ante las nuevas teorías sobre la atmósfera primitiva, S. Miller intentó preparar aminoácidos en las nuevas condiciones. Se demostró que la proporción entre el H_2 y el CO_2 de la mezcla parece ser importante. Cuando se encuentra por debajo de 1, como se suponía en la hipótesis de Oparin, se producen solo trazas de Glicina y ningún aminoácido más. Dada la tendencia del H a escapar de la Tierra es difícil aceptar que esta proporción se mantuviera próxima a uno. Para que pudieran aparecer más aminoácidos era necesaria la presencia de CH_4 o equivalentes reductores en alguna otra forma.

Los investigadores que a partir de 1953 siguieron el camino abierto por Miller, trataron de ir más lejos, modificando las condiciones operatorias y empleando nuevos métodos. Gracias a los datos proporcionados por la Astrofísica y la Geología, pudieron determinarse con gran precisión las características químicas del medio, así como las fuentes naturales de energía de la Tierra primitiva.

El medio debía ser acuoso o alternativamente seco y húmedo; con una t° media de 150°C ; reductor (que favorece la síntesis química) y rico en NH_3 . Las fuentes de energía, aparte del Sol, podían ser tormentas, volcanes, energía geotérmica y las desintegraciones radiactivas.

Calvin (1961) sometió una mezcla de gases primitivos a un flujo de electrones impulsados a gran velocidad por el ciclotrón, sintetizó aminoácidos, urea, ácidos grasos y otros compuestos orgánicos.

En la década de los 60 **J. Oró**, empieza a investigar las reacciones del ácido cianhídrico (CNH) con el NH_3 . La mezcla de ambos, con agua a 90°C , permite la formación de adenina. Otros investigadores, posteriormente, también la sintetizaron.

Las sucesivas experiencias demostraron que los primeros compuestos orgánicos que aparecían en la mezcla primitiva eran el **ácido cianhídrico** (CNH) y el **formaldehído**, y este último aparecía cualquiera que fuera la naturaleza de la fuente de energía.

Cyril Ponnamperna (1963), al irradiar con rayos UV una solución de CNH, detectó la guanina. También en 1963 (**Sagan** y Ponnamperna) consiguieron la síntesis de la adenosina, al irradiar con UV una mezcla de adenina, ribosa y H_3PO_4 ; posteriormente consiguieron la formación de ATP recreando las presuntas condiciones originales.

Poco a poco se fueron sintetizando cada una de las cinco bases nitrogenadas del ADN y ARN. Junto con J. Oró también sintetizaron la ribosa y la desoxirribosa, a partir de una solución de formol; así como comprobaron que la acumulación de formaldehído conduce a la formación de glucosa. No obstante los reparos expuestos, de acuerdo con los resultados de estas experiencias, se pensó que en condiciones semejantes de la atmósfera primitiva se sintetizaron los primeros monómeros, que se irían depositando sobre la superficie terrestre, y serían arrastrados hacia el mar, formándose la sopa o caldo primitivo.

2-B) SÍNTESIS DE POLÍMEROS EN EL MAR PRIMITIVO

Se piensa que en el seno de la sopa primitiva se produjo una **gran concentración de moléculas de monómeros**, sobre todo en las orillas del mar o de los lagos, por evaporación del agua. También se tiene en cuenta la posibilidad de que ciertas moléculas podrían haberse concentrado al unirse a **arcillas**, pues estas tienen una gran superficie de absorción. Estas arcillas podrían haber servido de centros catalíticos de las reacciones de síntesis de polímeros. Al aproximarse entre sí, las moléculas simples se unieron mediante enlaces químicos, formando biomoléculas más complejas, como las proteínas. Experiencias realizadas en 1958 y 1969 con fosfatos y polifosfatos inorgánicos (producidos por simulación del ambiente primitivo) permitieron demostrar que la producción de polímeros de interés biológico por reacciones de condensación se podía realizar en solución acuosa y a t^a compatibles con las de la vida actual.

En 1978 y 1980 se realizaron experimentos determinantes en los que se demostró cómo se podían sintetizar polímeros a partir de monómeros. El israelí **Lahan** y sus colaboradores produjeron péptidos de 20 a 30 unidades a partir de glicina puesta en condiciones alternativamente secas y húmedas y en presencia de arcilla (montmorillonita). Los americanos **Orgel** y **Lohrman** obtuvieron cadenas de oligonucleótidos de 30 a 40 unidades, en condiciones parecidas. Estas experiencias demuestran que se puede simular la evaporación, el secamiento y la rehidratación de lagos y mares de la Tierra primitiva (medio seco y cálido durante el día, húmedo y frío durante la noche). En estas condiciones, la sucesión de ciclos regulares y la presencia de arcilla (para mantener las moléculas en su lugar) permiten la formación de largas cadenas moleculares, las que prefiguran las proteínas y los ácidos nucleicos de las células.

A pesar de su estabilidad dinámica y su capacidad de volverse más complejas, esas moléculas orgánicas requieren tiempo para reaccionar unas con otras a fin de constituir una base lo suficientemente importante para dar lugar a la evolución prebiológica. Posiblemente, ciertas características adicionales del medio favorecieron la supervivencia de las moléculas. Por ejemplo:

- Los compuestos pesados que se forman en la alta atmósfera caen sobre las capas inferiores, más densas; se hunden en el agua o se acumulan en las grietas y fisuras del suelo, lo que impide su destrucción por la radiación UV.
- Si existen determinadas moléculas con función catalizadora (arcillas), su concentración puede aumentar con rapidez.
- La ausencia de oxígeno atmosférico impide la oxidación de los productos orgánicos, lo que hace que se conservan durante más tiempo.
- La ausencia de vida impide la destrucción de la materia orgánica.

Por consiguiente nada impedía que las moléculas orgánicas se acumularan sobre la Tierra, en las lagunas o mares primitivos, y reaccionaran entre sí durante millones de años.

3. HIPÓTESIS DE LAS MICROSFERAS PROTEINOIDES.

Hacia los años setenta, **Fox** propuso las microsferas proteinoides (proteínas no biológicas) como precursoras de los seres vivos, como resultado de los experimentos que realizó y cuyos pasos detallamos:

- 1º Dsecación de una solución acuosa de aminoácidos a t^a comprendidas entre 130-180 °C durante varias horas, hasta conseguir un líquido ambarino que posee proteinoides.
- 2º Esta líquido se lava con una solución acuosa de ClNa al 1 %; los proteinoides se agregan en microsferas de 1 a 2 μ de \varnothing que presentan una membrana. Fox tomó 15 mgr. de proteinoides y los sumergió en 3 ml. de agua tibia, ligeramente salada. Al enfriarse la disolución, descubrió que se habían formado gran cantidad de diminutas esferas individuales (microsferas de $\varnothing = 2 \mu$), por su tamaño y aspecto son muy parecidas a las bacterias llamadas cocos.
- 3º Dichas membranas ejercen una absorción selectiva de sustancias, permitiendo el paso de algunas al interior de las microsferas y no de otras; en condiciones favorables, dichas microsferas absorben

proteínoides disueltos, crecen y se dividen en otras microsferas indefinidamente. Algunos de estos proteínas funcionan como catalizadores y provocan reacciones químicas.

Según esta hipótesis, en las regiones volcánicas próximas al mar, las mezclas de aminoácidos se desecaron y calentaron, formándose polímeros. Experimentalmente se ha demostrado que sucede así, como hemos visto en el apartado anterior. Estos polímeros, a los que Fox denominó proteínas termales, forman pequeñas gotitas, las **microsferas**.

Éstas tendrían **cierta capacidad catalítica**, debida a moléculas enzimáticas de su interior. Captarían energía a partir de la ruptura de enlaces de moléculas del exterior y se dividirían mediante procesos de escisión o gemación.

La particularidad de las microsferas es que presentan actividad enzimática [debido a aminoácidos con grupos tiol (SH) y alcohol (OH)], poco específica, es decir, son capaces de catalizar una serie de reacciones químicas (descomposición de la glucosa, reacciones de oxidación, hidrólisis de enlaces,...). Es posible, por tanto, que los enzimas específicos actuales evolucionaran a partir de microsferas proteínas de este tipo.

Otra diferencia esencial entre los coacervados de Oparin y las microsferas de Fox es que aquéllos se obtienen a partir de proteínas biológicas, éstos a partir de proteínas no biológicas.

La experiencia de Fox permitió descubrir dos hechos: la capacidad de autoorganización de los proteínas y la rapidez con que se pasa de aminoácidos a proteínas (algunas horas) y de éstos a microsferas (algunos minutos). Estos glóbulos son estructuras pseudobiológicas ya que carecen del dinamismo que caracteriza a las células. No obstante tienen algunas propiedades que les asemejan a las células vivas:

- Son individuos diferenciados del medio circundante. Es la primera vez que aparecen unidades individuales.
- Se forma un medio interno.
- Se produce un intercambio selectivo de sustancias a través de la membrana rudimentaria.
- Cada microgota posee una estructura química interna que le es propia. Por lo que puede tener un destino diferente, una de otra, es decir que cada sistema, perdurará, evolucionará o desaparecerá.

Esta hipótesis tampoco explica la transmisión de la información genética y, por tanto, la evolución hacia los seres vivos.

4. HIPÓTESIS DE LA APARICIÓN DEL GEN

Una característica satisfactoria del esquema evolutivo es que retrotrae un principio único y aceptado por la mayoría, la selección darwiniana, a la época de la primera molécula capaz de autorreplicarse (REPLICADOR). La selección queda interrumpida durante un período de cooperación molecular en las primeras etapas, pero, por lo demás, domina completamente el desarrollo de la vida.

Seguramente los protobiontes o precursores de los primeros seres vivos fueron las microsferas de Fox. Posteriormente se debió dar el último paso: la aparición de una molécula capaz de autorreplicarse y que tuviera la información de cómo controlar catalíticamente todos los procesos que se daban en los protobiontes. Así se aseguraba que las células hijas tendrían toda la información necesaria.

En 1986 los americanos **Cech y Zaug**, demostraron que la molécula de ARN puede constituir el soporte de la información genética y al mismo tiempo intervenir como enzima en su propia transformación. Es decir, una misma molécula puede ser una "memoria biológica" y un catalizador. A partir del artículo de Cech (revista Science), se descubrieron muchas otras funciones catalíticas del ARN (**ribozima**).

Vamos a señalar esquemáticamente cuál sería la evolución progresiva de los sistemas de codificación y los mecanismos de traducción de información biológica.

1. El caldo primitivo o en las arcillas se formaría un **ARN primitivo** (síntesis abiótica). Estas cadenas catalizarían la formación de otras más largas, en el curso de ciclos sucesivos de secamiento y rehidratación de las zonas donde se encuentre.
2. La recombinación entre cadenas, por medio de elementos de transposición (**transposones**) y las mutaciones permitirían la aparición de nuevas funciones.

3. Se establece una relación específica entre una serie de bases nitrogenadas y de aminoácidos (la forma de éstos y los "huecos" y/o "protuberancias" del ARN).
4. Elementos exteriores como cationes, transportadores de electrones, etc., perfecciona la actividad enzimática del ARN. Pueden catalizar así la formación de proteínas, primero directamente, después por medio de cadenas cortas de ARN con las que están ligados los aminoácidos (precursores del ARNt) y que los "alinean" en un orden que facilita las reacciones de polimerización.
5. Las proteínas, "demuestran" ser mejores catalizadores que el ARN. Aumentan la variedad de las reacciones en las que intervienen. Así se autoseleccionan los enzimas, que relegan al ARN a un segundo plano.
6. Con ayuda de los enzimas, las cadenas del ARN, forman la doble hélice del ADN, con ventajas decisivas en la codificación de la información biológica (mayor estabilidad y mecanismo de corrección de errores pero sin impedir las mutaciones y la recombinación). Se piensa que, una vez adquirida la información genética, los protobiontes evolucionaron hasta alcanzar la estructura celular.

Así se puede sostener, con **N. H. Horowitz**, que "los primeros organismos capaces de reproducirse hallaron en su ambiente las piezas necesarias para su construcción". Cuando desaparecía una de ellas, sólo podían reproducirse aquellos organismos que, por medio de síntesis internas cada vez más complejas, fabricaban las piezas necesarias para su reproducción. En contra de esta hipótesis podemos señalar que la probabilidad en contra de la generación aleatoria de un replicador de ácido nucleico a partir de los ingredientes de la sopa primitiva (suponiéndole, como mínimo, 600 átomos) es de 1 a 10^{992} .

5. OTRAS TEORÍAS

El biólogo americano **Carl Woese** ha propuesto una original teoría. Propone que la vida comenzó antes de que el planeta estuviera completamente formado. El manto, núcleo y corteza todavía no estaban diferenciados del todo. El Fe metálico participaba en las reacciones químicas que produjeron una atmósfera de CO_2 e H_2 . Estos produjeron el "efecto invernadero" (similar condición a la de la atmósfera actual de Venus); superficie caliente, en zonas aún fundida y lluvia de meteoritos. Fuertes tormentas de aire arrastrarían partículas a elevadas zonas atmosféricas. Al condensarse el vapor de agua sobre las citadas partículas produciría extensas nubes, que hicieron de plataforma de la vida. Cada gotita actuaría como una célula primitiva, como pequeño laboratorio para experimentos de evolución química. Atmósfera y polvo eran la materia prima y la energía la proporcionaba el Sol. Los primeros organismos en evolucionar fueron los metalógenos, lo que redujo el CO_2 de la atmósfera al combinarlo con el H_2 . Conforme fue disminuyendo la cantidad CO_2 , amainó el efecto invernadero y la Tierra se enfrió. Pudieron formarse entonces océanos y nuestro planeta se aproximó a su estado presente.

Dada la **necesidad de un ambiente reductor** para la aparición de la vida se han propuesto otras soluciones menos revolucionarias señalando la posibilidad de que en algún remoto lugar, estadísticamente poco representativo, pudo darse este ambiente. El emplazamiento más de moda en los últimos años son las **fuentes termales del fondo del mar**. Estas se presentan en lugares donde la corteza es delgada y la roca fundida se aproxima a la superficie (con el submarino Alvin se han explorado alguna de ellas situadas en las Galápagos). Estas fuentes emiten compuestos químicos reductores entre otros SH_2 , CH_4 , NH_3 , además de agua caliente. Las bacterias que viven allí obtienen la energía química del sulfhídrico (SH_2), el resto de animales más evolucionados dependen de las bacterias. Se trata de un ecosistema independiente de la radiación solar.

Las elevadas presiones del fondo marino hacen que el agua, para hervir, precise t° muy elevadas y no es fácil que los seres vivos las soporten, por lo que esta teoría ha sido acogida con bastante escepticismo y está por confirmar experimentalmente. El número limitado de fuentes y su vida relativamente breve son factores en contra; por lo que, posiblemente, ni son las únicas fuentes de vida ni las más favorables.

Lo que nos interesa son los acontecimientos posteriores en el seno de la mezcla química inicial

22.3. Evolución celular

Si la **evolución biológica siguió a la química**, no significa que la evolución química se detuviese simplemente en un punto y que a partir de ella siguiese la evolución biológica. Por el contrario, la evolución química continuó, y todavía continúa en la actualidad. Las moléculas no dieron ya lugar, exclusivamente, a nuevas moléculas, sino que algunas de las moléculas produjeron algo completamente nuevo, inexistente, es decir, células vivas. Estas, a su vez, produjeron entonces mayor número de células mediante los procesos de multiplicación que todavía continúan. De este modo la nueva dimensión de la evolución biológica se superpuso a la antigua dimensión de la evolución química que todavía prosigue.

Los científicos no coinciden en el orden de los últimos pasos que dieron lugar a la vida, que en todo caso serían tres:

- a) **Aislamiento:** Los organismos tendrían que estar aislados del medio por una superficie que impidiera su dilución. Oparin y Fox lo comprobaron cuando en una disolución rica en polímeros hay tendencia a que se separen unas gotitas con composición y actividad química propias (coacervados). Se supone entonces que en el caldo primordial se habrán formado estos coacervados-probiontes.
- b) **Metabolismo inicial:** Desde la formación de las primeras moléculas orgánicas habría una diferencia de estabilidad entre ellas. Unas permanecerían, dando lugar a otras más complejas (síntesis) y las más inestables se descompondrían sirviendo de "alimento" para las otras (degradación). Se habría iniciado así un proceso de síntesis y degradación diferencial, es decir, un metabolismo inicial que contribuiría a la estabilización de algunos coacervados, mientras que otros sucumbirían.
- c) **Capacidad de reproducción:** Los coacervados conseguirían en un momento dado la capacidad de romperse en otros (hijos) conservando sus características. El coacervado habría pasado a ser un organismo elemental viviente.

Muchas hipótesis están ahora en proceso de verificación. Sin embargo, se pueden distinguir dos grandes tendencias. Algunos sostienen que los ácidos nucleicos formados en condiciones prebióticas determinaron, por mutación y selección, todo el curso de la evolución. Para otros, es la función de la autoconservación la que predomina. El sistema de codificación e información, muy simple al comienzo, se fue perfeccionando a medida que los organismos se volvían más complejos, hasta llegar al ARN y finalmente al ADN actual.

22.3.1. Las primeras células: Formación y Propiedades.

La aparición de las primeras células la podemos enfocar del modo siguiente: grupos de los compuestos básicos presentes en el océano primitivo, de una u otra forma, debieron reunirse juntos y en pequeños espacios, y cada grupo de materiales debió permanecer agregado formando una gota.

Probablemente, la agregación de los compuestos debió darse en alta mar de una forma distinta. La concentración de compuestos debió ser muy baja y, por tanto, debió constituir una disolución demasiado diluida para ofrecer la posibilidad razonable de que se juntasen y permaneciesen unidos los conjuntos adecuados de sustancias orgánicas primitivas. Es más plausible aceptar que esta agregación tuviera lugar a lo largo de las costas marinas, a donde habrían sido arrastradas desde el interior del océano. El terreno sólido del litoral proporcionó superficies para que algunas de las moléculas pudieran adherirse. El aumento de concentración se vería acentuado por la evaporación del agua en la zona intermareal.

En realidad tampoco es necesario aceptar que ácidos nucleicos, proteínas y polímeros en general, se hayan formado primero en alta mar y luego se agregaran en la costa. Su síntesis pudo ser consecuencia de la acumulación de sustancias más sencillas (nucleótidos, aminoácidos, etc.) ya que la síntesis de macromoléculas requiere la estrecha proximidad de todas las materias primas necesarias. Los propios ácidos nucleicos formados pudieron haber dirigido la síntesis de las primeras proteínas, dentro de las agregaciones presentes. alguna de las proteínas adquiriría función enzimática facilitando la rápida síntesis de una rica variedad de nuevos compuestos (polisacáridos, etc.).

A la vez algunas de estas sustancias tendrían **función estructural** a través y en torno a la **gota** de los agregados (muchas proteínas se condensan en el seno de algunas disoluciones y, estas o complejos lipoprotéicos, pueden formar películas membranosas superficiales como la nata). Así, las gotas de agregación de los litorales oceánicos podrían haber desarrollado membranas limitantes externas y en

alguna medida su almacén interno. En lo sucesivo pudieron convertirse en unidades individuales destacadas en el medio acuático del océano y pudieron permanecer individualizadas.

La primera selección fue sin duda entre las gotas más estables, capaces de perdurar mucho tiempo, y aquellas más frágiles desaparecieron con rapidez. Las microesferas de Fox son muy estables. Cabe pensar, como sostiene Oparin, que con la influencia de causas externas (viento, olas, rozamientos, etc.), aumentaba la cantidad de microgotas estables.

Probablemente el **caldo primitivo** era muy rico en moléculas orgánicas, parecidas a las que formaban parte de las microgotas. Moléculas como el agua, la glucosa y los aminoácidos atravesaban con facilidad la membrana; otras no podían hacerlo pese a su alta concentración en el medio externo. Así se debieron iniciar las reacciones de intercambio químico, difusión y ósmosis, que prefiguran la nutrición de seres más evolucionados. Se puede afirmar que las microgotas fueron los **primeros heterótrofos**.

Debido a la mayor concentración de reactivos, ciertas reacciones que eran muy lentas o casi imposibles en el medio circundante se producen con facilidad en el interior de la gota. Allí se forman nuevos productos, que ésta acumula o rechaza hacia el exterior. Algunas reacciones liberan energía; así se unen los primeros eslabones de un **metabolismo rudimentario**. Se establece una relación entre la **organización interna** de una microgota determinada y el tipo de reacción que tiene lugar en su interior. Mientras que pudo haber reacciones capaces de destruir las microgotas, otras favorecerían su estabilidad y, con ella, sus posibilidades de supervivencia, adquiriendo una existencia más o menos prolongada.

Gracias al intercambio permanente de materia y energía con su ambiente, las microgotas primitivas se afirman como **sistemas abiertos**, lo que es característico de los seres vivos. Entre estos sistemas abiertos se establece un **flujo continuo** con la entrada de sustancias ricas en energía provenientes del exterior y la expulsión hacia el mismo medio de compuestos formados en el interior. Los sistemas abiertos idénticos pueden llegar a un mismo estado final a partir de condiciones iniciales diferentes y por distintos caminos. Tienden a conservar su propia estructura, o sea, a su **supervivencia**.

El profesor francés **R. Buvet** indujo reacciones metabólicas elementales en los coacervados. Descubrió que las reacciones de transporte y conservación entre el coacervado y su medio provocaban cambios electroquímicos en el medio, creando así un verdadero **protometabolismo**. En los sistemas abiertos puede que se acumule una sustancia química. La gota puede crecer y fragmentarse (ahora debido a causas internas), con lo que no todas las gotas así formadas tendrán la misma composición y estructura. En algunas, los catalizadores que favorecen el crecimiento y la conservación de la microgota se hallaran en las proporciones "adecuadas"; sólo se conservarán las microgotas más perfeccionadas, cuyo número iría aumentando.

Cabe suponer que los primeros organismos fueron unas unidades celulares procarióticas, semejantes a las bacterias fermentadoras (**Clostridium**), dependientes para su supervivencia de las moléculas orgánicas formadas previamente, como hemos visto, de forma no biótica. Al no haber oxígeno utilizable, estos seres primitivos obtendrían la energía necesaria para su metabolismo por **fermentación** conservándola en las moléculas de fosfato de adenosina, quedando establecida la respiración como función continua. Serían consumidores de moléculas orgánicas y por ello su desarrollo estaría, en principio, limitado por esas sustancias. Con estos materiales nutritivos y con la energía acumulada por los fosfatos de adenosina se hicieron posible las reacciones de "síntesis", que formarían nuevos compuestos químicos celulares con los que realizar "reparaciones" estructurales, así como el crecimiento de las células. En definitiva desarrollar los procesos que conocemos como **METABOLISMO**.

Con los ácidos nucleicos las primitivas células adquirieron la capacidad de "autoperpetuarse". Los genes controlarían todas las reacciones metabólicas convirtiéndose en "reguladores básicos del sistema de equilibrio". Estas actividades de los genes posibilitaron la **REPRODUCCIÓN**. Las "mutaciones" de los genes provocó que las células de generaciones posteriores pudieran hacerse distintas de sus antecesoras. Esta circunstancia constituyó la base de la evolución y de la **ADAPTACIÓN**.

Las **bacterias heterótrofas** posiblemente tuvieron este origen. En la actualidad, las células procariotas más sencillas son los micoplasmas, de vida parásita. El misterio del origen de los **virus** continúa sin

desvelar. Podrían tener su origen en organismos muy primitivos que habrían evolucionado hacia el parasitismo, perdiendo su capacidad metabólica.

En la situación actual lo más importante no es el que las células fueran formadas por los procesos que hemos descrito sino que, sobre todo, "podamos" imaginar series de sucesos aceptables a través de los cuales las células pueden haberse formado. Cualesquiera que hayan podido ser los hechos realmente acaecidos, el azar debe haber jugado su papel ya que, probablemente, muchas agrupaciones no llegaron jamás a convertirse en células completas y las que lo hicieron debieron su formación a la acumulación afortunada de los ingredientes apropiados. El único elemento fortuito, no obstante, fue el tiempo; la incertidumbre no reside en la naturaleza del "si", sino en la del "cuando" y "con qué frecuencia".

Todos los agregados que llegaron a ser células vivas, deben haber participado necesariamente de la misma composición (los principios inmediatos tanto inorgánicos como orgánicos). Las propiedades llamadas "biológicas" sólo podrían desplegarlas los agregados con esa composición; no es una coincidencia que todos los seres vivos actuales la posean.

Resumiendo, las células primitivas pudieron adquirir todas las funciones de la autoperpetuación conjuntamente con las metabólicas. Con la aparición de las primeras células, por tanto, se había atravesado la frontera entre la vida y el mundo inanimado.

22.4. Evolución nutritiva

Como las primitivas células vivas se reproducían y multiplicaban, su número debió aumentar rápidamente, lo que acarreo un aumento del consumo de los elementos nutritivos libres presentes en el océano. En consecuencia, fue sólo cuestión de tiempo el que el océano se quedara sin compuestos orgánicos disueltos, hasta el punto en que lo está hoy. Las células primitivas, por consiguiente, encontraron cada vez mayores dificultades para sobrevivir. No sucumbieron; por el contrario, gracias a su capacidad de evolución, pudieron evitar la extinción y adaptarse a las cambiantes condiciones del medio. Lo lograron desarrollando un conjunto de nuevas formas de alimentarse, métodos que no dependían de los materiales orgánicos libres disueltos en el océano.

22.4.1. Heterotrofismo.

Una de las primeras respuestas de la evolución a la disminución del alimento debió ser el desarrollo del **PARASITISMO**. Una pequeña célula podría resolver su problema de abastecimiento alimenticio si podía penetrar en interior de otra célula y utilizar sus "alimentos".

Otra nueva vía que requirió una adaptación evolutiva relativamente sencilla, fue el **SAPROFITISMO**. Los alimentos los toman de células muertas o de material celular en descomposición o residual. Hoy los grupos de saprófitos (especialmente las bacterias saprófitas) son tan abundantes, que virtualmente cualquier sustancia empieza a descomponerse casi inmediatamente después de ser expuesta al aire o al agua.

Un tercer proceso que permitió la supervivencia a pesar de la disminución de las reservas alimenticias fue el **HOLOTROFISMO**, es decir el proceso de comer otras células vivas enteras, lo que implicaría el desarrollo de estructuras capaces de llevar a cabo esta nueva forma nutricia.

En cualquier caso todos estos procesos de ingestión de alimento resultaron autolimitantes. Estas formas heterótrofas de nutrición sólo cambiaron la distribución de la materia orgánica ya existente; no añadieron ningún alimento nuevo a las reservas globales con lo que, de no haber surgido nuevas formas de alimentación, la vida hubiera cesado antes o después.

22.4.2. Autotrofismo: Fotosintetizadores y quimiosintetizadores

Supongamos que cierto producto químico importante se formaba en la sopa prebiótica por la vía $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$, siendo A un material abundante e inagotable (por ejemplo uno de los principales ingredientes de la atmósfera). Los organismos primitivos necesitaban el producto D, para efectuar sus procesos metabólicos, y, con el tiempo, al multiplicarse los organismos, el consumo de D superó su producción constante y las existencias empezaron a escasear. Se desencadenó la competencia por D y la supervivencia se hizo difícil.

Con el tiempo, un organismo adquirió por mutación la capacidad interna de producir D a partir de C por vías catalizadas enzimáticamente, por lo que podía crecer utilizando C. Este organismo se multiplicó y dominó el medio ambiente. Comenzó a mermar C, hasta que un nuevo organismo obtuvo por mutación la capacidad de producir C a partir de B. El proceso se fue prolongando hacia atrás hasta poner los recursos más sencillos al servicio de los mecanismos de la vida. Así fue como debió desarrollarse la fotosíntesis, la fuente de energía es el Sol y, por tanto, la "sopa" ya no era necesaria.

Las reservas de agua eran inagotables, la fuente de carbono eran el dióxido de carbono procedente de la "respiración". Los organismos que desarrollan sistemas para utilizar las fuentes de energía externa en la producción de sus propios compuestos orgánicos se les conoce como **AUTÓTROFOS**. Aparecieron dos tipos:

Quimiosintetizadores:

Algunos organismos primitivos encontraron nuevas fuentes externas de energía en el S, Fe, N y otros materiales. Varios grupos de organismos primitivos debieron evolucionar en el sentido de poder absorber varias moléculas inorgánicas y someterlas a diversas **reacciones químicas exergónicas**. Esta energía fue utilizada dentro de las células para el dióxido de carbono y el agua, dando moléculas de nutrientes. Esta solución fue limitada ya que dependía demasiado de materiales inorgánicos particulares, sólo obtenibles en localidades concretas.

La solución generalmente utilizada exigió una fuente de energía externa casi universal y estable. Ésta fue el Sol.

Fotosintetizadores:

Si bien las radiaciones solares de alta energía no eran las adecuadas como fuentes de energía, las de menor contenido energético como la luz visible sí. La luz solar se convirtió de hecho en la fuente básica de energía para la amplia mayoría de los organismos y desde entonces ha seguido desempeñando este papel.

La utilización de la energía luminosa dentro de las células requiere un artificio celular de captación de la luz y retener más o menos energía de la misma. Las células primitivas pueden haber elaborado varios tipos de estos compuestos a través de la síntesis celular.

El desarrollo de la vida en la Tierra habría aumentado considerablemente con la aparición de las primeras formas fotosintéticas, es decir, de seres capaces de formar su propia materia orgánica, **liberando oxígeno a la atmósfera**. En consecuencia, exceptuando sólo a los quimiosintetizadores, que también elaboran sus propios alimentos, todos los otros organismos fueron salvados de la falta de alimentos por la fotosíntesis. Parece ser que todo esto ocurrió en los mil primeros millones de años después de la constitución de la Tierra.

Hace unos 3.600 millones de años, aparecieron las **cianobacterias** primitivas capaces de realizar la **fotosíntesis oxigénica** (con fotólisis del agua) y, consecuentemente con desprendimiento de oxígeno. Se han descubierto en Australia **estromatolitos** (estructuras de aspecto laminar originadas por estas cianobacterias). Éstas fueron precedidas por las bacterias, como las actuales rojas y verdes, capaces de realizar la **fotosíntesis anoxigénica** (sólo emplean el fotosistema I y no desprenden oxígeno).

Así pues se desarrollaron, más pronto o más tarde, cinco clases de métodos alimenticios: **parasitismo, saprofitismo, holotrofismo, quimiosíntesis y fotosíntesis**. Algunos organismos individuales pudieron obtener alimento por más de uno de estos cinco métodos. Pudo ser común que un organismo unicelular fuera capaz de comer lo mismo que de fotosintetizar.

22.4.3. La revolución del oxígeno

El registro petrográfico indica que nuestra atmósfera no siempre fue tan rica en oxígeno como lo es hoy en día. Su presencia produjo cambios espectaculares en la naturaleza de los minerales depositados como rocas. Se depositó por entonces quizás un 90 % de los minerales ricos en Fe conocidos, que constituyen nuestro principal recurso de este metal. Se cree que la causa fue la aparición del Oxígeno atmosférico.

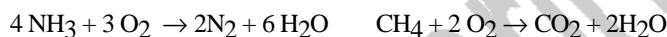
OPCIONAL:

Arenas fluviales de América y de África de edad superiores a 2300 m.a. contienen granos de uraninita (UO_2), mineral que no se hubiera conservado en presencia de más de un 1 % de la concentración de O_2 actual, ya que se altera a U_3O_8 y se disuelve; los sedimentos posteriores a esos 2300 m.a. carecen de uraninita.

La existencia de piritas (mineral muy oxidable) en rocas sedimentarias detríticas de edades comprendidas entre 3200 y 1880 m.a. indican que todavía la atmósfera carecía de O_2 .

Conforme se iba liberando el O_2 , este pasó al agua donde había Fe^{2+} disuelto; éste reaccionó con aquél, formando óxidos (hematites y magnetita) que precipitaron, junto con la sílice, formando costras. Durante unos cuantos centenares de millones de años el O_2 liberado por fotosíntesis tuvo este fin, y todo el Fe^{2+} disuelto en el océano pasó a formar esos depósitos de hierro bandeado, que contienen varias docenas de miles de Tm. de hierro mineral y son la principal reserva de Fe del planeta. La formación de estos depósitos comenzó poco antes de hace 2000 m. a.

La mayoría de los científicos coinciden en la causa de esta transformación: el 90 % de los minerales ricos en Fe conocidos fue el desprendimiento de oxígeno en la fotosíntesis de organismos como las bacterias azules. Por consiguiente, a medida que cantidades cada vez mayores de oxígeno libre escapaban de las células fotosintetizadoras al océano, y de allí a la atmósfera, el **oxígeno debió reaccionar rápidamente con todo lo posible**. Una vez depositado el Fe contenido en el océano, el O_2 liberado por fotosíntesis no fue retenido en el mar y escapó a la atmósfera, en donde ocurrieron las siguientes reacciones:



Con lo cual la atmósfera fue adquiriendo su actual composición y, en consecuencia, también se formaría la suficiente cantidad de ozono. Estos sucesos terminaron por transformar la atmósfera antigua en la que hoy existe

Esto supuso en fin de muchos microorganismos y relegó a otros a espacios sin oxígeno (bacterias metanógenas en el fondo del mar Negro o de la bahía de S. Francisco) por lo que se les cree supervivientes de los primeros tiempos de la Tierra.

En la atmósfera, bajo el impacto de radiaciones de alta energía, las moléculas de oxígeno se combinaron entre sí **formándose una capa de ozono** que constituye una magnífica pantalla que protege a la superficie de la tierra de la llegada de radiaciones de alta energía. En consecuencia, los organismos que evolucionaron después vivieron en un ambiente totalmente libre de radiaciones de alta energía (los modernos organismos superiores están poco adaptados a estas radiaciones y mueren con dosis pequeñas de los mismos). Los más primitivos se adaptaron mejor (las bacterias todavía presentan resistencia a las radiaciones incluso de rayos X).

El **oxígeno libre reaccionó también con los materiales de la corteza**, convirtiéndolos, a la mayoría, en óxidos. Sólo unos pocos metales (Au, Ag...) relativamente inertes, resistieron la acción del oxígeno.

Además el oxígeno libre hizo posible una **nueva forma de respiración mucho más eficaz**. La cantidad de energía obtenida entonces por cantidad unitaria de alimento consumido es mucho mayor que en la fermentación. Cuando el oxígeno libre del medio ambiente empezó a acumularse en cantidades notables, los organismos evolucionaron nuevamente desarrollando sistemas de utilización de ese gas. Una forma **aeróbica** de respiración empezó a existir. Esta ventaja pudo haber estimulado el desarrollo de las células eucariotas. Así pues, la colonización de las tierras emergidas por seres vivos quizá sólo fue posible tras la incorporación del oxígeno a la atmósfera. Hace unos 1.500 millones de años que se pasó de una biosfera anaerobia a una biosfera aerobia.

La síntesis química fue dejando paso a la **síntesis biótica** de los compuestos orgánicos, quedando establecido un sistema de vida dependiente en último término de la energía solar, con capacidad de reproducción sexual a partir del cual comenzó una amplia evolución biológica.

Estos efectos y actividades de los organismos primitivos alteraron grandemente las características físicas de la Tierra y también las características biológicas de los propios organismos. La Tierra primitiva originó y también influyó en el desarrollo de la vida en la Tierra, y la vida influyó luego recíprocamente en el desarrollo de la corteza terrestre.

Los primeros fósiles confirmados de **EUCARIONTES** tienen una antigüedad de unos 1.000 millones de años. Se han elaborado varias hipótesis para explicar su aparición:

Hipótesis autógena (Taylor y Dobson), el origen de las células eucariotas serían células procariotas que aumentarían de tamaño y su citoplasma se compartimentaría por medio de membranas. Estos compartimentos darían lugar a los orgánulos celulares eucariotas.

Hipótesis de la endosimbiosis (Margulis, Sagan), el origen de las células eucariotas sería por continuos procesos de simbiosis entre diversas células procariotas, que se transformaron en los diversos orgánulos celulares. Las células procariotas serían fagocitadas por un procariota ancestral anaerobio, estableciéndose una relación simbiótica entre dichas células. Así, se piensa que las mitocondrias surgirían de bacterias aerobias, los cloroplastos de cianobacterias, los cilios y flagelos de bacterias espiroquetas, etc.

En algún momento del proceso evolutivo surgieron los **organismos pluricelulares (Metazoos)**, bien a partir de una asociación colonial formada al permanecer juntas las células hijas resultantes de una división celular, bien por compartimentación citoplasmática en un organismo unicelular multinucleado. La existencia de la célula eucariótica y el progresivo aumento del nivel de O_2 (necesario para la síntesis de la proteína colágeno, de esteroides y de ácidos grasos) eran condiciones necesarias para la aparición de los metazoos.

El aumento de la cantidad de oxígeno libre debió ser consecuencia de la proliferación de organismos fotosintéticos (bajo la capa de ozono ya existente) hasta las aguas superficiales; cuando su nivel alcanzó entre el 3 % y el 10 % del nivel actual en la atmósfera ocurrieron, entre otros, los siguientes procesos:

1º. Oxidación secundaria de los depósitos de Fe bandeados.

2º. Precipitación de grandes cantidades de SO_4Ca , en forma de yeso y anhidrita.

3º. Aparición de los metazoos². Los primeros Metazoos fósiles aparecen a finales del Proterozoico, en las rocas sedimentarias de los cinco continentes, con edades comprendidas entre 670 y 550 m. a.; el 70 % de ellos son celentéreos, y de ellos la 3/4 partes eran flotadores y el resto formas sésiles coloniales; también se encuentran gusanos parecidos a los poliquetos, otros parecidos a los artrópodos, pero sin caparazón, en fin todos ellos carentes de esqueleto calizo.

Aparecerían asociaciones celulares con una cierta **coordinación intercelular**. Se formarían epitelios que separaran el medio interno del externo, de manera semejante a las membranas celulares. El proceso evolutivo propició la formación de asociaciones celulares (tejidos) diferenciadas estructuralmente y especializadas funcionalmente.

La diversidad de los primeros metazoos y su rápida expansión estaría relacionada, quizá, con un posible origen polifilético y con la ausencia inicial de competidores por los distintos nichos ecológicos; su aparición no modificó el equilibrio químico de la Tierra.

Los primeros animales con esqueleto se encuentran al comienzo del Fanerozoico. La formación y conservación de esqueletos calizos requiere un nivel de oxígeno en el agua del 10 % del actual en la atmósfera, nivel que se alcanzó hace unos 600 m. a. (límite entre el proterozoico y el fanerozoico). Dicho nivel permitió la ampliación de la capa de ozono, lo que permitió la colonización del ambiente terrestre hace unos 400 o 420 m. a. (Silúrico); la aparición de los grandes bosques durante el Devónico (380 m.a.) , provocó el aumento del oxígeno atmosférico, el espesor de la capa de ozono, con lo que ya aparecieron los anfibios y los insectos.

22.5. La teoría celular y la organización de los seres vivos

El conocimiento de la célula escapa a las posibilidades del ojo humano; por ello el mundo celular permaneció hasta el siglo XVII, cuando los pioneros de la investigación microscópica, **Robert Hooke** y **Leeuwenhoek**, construyeron los primeros microscopios mediante un conjunto de lentes pulimentadas por ellos mismos. R.Hooke examinó con su microscopio una laminilla de corcho y observó unas cavidades poliédricas, semejantes a las celdillas de un panal, a las que denominó células o celdas. Leeuwenhoek fue el primero en observar microbios en el agua, las células de la sangre y del esperma,

² Las medusas y otros celentéreos pueden vivir con una atmósfera que sólo contenga un 7 % de oxígeno.

a las que llamó animáculos. En 1838 **Purkinje** introdujo el término protoplasma para designar la masa líquida que llenaba las células.

En los años 1838-1839, el botánico **M. Schleiden** y el zoólogo **T. Schwann** aportaron pruebas definitivas, basadas en sus investigaciones y en los datos acumulados hasta entonces, que permitieron establecer el enunciado fundamental de la **TEORÍA CELULAR**: las plantas y los animales están constituidos por una o más unidades fundamentales, las células. En 1855, esta teoría fue completada por **R. Virchow** cuando proclamó que toda célula procede de otra célula (*Omnis cellula e cellula*).

La moderna teoría celular se puede resumir en cuatro puntos fundamentales:

1. La célula es la **unidad anatómica y fisiológica** de todos los seres vivos, pues todos los organismos están constituidos por células.
2. La célula es la **unidad de origen**, esto es, cada célula procede de otra célula anterior a ella por división de la misma.
3. La información genética necesaria para el mantenimiento de la existencia de la célula y la producción de nuevas células se transmite de una generación a la siguiente.
4. Las reacciones químicas que constituyen el metabolismo tienen lugar en las células.

22.5.1. Niveles de organización celular

Dentro de la jerarquía de los niveles de organización de la materia, y por encima del nivel molecular, está el **nivel celular**, donde las estructuras alcanzan el grado de complejidad necesario para manifestar propiedades vitales. Un organismo no es simplemente un mosaico de estructuras independientes, sino un sistema integrado y autorregulado, en el que la estructura y la función son inseparables.

Según el grado de complejidad se pueden considerar dos tipos de organización celular: la **célula procariota** y la **eucariota**. Además de estos dos niveles de organización celular se considera un tercer tipo de organización, formado por los **virus**, cuya extraordinaria simplicidad estructural y la carencia de metabolismo propio los convierte en organismos que se sitúan entre lo vivo y lo inerte.

Los **procariotas** son el conjunto de organismos unicelulares que constituyen el grupo de las **Moneras**, en el que se incluyen las bacterias, las algas cianofíceas y los micoplasmas. Carecen de verdadero núcleo aislado por una membrana nuclear; su material cromosómico está formado por ADN desnudo. El protoplasma está poco diferenciado y con escaso grado de compartimentización.

Recientes estudios genéticos muestran que unos microorganismos anaerobios, incluyendo los productores de metano y las bacterias sulfúreas, están tan alejados del resto de procariontes como lo están de los eucariontes y probablemente representan un reino aparte (Archeobacterias). En este caso los procariontes serían las Moneras y las Archeobacterias.

La **célula eucariota** es objeto de desarrollo en otro tema específico (contienen verdadero núcleo y alta compartimentación celular). Todos los demás seres vivos tienen células de este tipo.