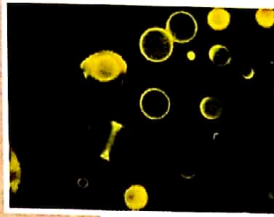


Capítulo 1

Origen de la célula



La cuestión del origen de la vida es uno de los problemas fundamentales de las ciencias naturales, dado que en tanto no sea resuelto, el intelecto humano no podrá ser capaz de comprender la naturaleza de la vida misma.

A. I. OPARIN

Sección 1 La unidad de la vida

Capítulo 1. Origen de la célula

Capítulo 2. La organización de las células

Capítulo 3. Cómo entran y salen sustancias de la célula

Capítulo 4. Metabolismo y energía

Capítulo 5. Glucólisis y respiración celular

Capítulo 6. Fotosíntesis, luz y vida

¿**A** qué nos referimos cuando hablamos de vida en frases como "la evolución de la vida" o "la vida en otros planetas" o "cuándo comenzó la vida"? En realidad, no hay una definición simple de qué es la vida. La vida no existe en abstracto. No hay vida, sino organismos vivos. Más aún, no hay una manera sencilla y única de trazar una línea demarcatoria entre lo vivo y lo no vivo.

Nadie sabe con exactitud cuándo o cómo comenzó su existencia la célula viva (ver fig. 1-1). Sin embargo, el conocimiento creciente de la historia de nuestro planeta y los resultados de numerosos experimentos de laboratorio favorecen la hipótesis de que los sistemas precursores de las primeras células vivas son el resultado de un proceso espontáneo de autoensamblaje o de moléculas simples. En algún momento de la historia de este planeta, a partir de la complejización de sistemas polimoleculares, se originaron células sencillas capaces de producir descendientes similares a sí mismas y de evolucionar. La aparición de estos sistemas estuvo íntimamente asociado con los cambios que sufrió la Tierra. Por ello, para analizar el origen de la vida, debemos conocer las condiciones a partir de las cuales estas células primordiales aparecieron.

Se forma la Tierra

El Universo comenzó, según teorías actuales, con una gran explosión o "Big Bang". Antes de esta explosión, toda la energía y la materia presentes en el Universo en la actualidad probablemente se encontraban en forma de energía pura, comprimidas en un único punto. Este modelo cosmológico propone que con el "Big Bang" o "Gran Explosión", esta energía se liberó y cada partícula de materia formada posteriormente se alejó de manera violenta de toda otra partícula. Se supone que la temperatura en el momento de la explosión, ocurrida hace aproximadamente 13.700 millones de años, era cercana a los 100 mil millones de grados Celsius (10^{11}°C). A esta temperatura no podrían existir átomos (véase Apéndice 1); toda la materia estaría en forma de partículas elementales subatómicas. Estas partículas, de muy corta existencia, se acelerarían, colisionarían y se aniquilarían unas a otras, formando partículas nuevas y liberando más energía.

El modelo propone que a medida que el Universo se expandía y se enfriaba, gradualmente se formaba más materia a partir de energía. Alrededor de 100 segundos después del "Big Bang", la temperatura habría descendido a 1.000 millones de grados Celsius.

En ese momento, dos tipos de partículas estables que hasta ese momento eran escasas habrían comenzado a combinarse. Estas partículas, los protones y los neutrones, for-

*Célula del riñón de mono
verde africano (Cercopithecus
aethiops), llamada célula
Vero, vista por un ensayo
de fluorescencia directa.*

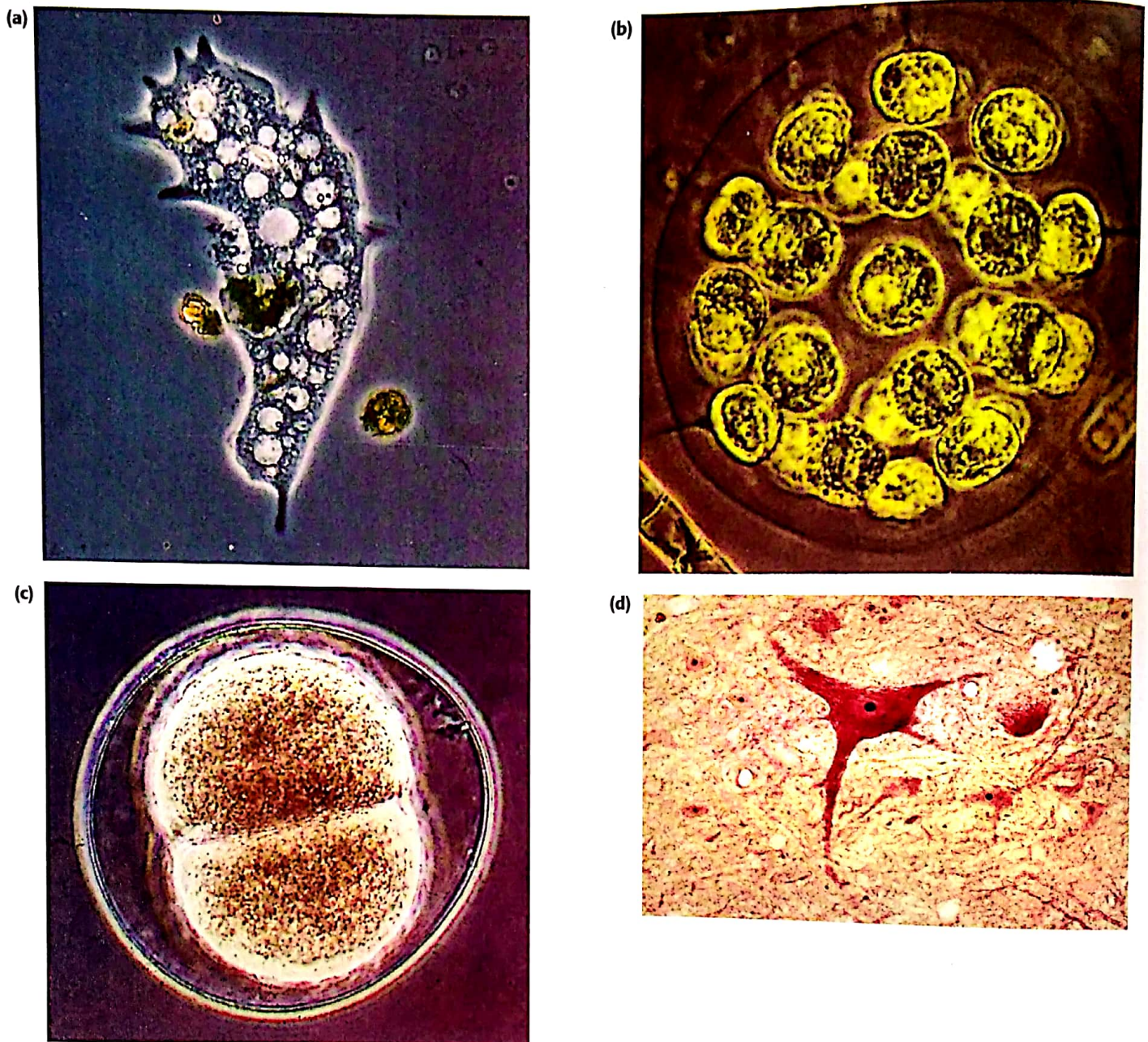


Fig. 1-1. GALERÍA DE CÉLULAS. (a) *Amoeba proteus*, organismo unicelular que recibió su nombre de Proteo, dios griego capaz de cambiar de forma a voluntad. Las prolongaciones de la célula, conocidas como pseudópodos, la capacita para moverse y capturar a sus presas. (b) Este organismo simple, llamado *Pandorina*, está constituido por 32 células, la mayoría de las cuales se mantienen unidas por una sustancia gelatinosa. Cada una de

estas células puede sobrevivir independientemente de las otras. En el momento de la reproducción, cada célula se divide, produciendo una nueva célula en el interior, y luego la colonia progenitora se disocia. (c) El embrión de un erizo de mar en la etapa de dos células. Dentro de cada célula se encuentra un núcleo que lleva toda la información genética necesaria para el desarrollo de un erizo maduro. (d) Una neurona de cerebro humano.

maron los núcleos de los átomos. Se postula que cuando el Universo alcanzó unos 2.500 °C, esos núcleos, con sus protones de carga positiva, atrajeron a pequeñas partículas livianas de carga negativa —los electrones— que se movían rápidamente alrededor de ellos. Así se habrían formado los primeros átomos.

Es a partir de estos átomos, desintegrados y vueltos a formar en el curso de varios miles de millones de años, que probablemente surgieron todas las estrellas y comenzaron a formarse los planetas del Universo, incluidos nuestra estrella y nuestro planeta (ver fig. 1-2). Hace unos 5.000 millones de años, según calculan los cosmólogos, nació la estre-

lla que es nuestro Sol. Se piensa que el Sol también se formó a partir de partículas de polvo y gases de hidrógeno y helio que formaban remolinos en el espacio entre las estrellas más viejas.

Se postula que hace aproximadamente 4.600 millones de años los planetas del Sistema Solar comenzaron a condensarse a partir de los restos de gas y de polvo que giraban alrededor de la estrella recién constituida.

Mientras la Tierra y los otros planetas se conformaban, la energía proveniente de materiales radiactivos mantenía sus interiores muy calientes. En esta etapa, es probable que la superficie de la Tierra se ha-



Fig. 1-2. LA "MUERTE" DE UNA ESTRELLA. Esta explosión en el cielo, una supernova en términos de los astrónomos, fue causada por la muerte de una estrella. Hace aproximadamente 170 mil años, la estrella agotó su combustible. A lo largo de su historia, las reacciones termonucleares, como las que ocurren ahora en nuestro Sol, convirtieron el hidrógeno en helio y el helio en carbono y oxígeno, que a su vez se fusionaron en elementos aún más pesados. La estrella, que alguna vez tuvo un tamaño veinte veces mayor que el Sol, se enfrió, y por la fuerza de la gravedad sufrió una implosión. Esta supernova, la primera que se registró en 383 años, fue vista por primera vez en 1987 por astrónomos del observatorio Las Campanas de Chile.

llara en un estado turbulento. Se propone que, cuando aún estaba tan caliente que era casi líquida, los materiales más pesados comenzaron a reunirse en un núcleo central denso. A medida que la superficie de la Tierra se enfriaba, fue formándose una corteza externa (👁️ fig. 1-3).

Se supone que la atmósfera primitiva estaba constituida principalmente por hidrógeno y helio, pero que rápidamente estos elementos se habrían fugado hacia el espacio exterior debido a que las fuerzas gravitacionales eran muy débiles como para retenerlos. Posteriormente, a partir de los gases desprendidos por los volcanes, se habría formado una atmósfera secundaria, diferente tanto de la atmósfera primitiva como de la actual. El agua habría emanado de los volcanes en forma gaseosa enriqueciendo la atmósfera en vapor de agua. Gradualmente, conforme descendía la temperatura, estas nubes de vapor se habrían condensado y formado los primeros océanos calientes y poco profundos de la Tierra primitiva.



Fig. 1-3. UN PLANETA SINGULAR. Este planeta, la Tierra, es marcadamente distinto del resto de los planetas conocidos hasta el momento. Desde cierta distancia se ve azul y verde, y brilla un poco. El azul es agua, el verde es clorofila y el brillo es la luz reflejada por la capa de gases que rodea la superficie del planeta. La vida, tal como la conocemos, depende, y a la vez mantiene, estos rasgos tan visibles de la Tierra.

Comienza la vida

Actualmente se propone que es a partir de los átomos presentes en este planeta que los sistemas vivos se autoorganizaron y evolucionaron. Visto de este modo, cada átomo de nuestro cuerpo tiene su origen en la enorme explosión. En palabras del célebre estudioso catalán Joan Oró (1923-2004), quien se especializó en el estudio de la síntesis de moléculas orgánicas previa a la aparición de la vida, somos carne y hueso pero "también somos polvo de estrellas".

Toda la vida que existe en el planeta habita un área denominada **biosfera**. Esta capa que abarca toda la superficie terrestre, se extiende entre 8 y 10 kilómetros hacia el espacio exterior, en la atmósfera, y alrededor de la misma distancia hacia las profundidades del mar.

Desde una perspectiva bioquímica, cuatro características distinguen a las células vivas de otros sistemas químicos:

- la existencia de una membrana que separa a la célula del ambiente circundante y le permite mantener su identidad bioquímica;
- la presencia de enzimas, proteínas complejas esenciales para las reacciones químicas de las que depende la vida (véase cap. 4, Las enzimas y la energía de activación);
- la capacidad para replicarse generación tras generación;
- la posibilidad de evolucionar a partir de la producción de descendencia con variación.



Historia de la biología
Preguntas sobre la vida - 1922



Fig. 1-4. LA TIERRA PRIMITIVA. La energía abundaba en la Tierra primitiva: probablemente había violentas tempestades, rayos, partículas de alta energía y luz ultravioleta. Se postula que el vapor de agua ascendía hacia el aire desde la superficie de los mares primitivos, se enfriaba en las capas superiores de la atmósfera, formaba nubes, volvía a caer co-

mo lluvia sobre la corteza terrestre y nuevamente se transformaba en vapor. Es probable que violentas tempestades acompañadas de rayos, suministraran energía eléctrica. El Sol bombardearía la superficie terrestre con partículas de alta energía y luz ultravioleta. Los elementos radiactivos del interior de la Tierra aportarían su energía a la atmósfera.

¿Cómo surgieron estas características? ¿Cuál de ellas apareció primero e hizo posible el desarrollo de las otras? Si bien los trabajos sobre el origen de la vida han proliferado enormemente, han suscitado muchas controversias que aún no se han dilucidado.

En este caso, como en otros frente a ciertas preguntas acerca del mundo natural, la comunidad científica no adhiere a un único modelo explicativo, sino a la coexistencia de varios modelos, lo cual da lugar a diferentes hipótesis que deben ser analizadas críticamente.

El primer conjunto de hipótesis contrastables acerca del origen de la vida fue propuesto por el bioquímico ruso A. I. Oparin (1894-1980) y por el inglés J. B. Haldane (1892-1964), quienes trabajaban en forma independiente, cada uno de ellos en su país de origen y sin conocimiento del trabajo del otro. De manera convergente y contemporánea, estos científicos postularon que la aparición de la vida fue precedida por un largo período que denominaron *evolución química*. Cuáles eran las sustancias, en especial los gases, presentes en la atmósfera primitiva y en los mares durante este período, es objeto de controversias. Sin embargo, hay consenso en dos aspectos críticos:

1. *Había muy poco o nada de oxígeno libre (o molecular) presente (la atmósfera era reductora).*
2. *Los cuatro elementos (hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno) que constituyen más del 95% de los tejidos vivos estaban disponibles en alguna forma en la atmósfera y en las aguas de la Tierra primitiva.*

Además de estos materiales simples, la energía abundaba en forma de calor, rayos (descargas eléctricas), radiactividad y radiaciones provenientes del Sol (ver fig. 1-4). Oparin propuso que, en esas condiciones, los gases atmosféricos acumulados en los mares y los lagos de la Tierra se habrían condensado formando moléculas orgánicas. Como no había oxígeno libre, estas moléculas orgánicas no habrían sido degradadas a sustancias simples tal como ocurriría en la actualidad.

Debido a la radiación ultravioleta, muchas moléculas se habrían destruido y vuelto a formar pero, protegidas por el agua del océano que actúa como un filtro para las radiaciones, algunas de ellas habrían logrado persistir. En ciertos ambientes, estas moléculas habrían quedado

más concentradas, por ejemplo por la desecación de un lago, formando pequeñas charcas costeras o por la adhesión a superficies sólidas protegidas de la luz. En esos microambientes, las moléculas orgánicas pequeñas habrían reaccionado entre sí formando moléculas más grandes. A medida que aumentaban su concentración, diferentes tipos de moléculas se habrían acercado entre sí cada vez más, combinándose o asociándose en pequeños sistemas, como consecuencia de las mismas fuerzas químicas que actúan sobre las moléculas en la actualidad. Una vez constituidos estos sistemas, la etapa de evolución química habría dado lugar a una nueva etapa, a la que Oparin denominó *evolución prebiológica*.

De modo progresivo, estos sistemas plurimoleculares habrían sido capaces de intercambiar materia y energía con el ambiente y de optimizar en su interior la eficiencia de ciertas reacciones. En los sistemas químicos actuales, ya sea en el laboratorio o en los organismos vivos, las moléculas y los agregados moleculares más estables tienden a persistir y los menos estables, a desintegrarse. De igual modo, los sistemas constituidos por agregados moleculares que tenían mayor estabilidad química o mayor capacidad para duplicarse en las condiciones de la Tierra primitiva habrían tendido a aumentar su frecuencia a través del tiempo, respecto de otros sistemas con composiciones menos eficientes. Este mecanismo análogo a la selección natural (véase cap. 19), al que Oparin denominó *protoselección natural*, habría favorecido un aumento de la complejidad, que condujo a la adquisición de un metabolismo sencillo, punto de partida de todo el mundo viviente (véase cap. 4).

Oparin publicó su teoría en 1924. Sin embargo, recién en 1953 el bioquímico estadounidense Stanley Miller aportó las primeras evidencias experimentales que constituyeron un fuerte sustento para la propuesta de Oparin (ver fig. 1-5). Los experimentos de Miller, que fueron repetidos varias veces, mostraron que casi cualquier fuente de energía (rayos, radiación ultravioleta o ceniza volcánica caliente) puede convertir las moléculas simples, posiblemente presentes sobre la superficie terrestre, en una variedad de compuestos orgánicos complejos. En experimentos posteriores realizados en distintas condiciones experimentales se obtuvieron casi todos los aminoácidos, así como las unidades constitutivas de los nucleótidos del DNA y del RNA (véase Apéndice 2).

Pese a que existen ciertas objeciones a la composición de la atmósfera supuesta por Miller en su trabajo, su experimento es importan-

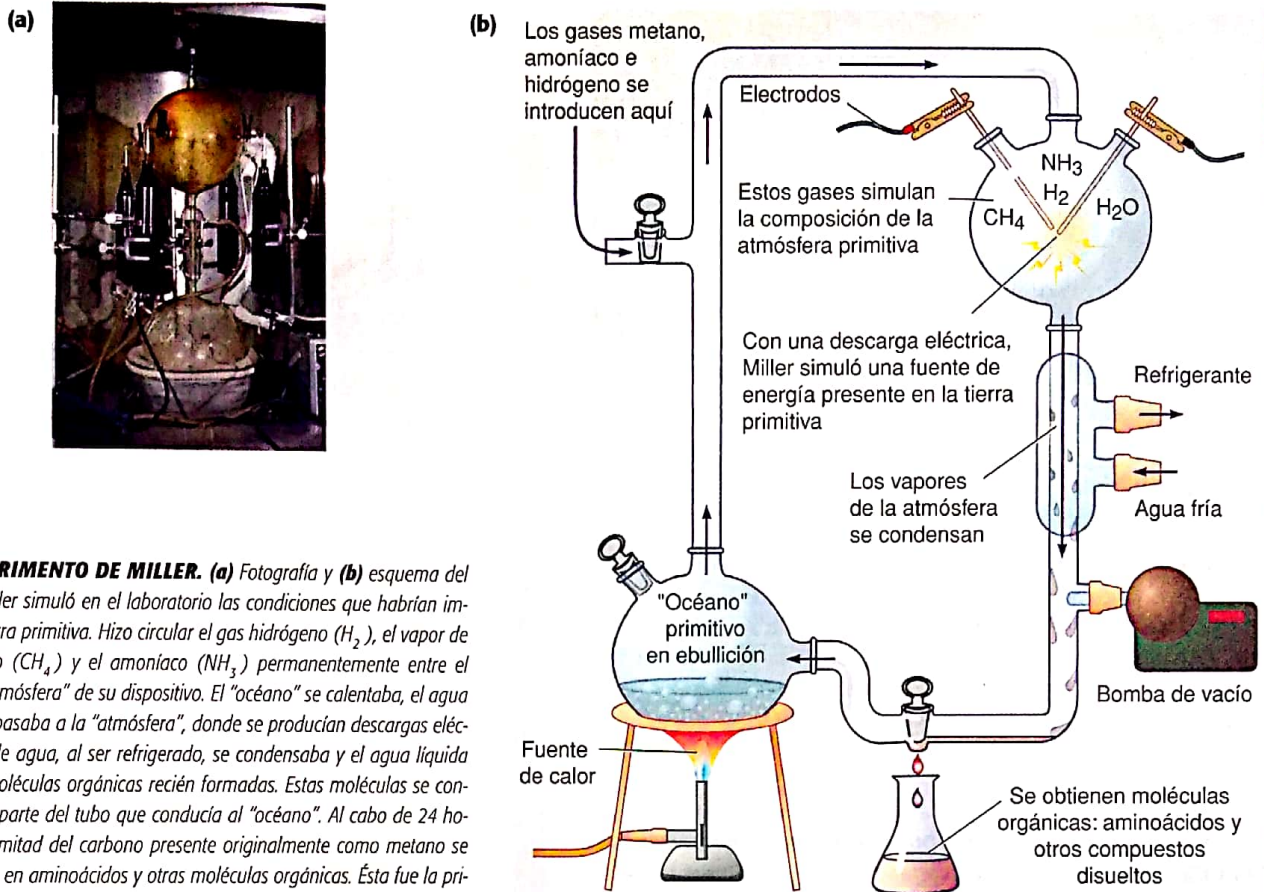


Fig. 1-5. EXPERIMENTO DE MILLER. (a) Fotografía y (b) esquema del experimento. Miller simuló en el laboratorio las condiciones que habrían imperado en la Tierra primitiva. Hizo circular el gas hidrógeno (H_2), el vapor de agua, el metano (CH_4) y el amoníaco (NH_3) permanentemente entre el "océano" y la "atmósfera" de su dispositivo. El "océano" se calentaba, el agua se evaporaba y pasaba a la "atmósfera", donde se producían descargas eléctricas. El vapor de agua, al ser refrigerado, se condensaba y el agua líquida arrastraba las moléculas orgánicas recién formadas. Estas moléculas se concentraban en la parte del tubo que conducía al "océano". Al cabo de 24 horas, cerca de la mitad del carbono presente originalmente como metano se había convertido en aminoácidos y otras moléculas orgánicas. Ésta fue la primera evidencia experimental de la teoría de Oparin.

te porque muestra que ciertos compuestos orgánicos podrían haberse formado en las condiciones de la Tierra primitiva, quizás no en los mares abiertos como Oparin propuso inicialmente, pero sí en microambientes protegidos, con condiciones particulares favorables. La mayoría de los bioquímicos coinciden en que, dada la disponibilidad de moléculas precursoras y fuentes de energía existentes en la Tierra joven, las reacciones químicas productoras de aminoácidos, nucleótidos y otras moléculas orgánicas fueron inevitables. Cabe entonces preguntarnos por qué este proceso no ocurre actualmente. La respuesta es simple: las condiciones descritas por Oparin no existen ya en ninguna parte de la superficie terrestre. En la Tierra actual, las moléculas orgánicas se degradarían en presencia de oxígeno o serían devoradas por los organismos que pueblan el planeta. Además, a partir de la aparición de organismos capaces de liberar oxígeno a la atmósfera, se fue constituyendo la capa de ozono (O_3) capaz de filtrar, y así disminuir, las radiaciones ultravioleta.

Así, los seres vivos modificaron la atmósfera primitiva, los mares y cada rincón de la Tierra, lo que impidió, a su vez, la formación posterior de nueva vida a partir de sustancias inorgánicas. En ese sentido, según palabras de Oparin, "...por paradójico que ello pueda parecer, debemos admitir que la causa principal de la imposibilidad de la aparición de la vida en las condiciones naturales actuales reside en el hecho de que ya existe".

Hipótesis alternativas sobre el origen de la vida

Oparin experimentó sus hipótesis utilizando un modelo al que llamó **coacervados**. Los coacervados son sistemas constituidos por distintas macromoléculas en suspensión en un fluido —sistema coloidal—

que se habrían formado en la Tierra primitiva en un medio acuoso. Se han postulado modelos alternativos, entre otros, el del científico norteamericano Sidney W. Fox. En experimentos en los que simularon las condiciones existentes durante los primeros cientos de millones de años de la Tierra, Fox y sus colaboradores obtuvieron estructuras formadas por una membrana proteica —llamadas microesferas proteinoides— dentro de las cuales ocurrían reacciones químicas análogas a las de las células vivas (ver fig. 1-6).

Las microesferas no son células vivas, pero el hecho de que puedan formarse en el laboratorio en condiciones que simulan las de la Tierra primitiva permite proponer modelos sobre los mecanismos que podrían haber dado origen a estructuras autónomas similares.

Sin embargo, para explicar el origen de la vida es necesario responder a una pregunta fundamental: ¿cuál fue la entidad molecular capaz de acumular información genética, de producir copias de su propia estructura y de transmitirlas a la descendencia? Los biólogos actuales acuerdan en que cualquier forma ancestral de vida necesitó un rudimentario "manual de instrucciones" que pudiera ser copiado y transmitido de generación en generación, un requisito esencial para que ocurra un cambio evolutivo.

En el modelo de Fox, esta entidad molecular eran las proteínas. Muchos científicos apoyaron durante un tiempo esta posibilidad, dado que ciertas proteínas, como veremos en el capítulo 4, pueden acelerar ciertas reacciones químicas sin sufrir cambios en su estructura (capacidad catalítica).

Hoy se sabe que las proteínas no son capaces de portar información genética y transmitirla a la descendencia. Este papel lo cumplen los

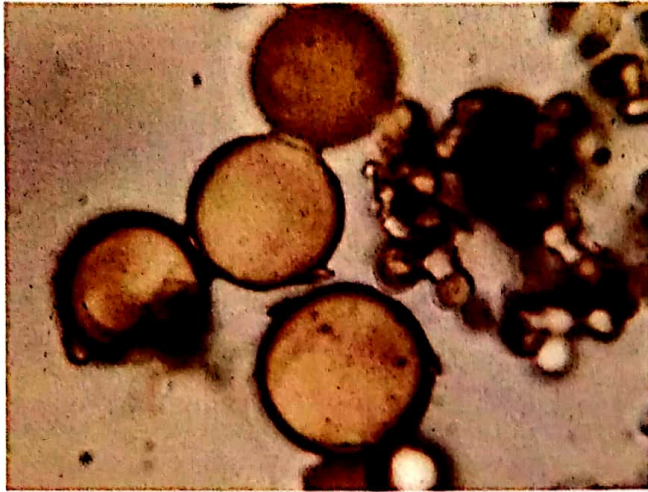


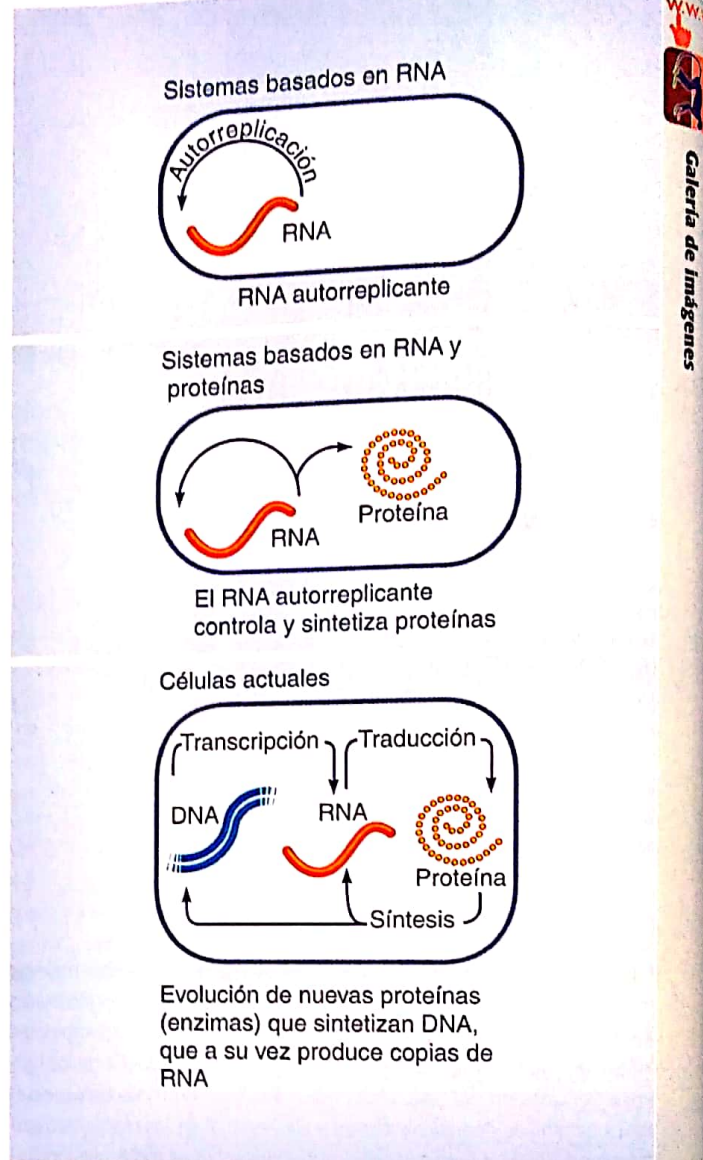
Fig. 1-6. EXPERIMENTO DE FOX. Las microesferas proteinoides se producen mediante una serie de reacciones químicas, que comienzan con mezclas secas de aminoácidos. Cuando las mezclas se calientan a temperaturas moderadas, se forman polímeros, los cuales, en condiciones adecuadas, forman espontáneamente las microesferas. Las microesferas crecen lentamente mediante la adición del material proteinóide en solución y, finalmente, forman por gemación microesferas más pequeñas.

Fig. 1-7. ENSAMBLE DE MOLÉCULAS DURANTE LA EVOLUCIÓN TEMPRANA DE LA VIDA. Posible camino evolutivo de sistemas simples autorreplicantes de moléculas de RNA hasta los sistemas presentes en las células actuales, en las cuales el DNA almacena la información genética y el RNA actúa como un intermediario en la síntesis de proteínas. En los inicios del proceso, es posible que coexistiera una inmensa variedad de diferentes moléculas de RNA surgidas por errores de copia en su duplicación. Posteriormente, el RNA habría pasado a ejercer control sobre la síntesis de proteínas. En una etapa posterior, las proteínas habrían reemplazado al RNA en la función de acelerar las reacciones químicas. Mediante un proceso aún no esclarecido, la función de almacenar la información genética de gran parte de los organismos habría sido transferida del RNA al DNA, que es menos susceptible a la degradación química. Entre los ácidos nucleicos y las proteínas se habría desarrollado una compleja y cooperativa serie de interacciones de controles y equilibrios. Así, estos compuestos, en un proceso de autoorganización, habrían resultado complementarios.

ácidos nucleicos, generalmente el DNA (véase cap. 9). Sin embargo, el problema no queda resuelto, porque el DNA necesita de las proteínas para replicarse y, a su vez, las proteínas necesitan de la información que provee el DNA para sintetizarse. Entonces, ¿quién surgió primero? Este dilema acerca de quién tuvo primacía se asimila al viejo acertijo: "¿quién fue primero, el huevo o la gallina?".

Por otra parte, el RNA, que transporta la información para la síntesis de proteínas, se copia a partir del DNA (véase cap. 10). Es improbable que el DNA y las proteínas hayan surgido en el mismo lugar y en el mismo momento y parece también improbable que el uno pueda existir sin las otras.

Uno de los mayores desafíos de la investigación sobre el origen de la vida es dilucidar una historia posible acerca de cómo el DNA, el RNA y las proteínas aparecieron y se vincularon entre sí. La propuesta más aceptada es que el RNA habría sido el primer polímero en realizar las tareas que el DNA y las proteínas llevan a cabo actualmente en las células. El RNA podría copiarse a sí mismo a partir de sus propios com-



ponentes. Numerosos estudios de laboratorio apoyaron este argumento y se propusieron modelos que explican cómo se pudieron ensamblar las funciones del DNA, el RNA y las proteínas durante la evolución temprana de la vida (véase fig. 1-7).

Son muchos los trabajos realizados y las hipótesis propuestas para explicar cómo surgió el mundo de los RNA y posteriormente la vida; sin embargo, la evidencia en favor de cada una es, a lo sumo, fragmentaria. La colaboración entre químicos, bioquímicos y biólogos moleculares en la realización de experimentos aún más ingeniosos y de modelos más integradores probablemente proporcionará algunas de las piezas faltantes de este rompecabezas.

Las primeras células: algunas evidencias

Si bien no se sabe cuándo aparecieron las primeras células vivas sobre la Tierra, podemos establecer alguna suerte de escala temporal. Los fósiles más tempranos encontrados hasta el momento, semejantes a las bacterias actuales, datan de 3.500 millones de años, alrededor de



Fig. 1-8. LOS FÓSILES MÁS TEMPRANOS. Este microfósil de células con aspecto de bacterias se encontró en Australia Occidental. Data de 3.500 millones de años y es uno de los fósiles más antiguos conocidos.

1.100 millones de años después de la formación de la Tierra (👁 fig. 1-8).

Hay también evidencias de vida incluso más antiguas, de alrededor de 3.800 millones de años, que no son fósiles de organismos, sino evidencias indirectas de su actividad química. Uno de estos indicios proviene de depósitos sedimentarios de la isla de Isua, al oeste de Groenlandia. Al analizar esas rocas, los investigadores encontraron una proporción inesperada entre el ^{12}C y el ^{13}C , los dos isótopos estables del carbono que se encuentran en la naturaleza (véase Apéndice 1). Los organismos vivos tienden a incorporar en forma selectiva el ^{12}C , que es levemente más ligero que el ^{13}C . En consecuencia, una proporción mayor que la habitual de ^{12}C en las rocas de Isua indicó que la presencia de alguna forma de vida habría modificado el equilibrio en que se encuentran estos dos isótopos en condiciones abióticas.

Si bien en estas rocas no se hallaron organismos fósiles, tal vez debido a que el calor y los procesos geológicos posteriores los destruyeron, la antigüedad de las evidencias químicas sugiere que los microorganismos responsables de estos desequilibrios se habrían originado incluso antes del fin del bombardeo de meteoritos que sufría la Tierra durante ese período. Los nuevos hallazgos de fósiles o de evidencias indirectas de su existencia nos acercan cada vez más al instante del inicio de la vida.

Sin embargo, es difícil esclarecer cómo en algún momento de la historia de la Tierra algún pequeño agregado de sustancias pudo atravesar la zona de penumbra que separaba lo vivo de lo no vivo, millones de años atrás.

¿Vida sólo en la Tierra?

Los estudios astronómicos y las exploraciones llevadas a cabo por vehículos espaciales no tripulados indican hasta el momento que entre los planetas de nuestro sistema solar, sólo la Tierra sustenta vida. Las

condiciones en la Tierra son ideales para los sistemas vivos basados en moléculas que contienen carbono. Un factor principal es que la Tierra no está demasiado cerca ni demasiado lejos del Sol. Las reacciones químicas de las cuales depende la vida tal como la conocemos requieren agua líquida (📖 recuadro 1-1, *El agua y los puentes de hidrógeno*) y virtualmente cesan a temperaturas muy bajas. A su vez, a temperaturas altas, los compuestos químicos complejos esenciales para la vida son demasiado inestables, de modo que en estas condiciones no pueden acumularse.

Una característica de la atmósfera de la Tierra es que filtra muchas de las radiaciones más energéticas provenientes del Sol, capaces de romper los enlaces covalentes entre los átomos de carbono. Sin embargo, permite el pasaje de la luz visible, lo que posibilitó uno de los pasos más significativos en la evolución de los sistemas vivos complejos: la fotosíntesis (véase cap. 6).

No obstante, frente a las controversias sobre el origen de la vida, algunos científicos reconocidos postularon que hasta las formas de vida más simples existentes en la actualidad son demasiado complejas para haberse originado en la Tierra, desplazando la búsqueda del origen de la vida al espacio interestelar.

La hipótesis del origen extraterrestre de la vida fue postulada por primera vez en 1906 por el físico y químico sueco Svante Arrhenius (1859-1927), quien planteó que los primeros gérmenes de la vida (esporas o bacterias) habrían llegado del espacio en meteoritos desprendidos de un planeta en el que ya habría vida. Ideas de este tipo, que han surgido una y otra vez a lo largo de la historia de la ciencia, no hacen más que desplazar el problema del origen de la vida hacia escenarios más lejanos pero no contribuyen a su comprensión, ya que no proveen una explicación acerca de los procesos involucrados en su surgimiento.

Distinta es la hipótesis de que una buena parte de la materia prima para el proceso del origen de la vida podría haber provenido del espacio interestelar. Ciertos estudios muestran que las moléculas orgánicas más simples se sintetizan espontánea y abundantemente en el espacio, de manera que es factible que hayan ingresado en la Tierra primitiva transportadas por cometas y meteoritos. Una evidencia que apoyaría esta propuesta es el hallazgo de aminoácidos en un meteorito encontrado en 1969 en Australia (👁 fig. 1-9).

Más recientemente, en 1996, se encontró otra evidencia de que la vida podría haberse originado en otros planetas: en un meteorito proveniente de Marte hallado en la Antártida aparecieron posibles señales de organismos (👁 fig. 1-10). Sin embargo, muchos investigadores son escépticos respecto de estos hallazgos y sugieren que las estructuras observadas en el meteorito son producto de reacciones inorgánicas. Con esta controversial evidencia en mente, podemos preguntarnos: ¿cuáles son los límites de las condiciones ambientales compatibles con la existencia de vida? (📖 recuadro 1-2, *La vida en ambientes extremos*), ¿podría la vida haber surgido también en otro planeta? Y en ese caso, ¿tendría las características de la vida que conocemos? (véase cap. 49, *La hipótesis Gaia*). Muchos biólogos evolutivos señalan que si la vida se hubiera originado y evolucionado en otro planeta en forma independiente, los organismos extraterrestres no tendrían por qué compartir rasgos con los seres vivos terrestres. El fenómeno de la vida en otros escenarios podría haber sido el resultado de una combinación inimaginable de moléculas desconocidas y con propiedades completamente diferentes (📖 recuadro 1-3, *¿Por qué no el silicio?*).

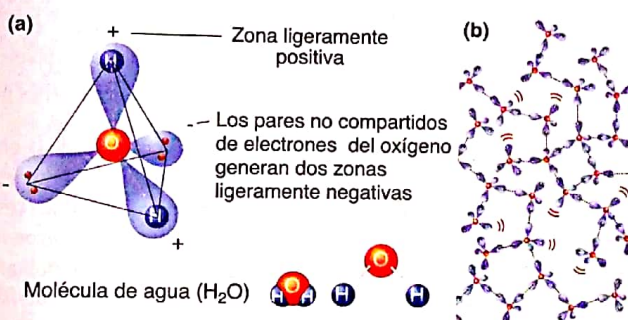


Recuadro 1-1

El agua y los puentes de hidrógeno

El agua, el líquido más abundante de la superficie terrestre, es el componente principal, en peso, de los seres vivos. Las propiedades del agua son consecuencia de su estructura molecular y son responsables de su papel protagonista en los sistemas vivos.

La molécula de agua está constituida por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno unidos por enlaces covalentes. Es una molécula *polar*, con dos zonas débilmente negativas y dos zonas débilmente positivas, lo cual provoca la formación de enlaces débiles entre sus moléculas. Estos enlaces, que unen un átomo de hidrógeno de carga positiva débil de una molécula con un átomo de oxígeno de carga negativa débil de otra molécula, son los *puentes de hidrógeno*.



Modelo de la molécula de agua. (a) Desde el núcleo de oxígeno de una molécula de agua se ramifican cuatro orbitales (véase Apéndice 1). Dos de los orbitales están formados por los electrones compartidos que enlazan los átomos de hidrógeno al átomo de oxígeno. Debido a la fuerte atracción que ejerce el núcleo del oxígeno hacia los electrones, los electrones que intervienen en los enlaces covalentes pasan más tiempo alrededor del núcleo de oxígeno que el que pasan alrededor de los núcleos de hidrógeno. En consecuencia, la región que se encuentra cerca de cada núcleo de hidrógeno es una zona débilmente positiva. Además, el átomo de oxígeno tiene cuatro electrones adicionales en su nivel energético exterior. Estos electrones, que no están implicados en el enlace covalente con el hidrógeno, están apareados en dos orbitales. Cada uno de estos orbitales es una zona débilmente negativa. Así, la molécula de agua, desde el punto de vista de la polaridad, tiene cuatro "vértices", dos "vértices" cargados positivamente y otros dos cargados negativamente. (b) Como resultado de estas zonas positivas y negativas, cada molécula de agua puede formar puentes de hidrógeno con otras cuatro moléculas de agua.

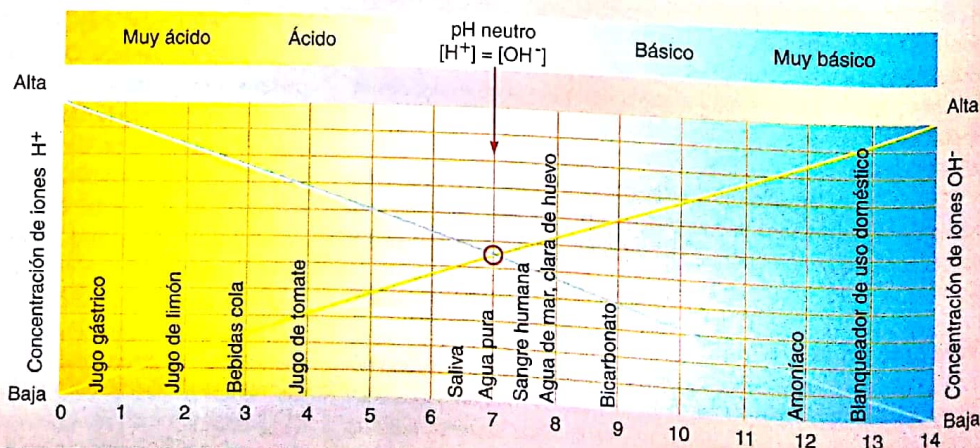
Los puentes de hidrógeno mantienen unidas a las moléculas de agua (cohesión) y, en consecuencia, el agua tiene una alta tensión superficial dada por la cohesión o la atracción mutua de las moléculas de agua y un alto calor específico (la cantidad de calor que una cantidad dada de sustancia requiere para un aumento dado de temperatura). También tiene un alto calor de vaporización (el calor requerido para que un líquido cambie a gas) y un alto calor de fusión (el calor requerido para que un sólido pase al estado líquido). Inmediatamente antes de congelarse, el agua se expande, por lo que el hielo tiene una densidad menor que el agua líquida y, como resultado, el hielo —sólido— flota en el agua líquida.

La polaridad de la molécula de agua es responsable de la adhesión del agua a otras sustancias polares, de aquí su tendencia al movimiento capilar (la combinación de la cohesión y la adhesión hace que el agua ascienda en vasos delgados). De modo similar, la polaridad del agua la hace un buen solvente para iones y moléculas polares. Las moléculas que se disuelven fácilmente en agua se conocen como *hidrófilas*. Las moléculas de agua, a raíz de su polaridad, excluyen activamente de la solución a las moléculas no polares. Las moléculas excluidas de la solución acuosa se conocen como *hidrófobas*.

El agua tiene una ligera tendencia a ionizarse, o sea, a separarse en iones H^+ (en realidad iones hidronio H_3O^+) y en iones OH^- . En el agua pura, el número de iones H^+ y el número de iones OH^- es igual a 10^{-7} mol* por litro. Una solución que contiene más iones H^+ que iones OH^- es ácida; una solución que contiene más iones OH^- que iones H^+ es básica. La escala de pH refleja la proporción de iones H^+ a iones OH^- . Una solución ácida tiene un pH inferior a 7; una solución básica tiene un pH superior a 7. Casi todas las reacciones químicas de los sistemas vivos tienen lugar en un estrecho intervalo de pH alrededor de la neutralidad. Los organismos mantienen este estrecho intervalo de pH por medio de *amortiguadores* o *buffer*s, combinaciones de formas de ácidos débiles o bases débiles, dadores y aceptores de H^+ .

* Un mol de una sustancia es la cantidad equivalente al peso molecular de dicha sustancia, expresado en gramos.

Escala de pH. La escala de pH proporciona una medida de la acidez de las soluciones. En esta escala, 7 representa un estado neutro en el que las concentraciones de H^+ y de OH^- son iguales. La línea amarilla indica los valores de concentración de H^+ correspondientes a los distintos valores de pH. La línea celeste indica los valores de concentración de OH^- correspondientes a los distintos valores de pH. En esta escala (logarítmica), una diferencia de una unidad de pH refleja una diferencia de 10 veces en la concentración de iones H^+ .



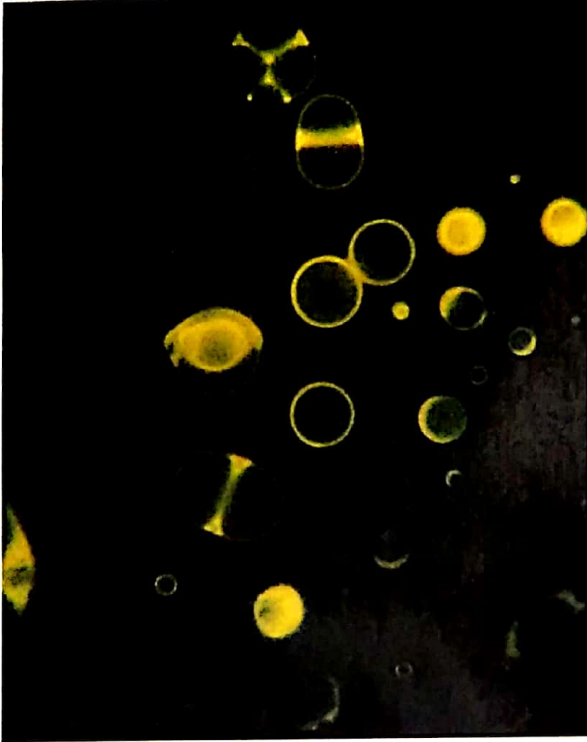


Fig. 1-9. AMINOÁCIDOS EN UN METEORITO. Estas estructuras limitadas por membranas, separadas de la solución exterior por una bicapa lipídica, se formaron espontáneamente a partir de las moléculas orgánicas extraídas del meteorito Murchison, que cayó en Australia en 1969. Se recogieron muestras del meteorito el día que llegó a la Tierra y se conservaron en condiciones que evitaran la contaminación con material terrestre.

La marcada unidad que subyace a la vida en la Tierra —es notable, el hecho de que todos los organismos compartamos el mismo mecanismo de transmisión genética basado en el DNA y el RNA— sugiere que toda la vida actual desciende de un ancestro único. Aunque es probable que durante la evolución temprana hayan existido otras formas de vida y que se hayan extinguido sin dejar rastros, actualmente no existen evidencias que sustenten esta idea.



Fig. 1-10. LA SUPERFICIE DE MARTE. En 1976, las dos sondas del proyecto Viking que fueron colocadas en dos puntos distantes de la superficie de Marte mostraron áridos desiertos de un tono rojo anaranjado, salpicados de piedras sueltas. Los resultados de los experimentos realizados por esas sondas no pudieron determinar que actualmente exista vida microbiana. Sin embargo, algunos científicos suponen que algunas formas simples de vida podrían haber existido durante un periodo anterior en que el clima marciano era húmedo y cálido y, a medida que ese clima cambió, se habrían extinguido.

Distintas estrategias energéticas: heterótrofos y autótrofos

Cuando aparecieron las primeras células, o estructuras semejantes a células, requirieron un aporte continuo de energía para mantenerse, crecer y reproducirse. El modo en que estas células obtuvieron la energía es en la actualidad objeto de una discusión vivaz.

Los organismos modernos y las células que los componen satisfacen sus requerimientos energéticos en una de dos formas. Algunos incorporan moléculas orgánicas del ambiente exterior, las que degradan

Recuadro 1-3

¿Por qué no el silicio?

El silicio (número atómico 14) es más abundante que el carbono (número atómico 6) (véase Apéndice 1). Como nos indica su número atómico, el silicio también requiere cuatro electrones para completar su nivel de energía exterior. ¿Por qué entonces se lo encuentra tan raramente en la mayoría de los sistemas vivos? Porque los átomos de silicio son más grandes que los átomos de carbono y la distancia entre dos átomos de silicio es mucho mayor que la distancia entre dos átomos de carbono. Así, los enlaces entre los átomos de carbono, que se mantienen más juntos, son casi dos veces más fuertes que los enlaces entre los átomos de silicio. Como resultado de ello, el carbono puede formar cadenas largas y estables y el silicio, no.

La capacidad del carbono para formar enlaces dobles también es crucial para su papel central en el mundo biológico. Un átomo de carbono pue-

de combinarse con dos átomos de oxígeno por medio de dos enlaces dobles; así, la molécula de dióxido de carbono formada flota en el aire como gas, libre e independiente. También se disuelve rápidamente en el agua y, por lo tanto, está disponible en ese medio para los sistemas vivos. En el dióxido de silicio, por oposición, el átomo de silicio forma enlaces simples con los dos átomos de oxígeno, dejando dos electrones sin aparear en el silicio y uno en cada oxígeno. En consecuencia, el átomo de silicio necesita ganar dos electrones para llenar su nivel de energía exterior y cada átomo de oxígeno necesita ganar un electrón. Así, los electrones no apareados rápidamente son compartidos con electrones no apareados de moléculas vecinas de SiO_2 , y forman cristales, presentes finalmente en granos de arena, rocas o, con intervención biológica, en las conchillas de los organismos microscópicos como las diatomeas.

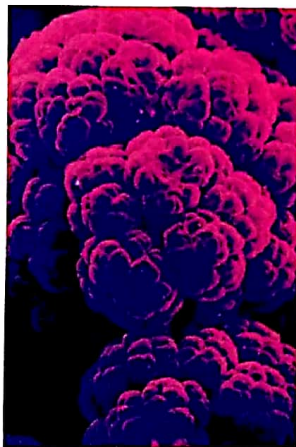


Fig. 1-11. BACTERIAS METANÓGENAS. Las bacterias metanógenas son quimiosintéticas. Producen metano y agua a partir del dióxido de carbono e hidrógeno. Sólo pueden vivir en ausencia de oxígeno, condición común en la Tierra joven, pero actualmente existente sólo en ambientes aislados, como el fango y el cieno del fondo de lagunas (véase cap. 24).

para obtener energía y componentes para su estructura. Estos organismos, que incluyen a todos los animales, a los hongos, y a muchos unicelulares, se denominan **heterótrofos** (del griego, *heter* "otro" y *trophos* "el que se alimenta"). Otros organismos son capaces de sintetizar moléculas orgánicas ricas en energía a partir de sustancias inorgánicas simples y, por lo tanto, no requieren moléculas orgánicas del exterior. Estos organismos se denominan **autótrofos** (del griego, *auto* "propio"). Entre los autótrofos, las plantas y varios tipos de protistas son fotosintéticos, es decir que utilizan la luz del Sol como fuente de energía para las reacciones de síntesis química. Por otra parte, ciertos grupos de bacterias llamadas quimiosintéticas obtienen la energía para sintetizar moléculas orgánicas de la energía liberada por reacciones inorgánicas.

Tanto los heterótrofos como los autótrofos están representados entre los microfósiles más antiguos. Muchos científicos sostienen que las primeras células vivas fueron heterótrofas. Según esta hipótesis, a medida que los heterótrofos primitivos aumentaron en número, comenzaron a disminuir las moléculas complejas que se habían acumulado durante millones de años, aumentando así la competencia. Entonces, las células que podían usar más eficientemente los recursos limitados fueron las que tuvieron mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse. En el curso del tiempo, habrían aparecido organismos autótrofos, capaces de sintetizar moléculas orgánicas a partir de materiales inorgánicos simples, lo cual habría representado una gran ventaja adaptativa que rápidamente se propagó.

Sin embargo, descubrimientos recientes sugieren que las primeras células podrían haber sido autotróficas, quimiosintéticas o fotosintéticas antes que heterótroficas. Muchas de las bacterias extremófilas que se han descubierto en los últimos años habrían sobrevivido cómodamente en las condiciones de la Tierra primitiva (☺ fig. 1-11). Es probable que sin los autótrofos, la evolución de la vida en la Tierra pronto habría llegado a un callejón sin salida, ya que por medio de procesos como la fotosíntesis, la energía capturada de fuentes como el Sol por los autótrofos fotosintéticos alcanza y sustenta a todas las otras formas de vida.

Dos tipos de células: procariontes y eucariontes

Como vimos en la Introducción, la **teoría celular** es uno de los fundamentos de la biología moderna. Esta teoría afirma que:

- todos los organismos vivos están compuestos por una o más células;
- las reacciones químicas de un organismo vivo, incluidos los procesos que liberan energía y las reacciones biosintéticas, ocurren dentro de las células;
- las células se originan de otras células;