

Biología

Unidad 1

La teoría celular, base de la Biología



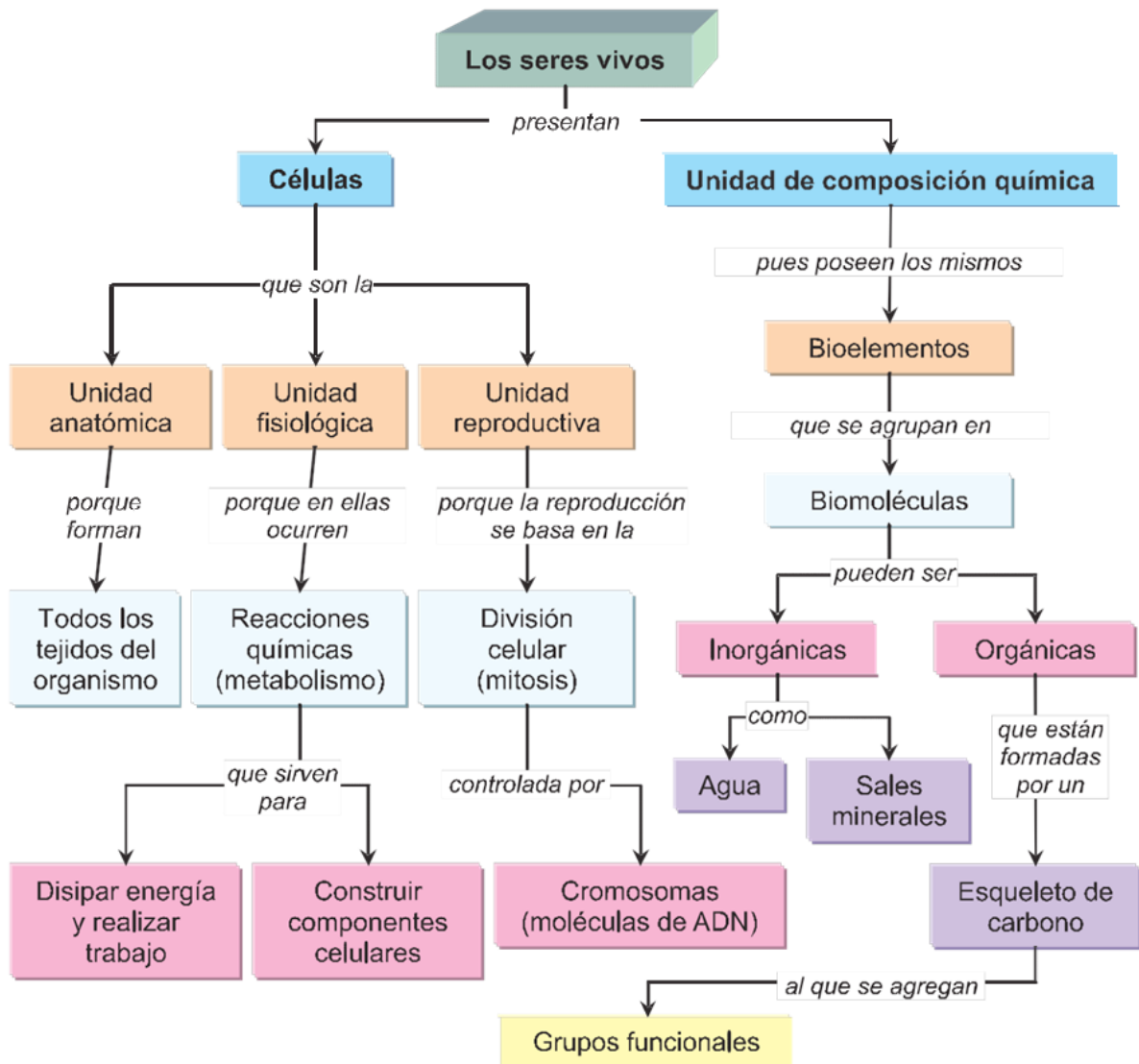
Ilustración 1.1. La Nebulosa del Cangrejo es una nube de gas en expansión, remanente de una explosión de supernova que ocurrió a 6500 años-luz de la Tierra. (Fuente: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>.)

La mayoría de los elementos químicos que forman los seres vivos se originaron hace 4600 millones de años, cuando una estrella masiva acabó sus días con un violento estallido conocido como supernova. Como decía el bioquímico catalán Joan Oró (1923-2004), “venimos de polvo de estrellas y en polvo de estrellas nos convertiremos”.

¿Cómo se organiza el fenómeno de la vida a partir de ese “polvo de estrellas”? Analizaremos en esta primera Unidad los principios de organización comunes a todo el universo biológico, sin perder de vista las notables variaciones que ha experimentado la manera en que se disponen las moléculas para formar células y organismos a lo largo de miles de millones de años de evolución.

Índice

1. La gestación de la teoría celular	1
1.1. El mecanicismo y los primeros microscopistas	1
1.2. Preformismo y epigénesis	2
1.3. La química orgánica	3
1.4. La teoría celular	5
1.5. El estudio de la célula a partir de 1945	9
Actividades	10
2. Física y química de los fenómenos biológicos	12
2.1. La física y los seres vivos	12
2.2. La química y los seres vivos	16
Actividades	27
3. Características esenciales de los seres vivos	29
3.1. El argumento del diseño y la evolución por selección natural	29
3.2. Criterios para definir la vida: las necesidades de la célula	32
3.3. Formas, dimensiones y tipos celulares	36
Actividades	38
Solucionario	40
Glosario	44
Bibliografía	45



Con el estudio de esta Unidad nos proponemos alcanzar los siguientes objetivos:

1. Reconocer las características esenciales del trabajo científico.
2. Explicar razonadamente por qué la célula es la unidad de vida.
3. Aplicar las leyes elementales de la física para explicar la organización de los seres vivos.
4. Definir y clasificar los bioelementos y las biomoléculas.
5. Relacionar la estructura de la molécula de agua con las propiedades que hacen de esta sustancia un componente esencial de los seres vivos.
6. Explicar las funciones de las sales minerales en estado sólido y en disolución, con especial énfasis en su acción como sistemas tampón, y citar ejemplos.
7. Argumentar por qué el carbono es idóneo como elemento básico de las biomoléculas.
8. Identificar las propiedades que distinguen a los seres vivos de los inertes.
9. Razonar por qué las células no pueden ser mucho mayores o menores de lo que son.
10. Diferenciar entre célula procariota y eucariota.

1. La gestación de la teoría celular

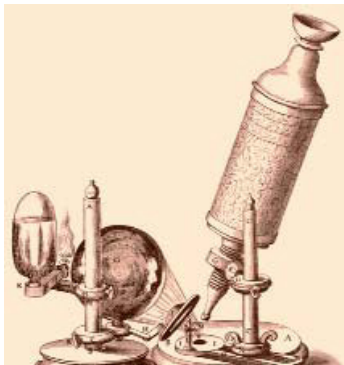


Ilustración 1.2. Microscopio construido por Hooke (derecha) y lámpara de aceite para su iluminación (izquierda), tal como figura en su obra *Micrographia* (1664). (Fuente: <http://eremita.di.uminho.pt/gutenberg/>)

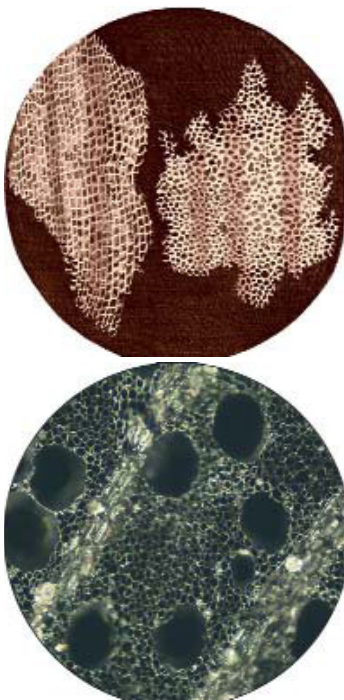


Ilustración 1.3. Arriba: dibujo de Hooke de una lámina de corcho observada al microscopio. Abajo: fotografía actual de una preparación microscópica de carbón vegetal, en la que se distinguen las mismas cavidades que en el corcho. Fuentes: <http://eremita.di.uminho.pt/gutenberg> y (<http://fr.wikipedia.org/wiki>)

¿De qué está hecho un ser vivo? ¿Cómo funciona? Durante muchos siglos solo se pudo ofrecer una respuesta vaga a estos interrogantes, que se limitaba a la búsqueda del ente espiritual o alma que supuestamente moraba en cada ser vivo, e incluso en todo objeto natural, controlando su existencia. Esta era la visión del mundo, próxima al filósofo griego Platón (427-347 a. C.), que prevalecía en la Europa renacentista del siglo XVI.

1.1. El mecanicismo y los primeros microscopistas

Hacia la segunda mitad del siglo XVII, esa corriente **animista** (del latín *anima*, “alma”) fue eclipsada por la filosofía **mecanicista**, impulsada por insignes franceses como René Descartes (1596-1650). Estos ilustrados prescindieron por completo de principios anímicos y redujeron todos los fenómenos del Universo a los movimientos de partículas gobernados por las impersonales leyes de la mecánica. Los organismos se concebían como máquinas autónomas similares a relojes; de ahí su énfasis en el estudio de la anatomía y la fisiología.

Pero, como ya advirtió el propio Descartes, hay una diferencia crucial entre un organismo y un reloj: las “piezas” de aquél a menudo resultan demasiado pequeñas para su análisis. Por ello, la invención del **microscopio**¹ generó grandes expectativas.

Entre los primeros en construir y emplear microscopios figura el polifacético inglés Robert Hooke (1635-1703), famoso por un *best seller* publicado en 1664, *Micrographia*, en el que describió sus observaciones. Allí figuran dibujos que muestran unos “poros microscópicos” que pudo apreciar en láminas delgadas de corcho; los denominó **células**, porque le recordaron a las celdas en las que se reclusión los monjes (*cellula* es el diminutivo de *cella*, palabra latina que significa “celda”).

La *Micrographia* de Hooke sirvió de inspiración al holandés Anton van Leeuwenhoek (1632-1723), quien construyó casi quinientos microscopios más simples que el de Hooke (véase el recuadro “¿Cómo funciona un microscopio óptico?”), pero con los que abrió las puertas a un universo fascinante incluido en nuestro propio organismo, formado por incontables *animáculos* —así los llamó— que pudo observar en muestras de sangre, sarro dental, semen, excrementos y aguas de todo tipo [véase la *ilustración 1.4*].

¹ Al observar objetos a través del microscopio resulta práctico el empleo de unidades de medida como el micrómetro (abreviadamente, 1 μm), que es la millonésima parte de un metro (10^{-6} m). Se usa también el nanómetro (1 nm), esto es, la milésima parte del micrómetro, o una milmillonésima de metro (10^{-9} m). A veces se emplea otra unidad, el ángstrom (Å), igual a 10^{-10} m , pero está cayendo en desuso.

Leeuwenhoek realizó asimismo investigaciones en el campo de la circulación sanguínea. Otros contemporáneos estudiaron también diversas estructuras anatómicas y propusieron modelos mecanicistas para las funciones fisiológicas, basados en los principios de la palanca o de la dinámica de fluidos. Pero hubieron de enfrentarse al espinoso problema de la generación de los seres vivos: si el organismo era como una máquina, ¿cómo podía hacer copias de sí mismo, cuando ninguna máquina concebible era capaz de semejante proeza?

¿Cómo funciona un microscopio óptico?

Los primeros microscopios fueron **ópticos**, esto es, ampliaban por medio de lentes la luz que atravesaba una fina preparación del material a observar.

Leeuwenhoek utilizaba un **microscopio simple**, con una única lente. En cambio, el microscopio de Hooke era, como todos los que se utilizan hoy en día, un **microscopio compuesto**. Aquí nos encontramos con, al menos, dos lentes en serie: el **objetivo**, cercano a la preparación a observar, y el **ocular**, próximo al ojo. La luz que atraviesa la preparación alcanza el objetivo, que produce una imagen ampliada, y luego el ocular, donde vuelve a experimentar una ampliación; el **aumento** final es igual al producto de ambos aumentos (por ejemplo, con un objetivo de 40 aumentos y un ocular de 8, un objeto se verá $40 \times 8 = 320$ veces más grande que su tamaño real). Un microscopio suele disponer de varios objetivos con diferentes aumentos, intercambiables mediante un **revólver** giratorio.

El aumento de un microscopio se puede incrementar casi sin límite, cosa que no ocurre con otro parámetro importante: el **poder de resolución**, esto es, la capacidad para mostrar separadamente dos puntos que están muy próximos. Para una lente determinada, el poder de resolución es directamente proporcional a la **longitud de onda** de la luz empleada; con la luz visible el máximo poder de resolución de un microscopio óptico es de unos $0,2 \mu\text{m}$, incluso con las mejores lentes imaginables (en comparación, el poder de resolución del ojo humano es de $100 \mu\text{m}$).



Ilustración 1.5. *Microscopio óptico compuesto, modelo Leitz-Wetzlar de 1913. (Fuente: <http://phil.cdc.gov/phil>)*

1.2. Preformismo y epigénesis

Una salida al dilema, sugerida por el propio Leeuwenhoek, era suponer que en realidad no se producía copia alguna, sino que el nuevo organismo estaba ya de algún modo preformado en los espermatozoides o en los óvulos, y que su desarrollo era solo un proceso de engorde [véase la ilustración 1.6]. Pero, entonces, ¿cómo podría alguien heredar rasgos de su padre y de su madre si, antes de que se conocieran, ya existía en uno solo de ellos?

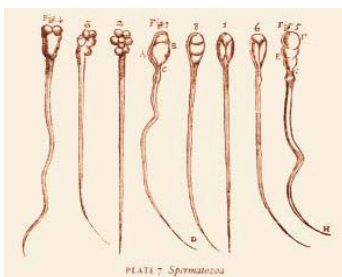


Ilustración 1.4. *Animáculos” (espermatozoides) en el semen de perro y de conejo, según Leeuwenhoek. (Fuente: <http://scientia.bitacorras.com>)*

La alternativa al **preformismo** era la **epigénesis**: la idea de que, en la reproducción, se desarrolla un organismo nuevo partiendo de materia desorganizada. Esta teoría fue desarrollada, entre otros, por el naturalista francés Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1788). Para Buffon, cada ser vivo estaría compuesto por unas unidades elementales a las que llamó **moléculas orgánicas**, que se disgregarían tras su muerte y que otros

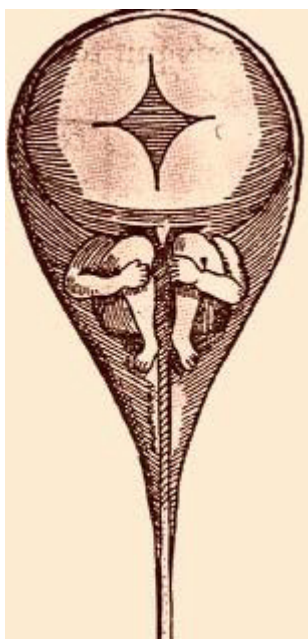


Ilustración 1.6. Dibujo de un espermatozoide humano realizado por el holandés Nicolaas Hartsoeker (1656-1725), afín a Leeuwenhoek. El dibujo no representa lo que vio, sino lo que suponía que había en el interior del espermatozoide: un “homúnculo”, o individuo preformado. (Fuente: <http://en.wikipedia.org/>)

seres podrían incorporar, mediante la **nutrición**, para posibilitar el desarrollo de sus órganos; las moléculas sobrantes de cada órgano se acumularían en los “líquidos seminales” producidos tanto por el macho como por la hembra, que, al mezclarse en la reproducción, transmitirían a la descendencia una “imagen” de los órganos de los padres.

1.3. La química orgánica

A finales del siglo XVIII se había iniciado la búsqueda de esas moléculas orgánicas en los seres vivos, en sus excrecencias o en los productos de su descomposición. Se había aislado, por ejemplo, el “azúcar de uva” o **glucosa**, el **glicerol** o “principio dulce de los aceites”, el **ácido láctico** de la leche... Todos ellos tenían algo en común: siempre contenían **carbono** (de símbolo C) e **hidrógeno** (H), y casi siempre **oxígeno** (O).

El químico francés Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) observó que los pulmones de los animales expelían durante la **respiración** dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O), formados precisamente por esos tres elementos. Comparó entonces la respiración con una **combustión**, ya que ambos procesos consumen oxígeno (O_2) y emiten calor; éste último se distribuiría a todo el animal por la **circulación** sanguínea y la **transpiración** se encargaría de regularlo, mientras que el “combustible” de la respiración se repondría mediante la **nutrición**. Así, Lavoisier no describiría a un organismo como un reloj, sino como una máquina de vapor, con una fuente calorífica a la que hay que suministrar combustible y un sistema de refrigeración.

Pero este **mecanicismo** de nuevo cuño era incapaz de dar cuenta del extraño comportamiento de las moléculas orgánicas cuando se calentaban. El azúcar, por ejemplo, se caramelizaba, y permanecía así tras enfriarse; el aceite se vaporizaba, pero no se condensaba al enfriarse. En cambio, las sustancias inorgánicas podían ser alteradas cuando se las calentaba —la sal se volvía incandescente, el agua se vaporizaba—, pero al enfriarse recobraban su estado original.

Las moléculas orgánicas mostraban otras propiedades desconcertantes. Por ejemplo, el etanol y el éter dimetílico contienen los mismos átomos (2 de carbono, 6 de hidrógeno y 1 de oxígeno), pero uno es líquido a la temperatura ambiente, mientras que el otro es un gas. Por ello, el químico sueco Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) concluyó que la química de la vida —la **química orgánica**— obedecía a sus propias reglas y que solo el tejido vivo podría crear moléculas orgánicas, combinando átomos merced a una desconocida **fuerza vital** que no se podía reducir a las leyes de la química, ni se localizaba en ningún órgano; dependía, pues, del ser en su conjunto, esto es, de la organización misma de los seres vivos. Se trata de la vieja doctrina del **vitalismo**.

El método científico

Como ya estudiamos en 1º de Bachillerato, toda ciencia se sustenta en la aplicación del llamado **método científico**, que consiste en una serie de etapas que, por si solas, son acciones corrientes, pero que en conjunto constituyen el instrumento más valioso para conocer la naturaleza.

Las **fases** del método científico, definidas por el filósofo inglés sir Francis Bacon (1561-1626) en su obra *Novum Organum* o Indicaciones relativas a la interpretación de la naturaleza (1620), son:

- 1. Observación del fenómeno**, que consiste en prestar atención a un objeto o a un fenómeno, para estudiarlo tal como se presenta en realidad.
- 2. Planteamiento de preguntas acerca del fenómeno:** a partir de determinadas observaciones o experiencias particulares, se extrae el principio particular de cada una de ellas.
- 3. Formulación de hipótesis explicativas.** Consiste en imaginarse alguna explicación que satisfaga la pregunta planteada. Una hipótesis ha de estar acorde con los hechos conocidos, ha de ser capaz de predecir observaciones aun no realizadas y, ante todo, ha de ser susceptible de comprobación.
- 4. Experimentación.** Consiste en comprobar mediante experimentos si una hipótesis es cierta o es errónea. En este último caso, hay que modificar la hipótesis o formular otra nueva.
- 5. Enunciación y difusión de la teoría**, es decir, de un modelo explicativo que permita interpretar la realidad —o una parcela de ella— con el menor número posible de hipótesis, tras haber demostrado experimentalmente la validez de todas ellas.

El método científico está sustentado por dos pilares fundamentales:

- La reproductibilidad, es decir, la capacidad de repetir un determinado experimento por cualquier persona; para ello es esencial la fase 5, basada en la comunicación y difusión de los resultados obtenidos.
- La falsabilidad o lo que es lo mismo, que toda proposición científica tiene que ser susceptible de ser falsada (falsacionismo), lo que implica que se pueden diseñar experimentos que en el caso de dar resultados distintos a los predichos negarían la hipótesis puesta a prueba.

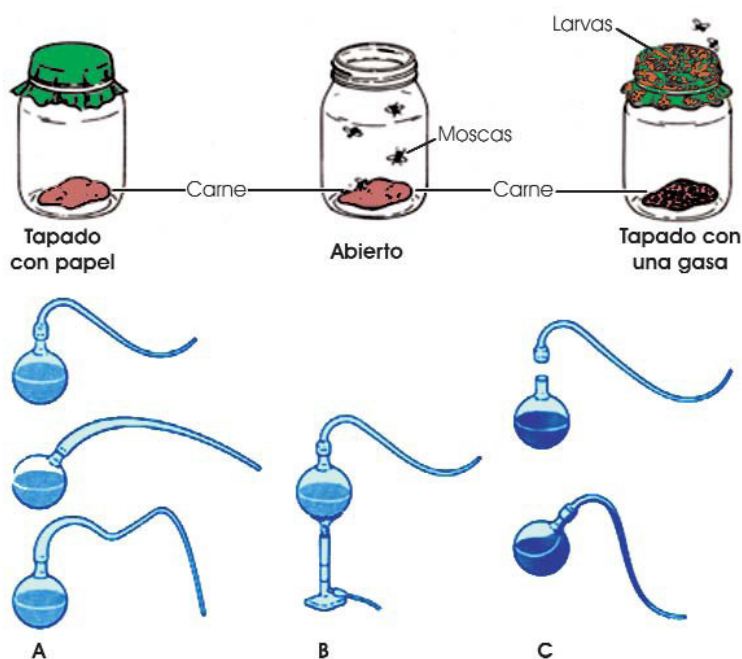


Ilustración 1.7. Arriba: *Experimento de Redi.* La presencia de larvas de moscas está relacionada con la posibilidad que tenían las moscas de llegar a la carne (y a los pescados) y poner sus huevos. Con este experimento se descartó la generación espontánea en organismos complejos.

Abajo: *Experimento de Pasteur.* En A se introduce el caldo nutritivo en un recipiente y se dobla el cuello del matraz. En B se hierve el contenido del recipiente. En C se elimina el cuello del recipiente o se inclina todo el objeto lo que permite el paso de microorganismos y su posterior proliferación. Con este experimento se descartó la generación espontánea de microorganismos. (Fuente: <http://www.csulb.edu/~jmastrop/data6.html>).

Un ejemplo de aplicación del método científico lo ofrecen los experimentos de Redi y Pasteur [véase *la ilustración 1.7*], que permitieron desterrar definitivamente la idea de la **generación espontánea**, según la cual los seres vivos provenían directamente de la materia inerte sin sufrir ningún tipo de proceso previo, y que se mantuvo en vigor durante siglos.

1.4. La teoría celular

La exigencia de prestar atención a la totalidad del ser vivo no era incompatible con la búsqueda de su composición elemental. Pero esas unidades animales o vegetales ya no podían ser moléculas autónomas que se asociaban, como sostenía Buffon, de modo que las propiedades del organismo representaban la simple suma de las propiedades de cada molécula constituyente; sino de seres vivos capaces de nutrirse y reproducirse, cuya individualidad desaparecía al coordinarse entre sí en una unidad de orden superior: el organismo.

A menudo se afirma que esos seres elementales se habían encontrado ya en el siglo XVII. Pero los descubrimientos de Hooke o Leeuwenhoek tuvieron un impacto más bien escaso. A ello contribuyó sin duda el estilo artesanal de las lentes entonces utilizadas, que originaban deformaciones de las imágenes (**aberraciones**) debidas a que la luz, al atravesarlas, se enfocaba en varios puntos. No obstante, hay una razón más profunda: no se llevó a cabo una *interpretación* de esos descubrimientos, es decir, no se supieron extraer conclusiones generales que desembocaran en una **teoría** científica [véase el recuadro “*El método científico*”].

Solo cuando, ya en el siglo XIX, se buscó el denominador común a todos los seres vivos, cuando se contempló a los más pequeños como las unidades que se integraban para originar a los mayores, cobró sentido la existencia de *células* o de *animálculos*.

Al mismo tiempo se desarrollaron **lentes acromáticas** que corregían las aberraciones ópticas, lo que incrementó extraordinariamente el poder de resolución de los microscopios. Comenzaron a distinguirse células como las que observó Hooke en toda suerte de tejidos vegetales. Pero ya no se trataba de cáscaras vacías, sino dotadas de un contenido gelatinoso, más o menos diferenciado en zonas de variada textura.

En 1831, el botánico escocés Robert Brown (1773-1858) pudo distinguir en las células de muchos tejidos vegetales un grumito oscuro al que llamó **núcleo** por tener la apariencia de una nuez (*nux* en latín), y en 1838 el botánico alemán Matthias Jacob Schleiden (1804-1881) trató de explicar su papel. Según Schleiden, los núcleos celulares se formarían libremente como diminutos coágulos del líquido interno de las células; cuando los pequeños “nucleíto” hubiesen alcanzado un tamaño adecuado, en la superficie de cada uno de ellos aparecería una vesícula transparente que poco a poco iría adquiriendo consistencia, hasta transformarse en una nueva célula.

¿Cómo se prepara una muestra para su observación al microscopio?

Habitualmente las células de los tejidos son transparentes, por lo que, para observarlas al microscopio, suele ser necesario sumergirlas en soluciones colorantes (tinciones) que aumenten su contraste.

En la segunda mitad del siglo XIX se invirtió mucho esfuerzo en desarrollar todo tipo de colorantes, algunos de los cuales, como el **azul de metileno**, son capaces de teñir las células sin matarlas (colorantes **vitales**). Pero si se prefieren preparaciones más duraderas, es necesario previamente **fijar** la muestra (tratarla con un conservante que impida la alteración de sus componentes), **incluirla** en parafina con el fin de obtener un bloque sólido que permita **cortarla** con el micrótopo (instrumento capaz de efectuar cortes de entre 3 y 5 μm de grosor, que permiten el paso de la luz), **teñirla** y, finalmente, **montarla** sobre un portaobjetos de vidrio protegida con un cubreobjetos fino y transparente.

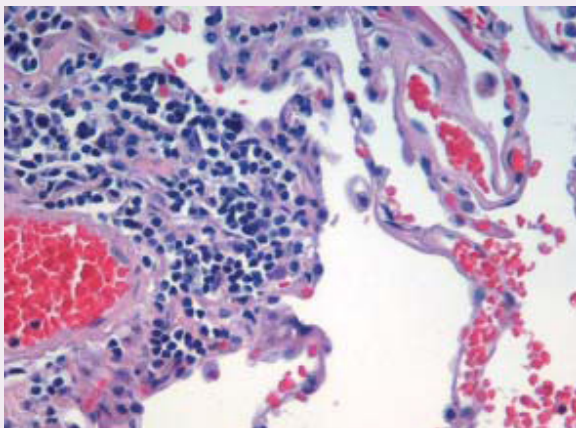


Ilustración 1.8. Muestra de tejido pulmonar de un paciente con enfisema, teñida con hematoxilina y eosina. Los núcleos celulares aparecen en azul oscuro, los eritrocitos en rojo y los demás componentes celulares, así como el material extracelular, en rosa. (Fuente: <http://medicine.plosjournals.org>).

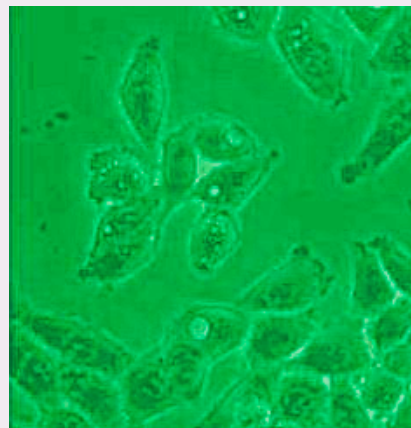


Ilustración 1.9. Fotografía de células HeLa (derivadas del tumor cervical de una paciente, Henrietta Lacks, fallecida en 1951) observadas con luz verde en un microscopio de contraste de fase. (Fuente: <http://commons.wikimedia.org/wiki>).

Existen muchos tipos de colorantes que se unen a estructuras específicas de las células o tejidos y suelen ser útiles para diferenciar sus partes. Por ejemplo, la hematoxilina se une fuertemente al núcleo celular, la eosina a los glóbulos rojos de la sangre y el Sudán III a muchos lípidos. Algunos microscopios, como los de contraste de fase o los de campo oscuro, permiten la observación de muestras sin necesidad de teñirlas.

El fisiólogo alemán Theodor Ambrose Hubert Schwann (1810-1882), tras conocer el trabajo de Schleiden, recordó haber observado las mismas estructuras en tejidos animales. En la **notocorda** del renacuajo se veían celdillas poliédricas muy parecidas a las de los vegetales, y dotadas asimismo de núcleo. ¿Acaso también los tejidos animales estaban formados por células? La verdad era que en la mayoría de los tejidos animales no se observaban celdillas, pero sí núcleos, y Schwann conjeturó que allí donde había núcleos tenía que haber células.

Schwann publicó su trabajo en 1838, el mismo año que Schleiden; pero no limitó sus conclusiones a uno de los reinos

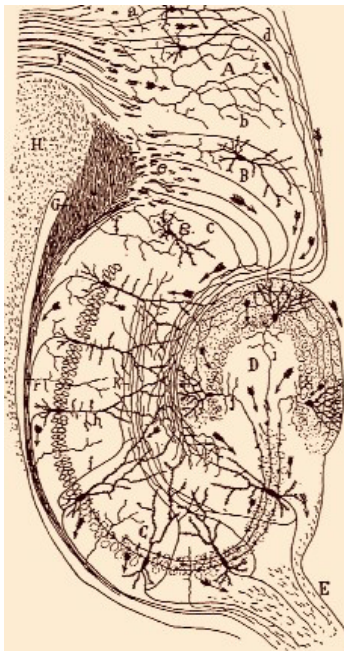


Ilustración 1.10. Dibujo de las neuronas del hipocampo de un roedor, realizado por Ramón y Cajal para su libro *Textura del sistema nervioso del hombre y los vertebrados* (1899). (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/>).

vivientes, sino que las generalizó a animales y plantas para formular la que denominó **teoría celular**:

A. La célula como unidad anatómica de los seres vivos

Schwann aseveraba que *todos los tejidos, tanto animales como vegetales, por más diferentes que fuesen, estaban formados por células*. Era la primera vez que alguien unificaba los reinos animal y vegetal en una descripción común. Incluso se llegó a establecer la naturaleza celular de muchos seres microscópicos. Sin embargo, parecía haber una excepción a la regla: el **tejido nervioso**. Según los partidarios de la llamada **teoría reticular**, no podían distinguirse en él células individuales, sino una red de fibras sin solución de continuidad, con múltiples núcleos.

Entre los proponentes de esta teoría se hallaba el italiano Camillo Golgi (1843-1926), quien informó en 1873 de un método para teñir el tejido nervioso basado en reactivos de plata utilizados en fotografía. Por razones desconocidas solo se teñían un 5 por ciento de las células, con lo que el campo visual resultaba más despejado de lo que podía verse utilizando otros métodos. El médico español Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) perfeccionó el método y pudo detectar células individuales, o **neuronas**, en contacto unas con otras (dejando en medio una hendidura o **sinapsis**), postulando así la llamada **doctrina neuronal** y generalizando definitivamente la teoría celular.

B. La célula como unidad fisiológica de los seres vivos

La teoría celular no se limitó a certificar la presencia de células en todos los tejidos. Su verdadero mérito reside en que hizo de la célula el centro de la actividad del ser vivo, de manera que, por ejemplo, la **respiración** dejaría pronto de verse como algo que ocurría en los pulmones, como pensaba Lavoisier, y pasaría a interpretarse como un proceso químico propio de toda célula. Así, fenómenos como la nutrición y el crecimiento dejaron de atribuirse a la totalidad del organismo para imputarse a cada parte—es decir, a cada célula—, dotada de cierta independencia.

En definitiva, es en la célula donde se dan las actividades propias de lo viviente; no porque esté bendecida con una misteriosa fuerza vital, sino porque las moléculas que la integran promueven reacciones químicas (es lo que Schwann llamó **fenómenos metabólicos**) o combinaciones de dichas moléculas que concurren en la producción de células nuevas (**fenómenos plásticos**).

C. La célula como unidad reproductiva de los seres vivos

Es precisamente al abordar la reproducción de los organismos cuando la teoría celular alcanza su plena importancia, ya que confiere a este proceso un significado y un mecanismo. Y es también aquí donde más erradas fueron las apreciaciones de sus promotores, Schleiden y Schwann. Ya se han comentado las

ideas al respecto del primero de ellos. Schwann, además de la formación de células jóvenes en el interior de una “célula madre”, como sugería su colega para los vegetales, abogaba por un origen exterior de las células animales, mediante cristalización a partir de un líquido o sustancia amorfa: primero se formaría el núcleo y, alrededor de él, el resto de la célula.

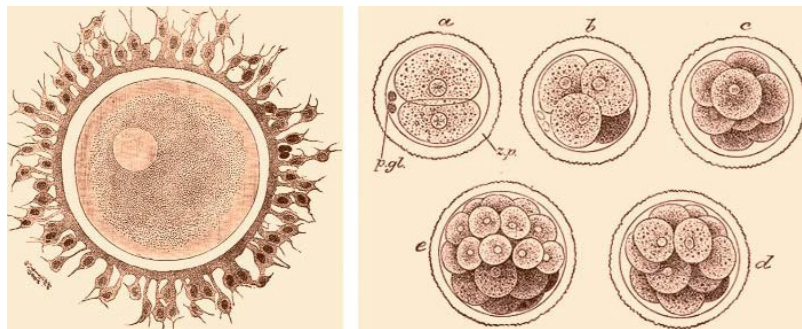


Ilustración 1.11. Izquierda: Óvulo humano rodeado por el líquido y las células del folículo. Derecha: Primeras etapas en la segmentación de un cigoto de mamífero. Ambas imágenes son litografías para la edición de 1918 de la Henry Gray's Anatomy of the Human Body. (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki>).

Pero, en 1852, el médico alemán Rudolf Ludwig Karl Virchow (1821-1902) observó que en las lesiones incipientes del pulmón de los fallecidos por tuberculosis se localizaban apretados paquetes de núcleos, y que solo cuando habían crecido un poco aparecía el líquido que llenaba los alvéolos. Virchow concluyó que la sustancia intercelular que bañaba muchos tejidos era un producto de la actividad de las células, y no el caldo de cultivo en el que éstas se originaban. ¿De dónde procedían entonces las células? La respuesta parecía obvia: de otras células que ya existían con anterioridad (*omnis cellula e cellula*, es decir, “toda célula procede de otra célula”).

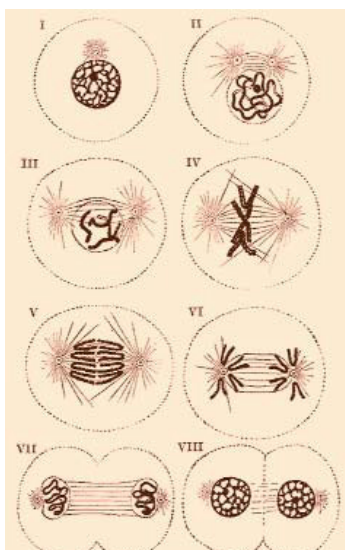


Ilustración 1.12. Cambios en el núcleo de una célula durante su división, según la Henry Gray's Anatomy of the Human Body. (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki>).

En la misma línea, el embriólogo alemán Karl Ernst von Baer (1792-1896) había descubierto que, tras la fecundación del óvulo de la hembra por un espermatozoide, no se observaba el crecimiento de un individuo preformado, sino la división del **cigoto** (el óvulo fecundado) en dos células, seguidamente en cuatro, ocho..., **diferenciándose** y reordenándose simultáneamente para formar los órganos del animal [véase la ilustración 1.11]. El crecimiento quedaba reducido así a una secuencia de reproducciones celulares.

En cuanto a la propia reproducción celular, von Baer descubrió en 1846 que estaba asociada a la división del núcleo. En 1871 se descubrieron unos filamentos alargados, a los que se denominaron **cromosomas**, que se dividían longitudinalmente; cada una de las dos mitades migraba a polos opuestos de la célula para formar dos núcleos hijos [véase la ilustración 1.12]. Así, en 1875, el botánico alemán Edward Adolf Strasburger (1844-1912) estableció la universalidad del proceso (llamado **mitosis**) como mecanismo de reproducción celular, y en 1882 el anato-



Ilustración 1.13. *Microscopio electrónico de transmisión.*
(Fuente:<http://en.wikipedia.org/wiki>).

mista alemán Walther Flemming (1843-1905), parafraseando a Virchow, proclamó: *omnis nucleus e nucleo* (“todo núcleo procede de otro núcleo”).

1.5. El estudio de la célula a partir de 1945

En 1931, el físico alemán Ernst August Friedrich Ruska (1906-1988) tuvo la idea de utilizar haces de electrones, en lugar de luz visible, para “iluminar” preparaciones microscópicas. Los electrones, según la **mecánica cuántica**, se comportan no solo como partículas, sino también como ondas; si se les acelera con altas energías pueden tener longitudes de onda muy pequeñas (por ejemplo, 0,04 nm, frente a los 380 nm de la luz violeta), permitiendo así un poder de resolución de hasta 0,2 nm (recordemos que la resolución máxima de un microscopio óptico es de unos 200 nm).

En el **microscopio electrónico de transmisión** (MET), el inventado por Ruska [véase la ilustración 1.13], el haz de electrones, emitido desde la parte superior y enfocado mediante unas bobinas magnéticas, atraviesa la muestra y se proyecta sobre una pantalla fluorescente o una placa fotográfica.

En cambio, en el **microscopio electrónico de barrido** (MEB) los electrones no atraviesan la muestra, sino que se reflejan en ella (gracias a una fina capa de oro que la recubre) y proyectan una imagen sobre un monitor de televisión; aunque su poder de resolución es de “solo” 10 nm, resulta útil para proporcionar imágenes tridimensionales.

El escaso poder de penetración del haz de electrones requiere que las muestras sean muy finas (de menos de 50 nm para el MET) y que en el interior del equipo haya un intenso vacío (incompatible con la presencia de agua en la muestra, que, por lo tanto, no puede estar viva). Estas dificultades restringieron el uso del microscopio electrónico durante mucho tiempo, aunque hacia 1960 se habían ya explorado la mayor parte de las estructuras de la célula. Paralelamente se desarrollaron diversas técnicas bioquímicas que permitieron analizar sus componentes:

La **cromatografía** data de 1901, pero no se empleó con asiduidad hasta la década de 1940. Permite separar mezclas de sustancias en disolución que se mueven a distinta velocidad en una fase sólida, como el papel. Una variante de esta técnica es la **electroforesis**, en la que los componentes se separan por su distinta movilidad en un campo eléctrico [véase la ilustración 1.14].

El **marcado isotópico** conlleva sustituir uno o más átomos de una molécula por **isótopos** con distinta masa molecular, lo que permite detectarlos con un instrumento conocido como **espectrógrafo de masas** (o, si el isótopo es radiactivo, mediante **autorradiografía**, como se explica en la ilustración 1.14). Se puede así “seguir la pista” de proteínas y otras moléculas a través de

la célula. La técnica se asentó cuando el desarrollo de reactores nucleares tras la Segunda Guerra Mundial permitió disponer de isótopos en abundancia.

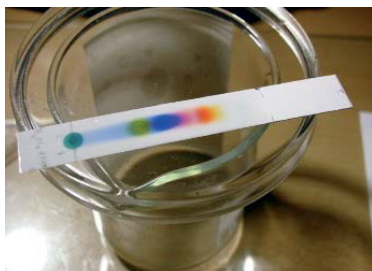
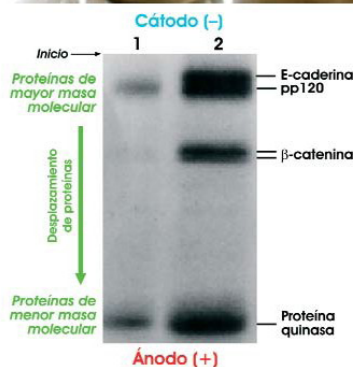


Ilustración 1.14.

Arriba: cromatografía de tinta china usando etanol diluido como disolvente.



Abajo: separación de dos mezclas de proteínas por electroforesis en gel de poliacrilamida. Las mezclas se depositan al comienzo de dos “calles” del gel (puntos 1 y 2) y se aplica un campo eléctrico; como todas las proteínas se han unido a un detergente tienen carga negativa, por lo que se desplazan hacia el electrodo positivo (en la parte inferior) con una velocidad proporcional a su masa molecular. Para visualizar las proteínas se las “etiqueta” con un isótopo radiactivo, de manera que al exponer el gel a una placa fotográfica se impresionan sobre ésta bandas oscuras que señalan la posición de cada proteína (autorradiografía).

(Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki>).

Actividades

1. Aunque el término célula propuesto por Hooke tuvo buena acogida, ya no se utiliza para designar a las cavidades del corcho. Apelando a tus conocimientos del curso anterior (en especial los referentes a tejidos vegetales), ¿qué representan las paredes de los huecos observados por Hooke? ¿Y qué tienen que ver con lo que hoy llamamos célula?
2. Decidido a explorar la estructura de una bacteria de 0,8 μm de diámetro, un aficionado a la microscopía óptica adquirió un equipo con un objetivo de 97 aumentos y un ocular de 30. ¿Logrará su propósito? ¿Qué tamaño aparente tendrá la bacteria?
3. ¿Cuál será el aumento total producido por un microscopio electrónico en el que los sistemas equivalentes al objetivo y ocular producen 100 x y 200 x, respectivamente?
4. Uno de los problemas del microscopio electrónico es el escaso poder de penetración de los electrones: las muestras han de ser muy delgadas (menos de 0,5 μm), y por eso las células se cortan en capas de 30 a 50 nanómetros con ultramicrotomos de gran precisión. ¿En cuántas capas, aproximadamente, habría que cortar una bacteria de 1 μm de diámetro?
5. Observa las siguientes fotografías y deduce con qué tipo de microscopio se ha obtenido cada una de ellas. (**A** corresponde a bacterias Escherichia coli; **B** es una ameba, un protozoo; en **C** se observa un orgánulo celular llamado mitocondria).



6. ¿Qué queda hoy en día de las teorías de la preformación y la epigénesis? ¿Cómo explicamos actualmente que un individuo herede los rasgos de sus padres?
7. En 1868 se supo que una molécula de glucosa contiene 6 átomos de carbono, 6 de oxígeno y 12 de hidrógeno. Escribe la ecuación ajustada de su combustión.
8. Señala algunos de los defectos que presentaba la teoría de la respiración de Lavoisier.
9. Razona qué tipo de microscopio convendría utilizar para estudiar un grano de polen de maíz (*Zea mays*), cuyo tamaño es de alrededor de 80 μm .

10. En la figura adjunta se muestra un gel en el que se ha realizado la electroforesis de la hemoglobina presente en la sangre de tres personas. ¿A qué conclusiones permite llegar esta experiencia?



11. Suministramos a una rata, por vía intravenosa, suero que contiene como único nutriente glucosa en la que se ha sustituido un átomo de carbono por el isótopo radiactivo ^{14}C . ¿Qué producto de desecho de la rata estará marcado radiactivamente? ¿Por qué? (Indicación: relaciónalo con la "combustión" de la glucosa).



RECUERDA

La teoría celular de Schleiden, Schwann y Virchow puede resumirse en tres postulados:

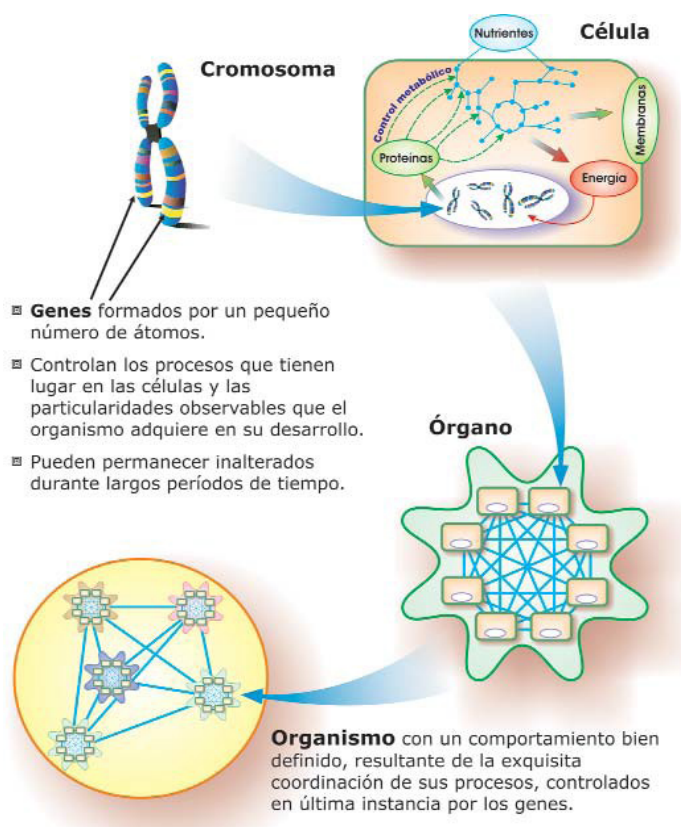
- Todos los tejidos animales y vegetales se desarrollan a partir de una o más células que se reproducen, crecen y cambian, especializándose en determinadas funciones.
- La célula es la unidad anatómica y funcional de los seres vivos.
- En las células tienen lugar una serie de reacciones químicas (cuyo conjunto constituye el **metabolismo**) que determinan todas las actividades del organismo.
- Inicialmente, la teoría aceptaba que las células jóvenes se originan en el interior de otras células o a partir de un líquido sin estructura. Más adelante se descubrió que el núcleo de la célula se forma por división de un núcleo preexistente en dos o más núcleos hijos (**mitosis**).
- El núcleo controla el funcionamiento y desarrollo de la célula y, al dividirse, transmite esta capacidad de control a la siguiente generación celular.

2. Física y química de los fenómenos biológicos

La teoría celular gozó en general de una favorable acogida, aunque muchos pensaban que la célula era demasiado complicada como para considerarla la auténtica “unidad de vida”. Las células podían considerarse como los ladrillos de los seres vivos, pero empezó a cobrar un creciente interés averiguar de qué estaban hechos.

En 1895 se identificó una fina envoltura que rodeaba a todas las células, la **membrana plasmática**, formada por sustancias similares a los aceites vegetales; al resto de la célula, exceptuando el núcleo, se aplicó el término citoplasma (del griego *kytos*, “recipiente”, y *plássos*, “dar forma”). Su estructura presentaba fuertes heterogeneidades descritas, según la ocasión, como gránulos, fibras o alvéolos; pero hasta después de la Segunda Guerra Mundial no hubo manera de averiguar si se trataba de objetos reales o de artefactos atribuibles a la tinción.

2.1. La física y los seres vivos



Poco a poco se fue poniendo de manifiesto que la célula no era un grumito informe de protoplasma, sino un intrincado sistema de cámaras y laberintos, escenario de innumerables acontecimientos moleculares. Lo más llamativo era el elevado orden que exhibía tanto su estructura como su funcionamiento, comparable al de una ciudad. ¿Qué mecanismos eran responsables de esa organización exquisita? ¿Y cómo una sola célula —el cigoto—, ya bastante ordenada de por sí, podía producir un organismo aún mucho más ordenado y complejo?

En 1944, el austriaco Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), uno de los fundadores de la mecánica cuántica, intentó contestar a esas preguntas con la sola ayuda de las leyes de la física. Concibió dos maneras de generar orden en los seres vivos, a las que llamó *orden a partir del orden* y *orden a partir del desorden*.

Ilustración 1.15. *Orden a partir del orden: pequeños grupos de átomos, perfectamente ordenados (genes), contribuyen a que los acontecimientos que tienen lugar en un ser vivo transcurran, asimismo, con un elevado grado de orden. (Fuente: ASH)*

ÁTOMOS

Modelo de un **átomo**. Los **electrones** ocupan niveles de energía específicos o **capas**; cada capa admite un número de electrones máximo (dos en la capa 1, ocho en las capas 2 y 3).

Núcleo (protones y neutrones)

Nivel o capa 1

Nivel o capa 2 (total 8 electrones)

Modelo más correcto de un **átomo**, en el que los electrones de cada capa o nivel energético se representan como "nubes" de carga eléctrica negativa. Cada "nube" u **orbital** admite un máximo de 2 electrones; los puntos de la "nube" representan las sucesivas posiciones del electrón (o del par de electrones) que contiene, como si hubiéramos tomado un millón de fotografías de ellos y las superpusiéramos. Cuanto más puntos haya en una zona, mayor será la **densidad de carga** en esa zona.

ELECTRONES DE VALENCIA

Las propiedades químicas de un átomo dependen principalmente del número de electrones en su capa más externa, llamada **capa de valencia**. Un átomo es más estable si su capa de valencia está completa (con 2 electrones para el átomo de hidrógeno y 8 para el carbono, el nitrógeno o el oxígeno). Los electrones de la capa de valencia se llaman **electrones de valencia**.

4 electrones de valencia

5 electrones de valencia

1 electrón de valencia

Carbono

Nitrógeno

Oxígeno

Hidrógeno

Helio

Neón

6 electrones de valencia

Tienden a completar sus capas de valencia y adquirir la configuración electrónica de gas noble, a base de transferir o compartir electrones

FORMACIÓN DE ENLACES COVALENTES

Un **enlace covalente** se forma al solaparse dos orbitales atómicos semiocupados (con un electrón cada uno) de átomos distintos. Cuando se aproximan los dos átomos, los electrones de cada orbital son atraídos no sólo por su núcleo, sino también por el otro. Los dos electrones acaban en un único orbital compartido por los dos átomos (el enlace covalente). Si el solapamiento de los orbitales atómicos ha sido *frontal*, se forma un **enlace σ** ; si ha sido *lateral* se forma un **enlace π** .

Núcleos

Enlace σ

Enlace π (dos lóbulos)

Molécula de hidrógeno (H_2)

Enlace σ

$H-H$

Molécula de oxígeno (O_2)

Enlace σ

Enlace π

$O=O$

Un átomo de hidrógeno (H) necesita un electrón para completar la capa 1; puede lograrlo compartiendo su electrón con otro átomo de H, formando un **enlace sencillo**. Un átomo de oxígeno (O) necesita dos electrones para completar la capa 2; por lo tanto, dos átomos de O compartirán cuatro electrones y formarán un **doble enlace**.

FORMACIÓN DE ENLACES IÓNICOS

Un **enlace iónico** se forma por atracción electrostática entre un ión positivo (un catión) y un ión negativo (un anión). Los iones se forman por transferencia de electrones desde un metal a un no metal.

Na Sodio

Cl Cloro

Atracción electrostática

Na^+ Cation sodio

Cl^- Anion cloruro

Cloruro de sodio (NaCl)

El único electrón de valencia del átomo de sodio se transfiere al átomo de cloro, uniéndose a los siete electrones de valencia de éste. Así, los iones resultantes tienen capas de valencia completas (el sodio adquiere la configuración electrónica del neón, y el cloro la del argón).

Ilustración 1.16. Formación de enlaces covalentes e iónicos a partir de átomos individuales (fuente: ASH).

Orden a partir del orden

Schrödinger sabía que los cromosomas controlan el proceso de división celular y, por ende, el desarrollo y la actividad del individuo. También estaba al tanto de que en los cromosomas hay un reparto de tareas, de manera que distintos fragmentos de los mismos, llamados **genes**, intervienen en la expresión de cada rasgo concreto del individuo [véase la ilustración 1.15]. Lo que no estaba claro es cómo los genes, que es lo único que se transmite de padres a hijos, permanecen inalterados a lo largo de generaciones pese al **movimiento térmico** desordenado que experimentan los átomos, y que tiende a destruir cualquier estructura con el paso del tiempo.

Schrödinger intuyó que la respuesta provendría de la **mecánica cuántica**. Ésta predice que entre átomos de elementos no metálicos se pueden establecer **enlaces covalentes** [véase la ilustración 1.16]; los átomos se unen así formando **moléculas**, que poseen gran estabilidad, pues para romper los enlaces covalentes se necesita generalmente más energía de la que puede suministrar la agitación térmica ambiental.

Un gen (o incluso todo el cromosoma) sería, entonces, una enorme molécula esencialmente estable. A veces, una pulsación de energía intensa (por ejemplo, de radiación ionizante) puede romper algunos enlaces; los átomos involucrados podrían formar nuevos enlaces, de modo que la molécula resultante fuese también estable: se habría producido una **mutación** [véase la ilustración 1.17].

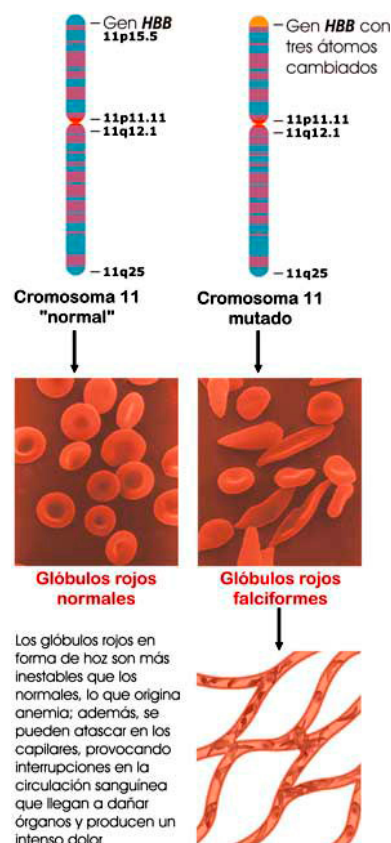


Ilustración 1.17. Los cambios de un gen en el nivel atómico (mutaciones) pueden amplificarse a una escala macroscópica. Sustituir unos pocos átomos del gen humano HBB, por ejemplo, conduce a una patología conocida como anemia falciforme, así llamada porque los glóbulos rojos adquieren forma de hoz (falx en latín). (Fuentes: <http://clinical-center.nih.gov> y <http://www.nhlbi.nih.gov/>).

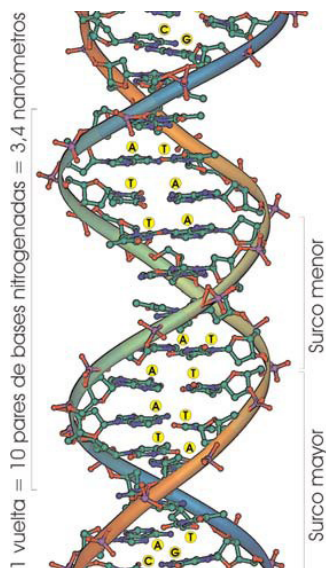


Ilustración 1.18. La doble hélice de ADN. Las bases nitrogenadas son pequeñas moléculas que pueden ser de cuatro tipos (A, G, C, T). No se repiten monótonamente a lo largo de la molécula, sino como las letras de un mensaje cifrado, y así almacenan información. (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki>).

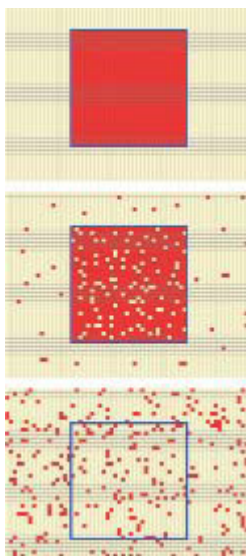


Ilustración 1.19. Los átomos de un metal caliente vibran por su elevada energía (celdas rojas). Al vibrar, chocan con los átomos del entorno más frío (celdas amarillas), y les transmiten su energía. Al final, el metal se ha enfriado y el entorno se ha calentado; es decir, se ha dispersado la energía del mismo por el entorno. (Fuente: ASH).

Schrödinger fue incluso capaz de prever las propiedades de dicha molécula. Puesto que debe llevar “escrita” la clave para el desarrollo del organismo, algunos grupos de átomos han de desempeñar un papel similar al de las letras en un texto. Esa molécula imaginada en 1944 es lo que llamamos hoy **ácido desoxirribonucleico (ADN)**, y sus “letras”, **bases nitrogenadas** [véase la ilustración 1.18].

Orden a partir del desorden

Para explicar el orden de los seres vivos Schrödinger recurrió también a una célebre ley de la física, la **segunda ley de la termodinámica** (la primera ley es el principio de conservación de la energía). Su enunciado es sencillo: *la energía interna de un sistema de cuerpos que interactúan (esto es, la energía asociada al movimiento de sus moléculas, o a los enlaces entre sus átomos) tiende a dispersarse.*

Así, el azúcar tiende a disolverse en agua porque su energía se dispersa al hacerlo físicamente las propias moléculas. En otros casos la energía se dispersa sin que se desplacen las moléculas [véase la ilustración 1.19]. La madera tiende a arder porque la energía asociada a sus enlaces (y a los del O₂) es mayor que la de los productos de la combustión (CO₂ y H₂O); la diferencia de energía se dispersa con el humo y el aire. Análogamente, los componentes celulares tienden a degradarse, dispersándose por el entorno, lo que supone la **muerte** del organismo.

La magnitud física que mide cuánto se ha dispersado la energía que antes estaba concentrada se llama **entropía**. Podemos, pues, reformular así la segunda ley: en un proceso espontáneo, la entropía total (la suma de las entropías de todos los cuerpos que intervienen en el proceso) debe crecer. Subrayemos lo de total, porque se puede producir un descenso en la entropía de un cuerpo si se compensa con un aumento en otra parte, de manera que *en el conjunto formado por el cuerpo y sus alrededores se produzca un incremento neto de entropía.*

Por tanto, un organismo puede mantenerse en un estado de baja entropía y evitar la muerte a base de inducir un aumento de entropía en el entorno. De ello se encarga la función de **nutrición**. Un animal, por ejemplo, obtiene del entorno energía concentrada en forma de **nutrientes**, y la devuelve como calor y productos residuales de menor contenido energético. A esa cantidad de energía que puede dispersarse, aumentando la entropía total, se la conoce como **energía libre**. La **respiración** permite que la disipación de energía transcurra lentamente, de modo que parte de ella pueda retenerse transitoriamente en forma de componentes celulares o moléculas como el **trifosfato de adenosina (ATP)** que, según indica la ilustración 1.20 y explica la Unidad 8, el “combustible” que permite a las células realizar su trabajo. Pero, al final, toda la energía libre acaba dispersándose.

2.2. La química y los seres vivos

Una vez sabidas las leyes de la física que gobiernan las interacciones entre los componentes celulares, pasemos a estudiar de cerca dichos componentes.

Los bioelementos

En los seres vivos se han localizado casi todos los elementos químicos no radiactivos, e incluso algunos radiactivos. Algo más de la mitad pueden considerarse contaminantes; el resto son esenciales para la vida, y reciben el nombre de **bioelementos**. Ahora bien, no todos son esenciales para todas las especies, y ello nos permite clasificarlos según su esencialidad [véase el código de colores de la ilustración 1.21].

Los bioelementos pueden clasificarse también por su contribución a la masa total del organismo, agrupándolos en tres categorías:

1. Elementos mayoritarios, existentes en cantidades superiores al 0,1 % en peso. Por orden de abundancia² son: oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), calcio (Ca), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), cloro (Cl) y sodio (Na).

A su vez, los **elementos mayoritarios** se clasifican en dos grupos:

- O, C, H, N, P y S dan cuenta, por sí solos, del 98 % del peso de un organismo. Se llaman **bioelementos primordiales** o **primarios** porque son indispensables para la formación de las **biomoléculas** o moléculas de las células, tanto **inorgánicas** (agua) como **orgánicas** (fundamentalmente glúcidos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos).
- Los restantes, llamados **bioelementos secundarios**, aparecen como **iones** (Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , Na^+) formando parte de muchas sales minerales.

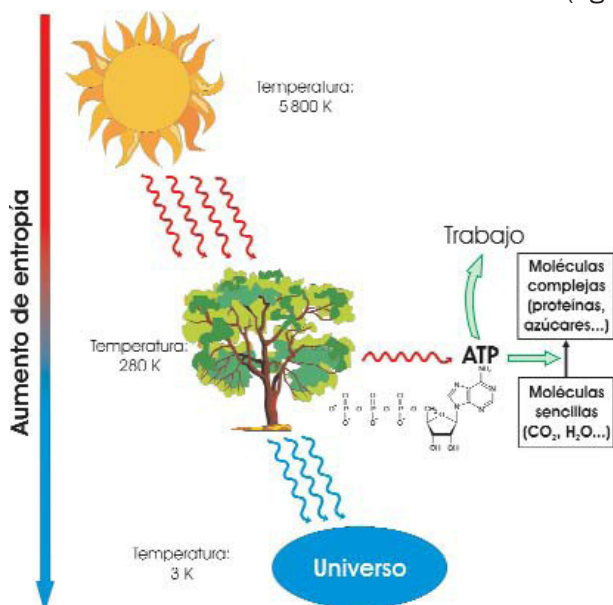


Ilustración 1.20. Gracias a la **fotosíntesis**, las plantas capturan una pequeña fracción de la energía solar que alcanza la Tierra y la concentran en forma de moléculas complejas y de ATP; el resto se refleja o se irradia en forma de energía térmica, dispersándose en el espacio. Como la cantidad dispersada es superior a la concentrada, el proceso no supone netamente una violación de la segunda ley de la termodinámica. (Fuente: ASH).

² El orden de abundancia varía si en lugar del peso comparamos el número de átomos. A este respecto, la "fórmula empírica" de un ser humano sería: $\text{H}_{375000000} \text{O}_{132000000} \text{C}_{85700000} \text{N}_{6430000} \text{Ca}_{1500000} \text{P}_{1020000} \text{S}_{206000} \text{Na}_{183000} \text{K}_{177000} \text{Cl}_{127000} \text{Mg}_{40000} \text{Si}_{38600} \text{Fe}_{2680} \text{Zn}_{2110} \text{Cu}_{76114} \text{Mn}_{13} \text{F}_{13} \text{Cr}_7 \text{Se}_4 \text{Mo}_3 \text{Co}_1$ (Sternier y Elser, 2002).

2. Elementos traza, cuya proporción está comprendida entre el 0,1 y el 0,0001 % en peso. Incluyen: silicio (Si), magnesio (Mg), hierro (Fe), zinc (Zn) y cobre (Cu).
3. **Elementos ultratrazas**, que se hallan en proporciones inferiores al 0,0001 % en peso, esto es, a una parte por millón (1 ppm). Podemos citar: yodo (I), manganeso (Mn), cromo (Cr), selenio (Se), molibdeno (Mo), flúor (F)...

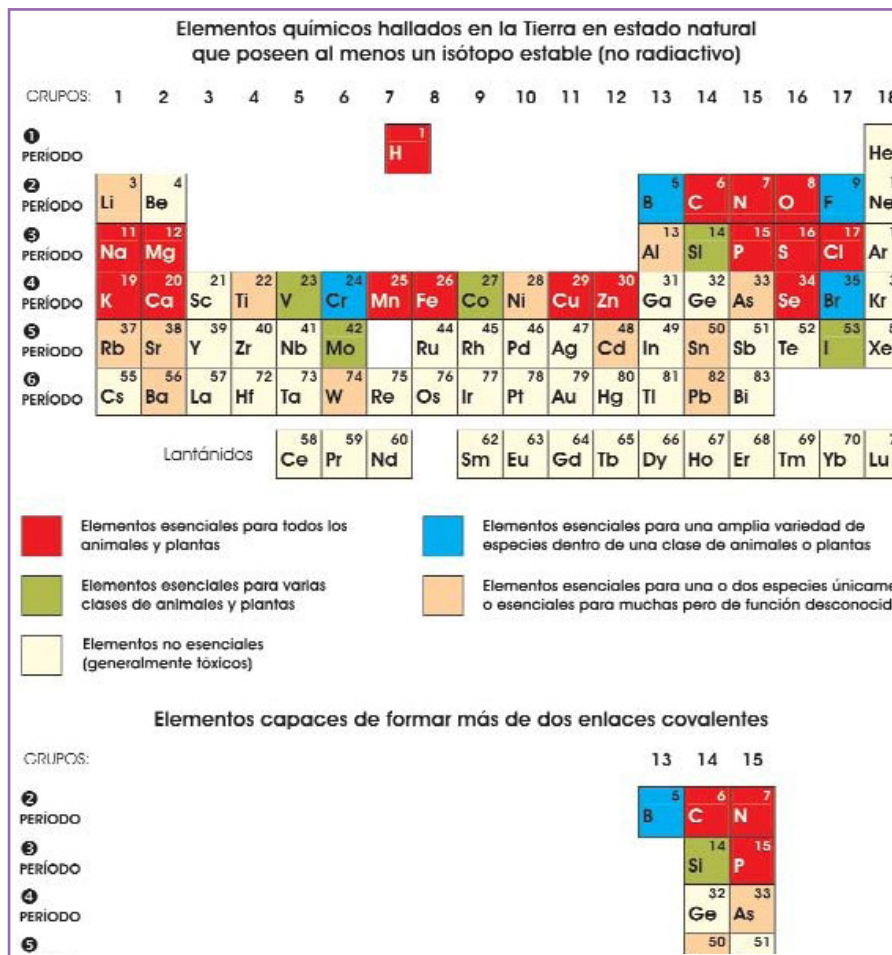


Ilustración 1.21. De los 92 elementos hallados en la Tierra en estado natural, 81 poseen al menos un isótopo no radiactivo (siendo, por lo tanto, estables). Pero solo 9 son capaces de participar en más de dos enlaces covalentes. (Fuente: ASH).

Los elementos traza y ultratrazas se conocen conjuntamente como **oligoelementos** (del griego *oligo*, “escaso”); se han aislado unos 60 oligoelementos en los seres vivos, pero solo 13 de ellos pueden considerarse comunes para casi todos: hierro, cobre, zinc, manganeso, flúor, yodo, silicio, boro, cromo, cobalto, selenio, molibdeno y estaño. Hay elementos que solo son esenciales en unos determinados seres vivos. Así, el wolframio es esencial en algunos microorganismos como, por ejemplo, muchas arqueobacterias.

Las funciones de estos oligoelementos son muy variadas, aunque podemos agruparlas en:

- **Estructurales.** El oligoelemento se une a una molécula de naturaleza orgánica, no siendo ésta una enzima, como ocurre, por ejemplo, con el hierro en la hemoglobina, el yodo en la tiroxina, el boro en la estructura de la pared celular de los vegetales...
- **Funcionales.** En este caso el oligoelemento se une a una molécula proteínica de carácter enzimático — más del 25 % de todas las enzimas conocidas contienen iones metálicos; es más, la presencia de estos iones es imprescindible para su actividad—. Como estudiaremos en las próximas unidades, los oligoelementos intervienen directamente en numerosos procesos metabólicos; sirvan como ejemplos los siguientes:
 - El cromo favorece la entrada de glucosa en las células.

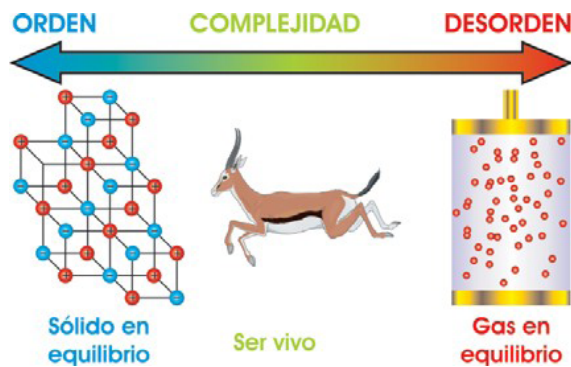


Ilustración 1.22. Un sistema complejo debe estar a mitad de camino entre el orden absoluto (representado por el cristal de un sólido) y el máximo desorden (un gas). (Fuente: ASH).

- El cobalto es un componente central de la vitamina B12 necesaria para la síntesis de hemoglobina, que es una proteína transportadora de los gases respiratorios.
- El cobre es un componente de varias enzimas que están involucradas en la regulación de la expresión genética, en la función mitocondrial y en otros procesos metabólicos.
- El hierro es fundamental para la síntesis de clorofila, actúa como catalizador en reacciones químicas y forma parte de los citocromos que intervienen en la **respiración** celular; también forma parte de la hemoglobina.

- El litio actúa sobre la permeabilidad celular.
- El manganeso interviene en la **fotólisis del agua**, durante el proceso de fotosíntesis en las plantas. El manganeso tiene un papel tanto estructural como enzimático. Está presente en distintas enzimas, destacando la superóxido dismutasa de manganeso (Mn-SOD), que cataliza la dismutación de superóxidos en oxígeno y peróxido de hidrógeno. Por ello es una importante defensa antioxidante en la mayoría de las células expuestas al oxígeno.
- El molibdeno forma parte de las enzimas vegetales que actúan en la reducción de los nitratos. Tiene la función de transferir átomos de oxígeno al agua.
- El dióxido de selenio es un catalizador adecuado para la oxidación, hidrogenación y deshidrogenación de compuestos orgánicos.

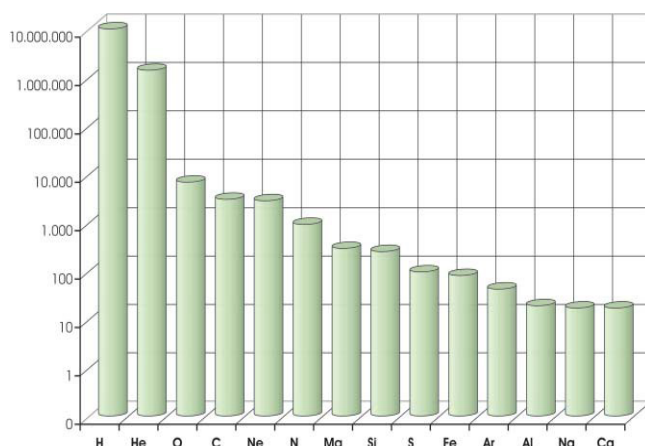


Ilustración 1.23. Abundancia relativa de los principales elementos del Universo, expresada como número de átomos por cada diez millones de átomos de hidrógeno (a escala logarítmica). (Fuente: ASH).

La molécula de agua

Una célula es un sistema complejo y, como tal, debe ser esencialmente líquida: un gas no permite la formación de una estructura estable, y en un sólido las moléculas carecen de la movilidad necesaria para que puedan reaccionar entre sí y originar los procesos metabólicos [véase la *ilustración 1.22*]. Al mismo tiempo, ese líquido ha de poderse conseguir fácilmente.

¿Qué sustancia es, además de abundante, líquida en las condiciones físicas de la Tierra? La pregunta es claramente retórica, pero podemos razonar la respuesta igno-

³ Los metales forman **enlaces metálicos**, mientras que un metal y un no metal tienden a unirse mediante un enlace iónico. Ambos tipos conllevan una fortísima atracción entre sus átomos, por lo que, en general, sus puntos de fusión son tan altos que sólo podrán ser líquidos en planetas excesivamente cálidos.

rando de momento lo que sabemos sobre los organismos terrestres.

Empecemos por la abundancia. De los seis elementos más frecuentes [véase la ilustración 1.23], dos de ellos, helio (He) y neón (Ne), tienen un punto de ebullición tan bajo que, en condiciones razonables para la presencia de vida, no podrían formar líquidos. Los restantes (H, O, C y N) son **no metales**, por lo que pueden combinarse entre sí mediante enlaces covalentes³. Los puntos de fusión y de ebullición de sus combinaciones son en general demasiado bajos, aunque tienden a aumentar con la masa molecular.

Pero, como muestra la ilustración 1.24, dos de tales compuestos poseen puntos de fusión y de ebullición muy por encima de lo que cabría esperar según su masa molecular: el **agua** (H₂O) y el **amoniaco** (NH₃).

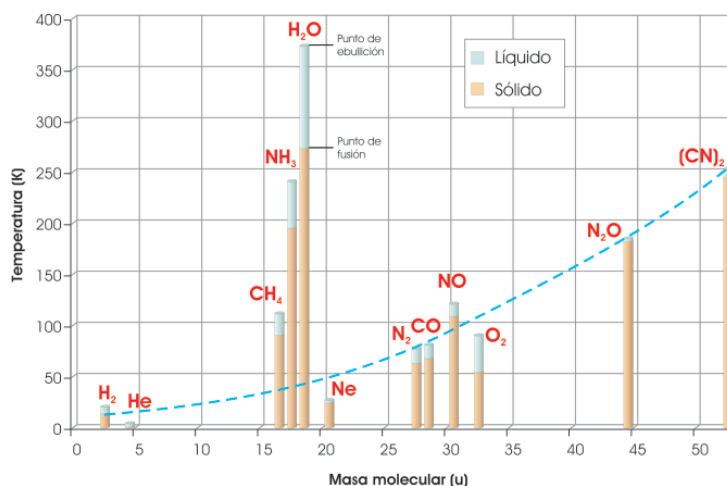


Ilustración 1.24. Intervalos de temperatura en los que se hallan en estado líquido algunas sustancias sencillas que resultan de la combinación de los elementos más abundantes. La línea a trazos marca la tendencia del punto de ebullición a aumentar en relación con la masa molecular. (Fuente: ASH).

¿Por qué estas sustancias son aún líquidas a tan “elevadas” temperaturas? Justifiquémoslo por etapas:

- El oxígeno y el nitrógeno forman enlaces orientados hacia los vértices de un tetraedro. Por ello, la estructura de la molécula de agua es **angular** (en forma de “V”), y la del amoniaco **piramidal** [véase la ilustración 1.25].
- Al tener el oxígeno seis electrones de valencia y cinco el nitrógeno, ambos átomos poseerán pares de electrones que no podrán participar en enlaces covalentes. Estos pares de electrones sin compartir se concentran en volúmenes reducidos que tendrán, pues, una elevada densidad de carga negativa (representada por el símbolo δ^- en la ilustración 1.25). Además, el núcleo de un átomo de oxígeno o de nitrógeno —con ocho y siete cargas positivas, respectivamente— atrae con fuerza a los

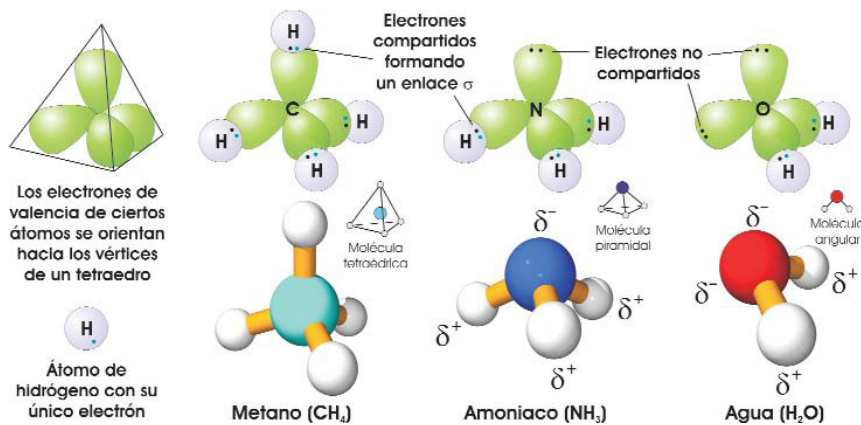


Ilustración 1.25. Los electrones de valencia del carbono, nitrógeno u oxígeno suelen localizarse en cuatro “nubes” de carga dirigidas hacia los vértices de un tetraedro. Las “nubes” que no contengan más que un electrón podrán compartirlo con otro átomo (como el hidrógeno) y formar un enlace sencillo. (Fuente: ASH).

electrones que comparte con los átomos de hidrógeno—cuyo núcleo solo tiene una carga positiva—, por lo que dichos electrones se alejarán de los átomos de hidrógeno y alrededor de éstos habrá un déficit electrónico (δ^+). Al localizarse las “cargas parciales” δ^- y δ^+ en distintas zonas de la molécula, ésta se comportará como un **dipolo**, esto es, una estructura con cargas eléctricas separadas.

- Si dos moléculas se acercan, la carga parcial δ^+ situada en el hidrógeno de una de ellas puede atraer a un par de electrones no compartidos (δ^-) de la otra. El hidrógeno se unirá entonces a dos átomos (covalentemente al de “su” molécula, y por atracción eléctrica al de la vecina), formando un “puente” entre ellos llamado **enlace de hidrógeno** [véase la ilustración 1.26].

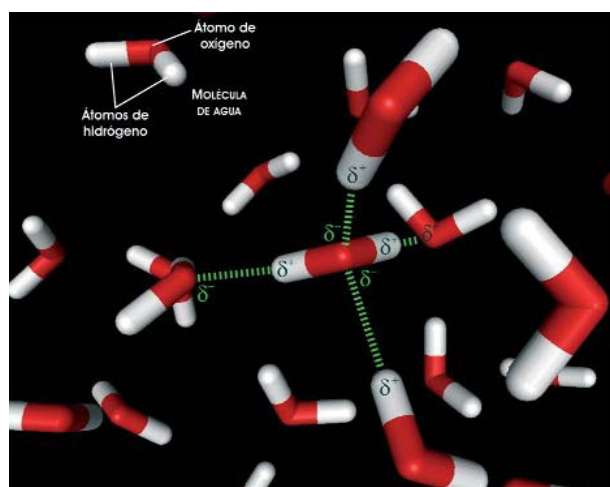


Ilustración 1.26. Una molécula de agua puede establecer, con sus vecinas, hasta cuatro enlaces de hidrógeno (líneas verdes). (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/>).

- Los enlaces de hidrógeno, si bien más débiles que los covalentes, son tan numerosos que las moléculas de H_2O o de NH_3 estarán muy cohesionadas y se separarán con dificultad de la superficie del líquido. Es decir, habrá pocas moléculas de gas en equilibrio con el líquido y, en consecuencia, la presión de vapor —la presión ejercida por las moléculas de gas— será reducida. Ahora bien, para que comience la ebullición es necesario que la presión de vapor iguale a la presión exterior (1 atm), lo cual implica romper enlaces de hidrógeno y “liberar” muchas moléculas a la fase gaseosa. Esto solo se consigue si se aumenta la agitación térmica de las moléculas, es decir, si se eleva de forma considerable la temperatura: a 100 °C para el agua y a -33,49 °C para el amoniaco.

Propiedades del agua de interés biológico

En la Tierra, con 14,5 °C de temperatura media, el amoniaco no se halla en estado líquido, y el único líquido abundante es el agua. Aparte de sus elevados puntos de fusión y de ebullición, el agua tiene otras propiedades relacionadas con la presencia de enlaces de hidrógeno.

- 1. Elevado calor específico.** Se necesita suministrar mucha energía para calentar el agua, ya que parte de ella se emplea en romper enlaces de hidrógeno, y no en aumentar la tempe-



Ilustración 1.27. Pareja de zapateros (*Gerris lacustris*) sobre la superficie del agua. Contrariamente a la creencia popular, no flotan. (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki>).

ratura (agitando las moléculas). Gracias a esta cualidad, la temperatura de la célula variará poco aunque la temperatura externa suba bruscamente.

2. **Alto calor de vaporización.** Para vaporizar una masa de agua que está a 100 °C hay que romper todos los enlaces de hidrógeno, y ello exige cinco veces más energía que para calentarla de 0 a 100 °C. Por esta razón, al sudar se invierten considerables cantidades de calor en vaporizar agua, lo que refresca la piel.
3. **Elevada tensión superficial.** En el interior de una masa de agua cada molécula está sometida a fuerzas de atracción en todas las direcciones, que se cancelan mutuamente. Pero en la superficie hay una fuerza neta hacia el interior que mantiene a las moléculas fuertemente cohesionadas; se forma así una película superficial por la que pueden desplazarse algunos organismos [véase la ilustración 1.27]. La cohesión de las moléculas y su adhesión a otros materiales favorece, igualmente, el ascenso de la savia en las plantas.
4. **Anómala densidad a bajas temperaturas.** En el agua sólida (hielo) cada molécula está involucrada en cuatro enlaces de hidrógeno que la mantienen rígidamente anclada en una red cristalina. Al comenzar a fundirse, se rompen los enlaces de hidrógeno de parte de las moléculas, que se liberan e invaden los huecos de la red; en conjunto, ocupan menos espacio que antes, y la densidad aumenta. Esta es la razón de que el hielo sea menos denso que el agua líquida y flote en ella, lo que evita que los lagos lleguen a helarse en invierno hasta el fondo y mueran los seres vivos que albergan. Como contrapartida negativa, si el agua de sus células se congelara los cristales de hielo podrían, al dilatarse, rasgar la membrana plasmática.
5. **Poder disolvente.** Las moléculas que intervienen en el metabolismo deben hallarse en disolución, o de otro modo no podrían desplazarse para chocar unas con otras y reaccionar químicamente. Por fortuna, el agua es uno de los mejores disolventes conocidos. Así, muchas sales se disuelven rápidamente porque los iones que las forman se rodean de una capa de moléculas de agua que los aísla, proceso conocido como **solvatación** y explicado en la ilustración 1.28.

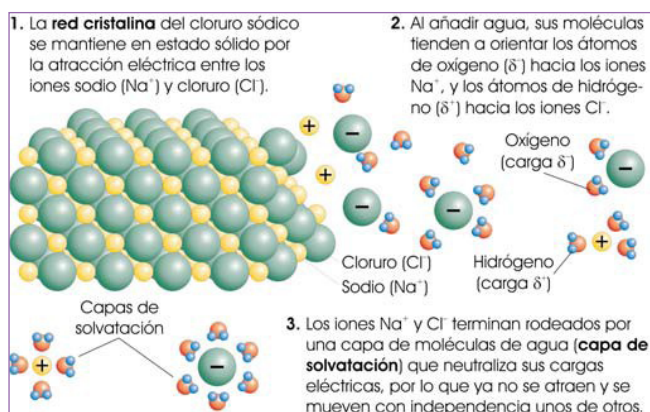


Ilustración 1.28. Disolución de una sal por solvatación de sus iones. (Fuente: ASH).

solventes conocidos. Así, muchas sales se disuelven rápidamente porque los iones que las forman se rodean de una capa de moléculas de agua que los aísla, proceso conocido como **solvatación** y explicado en la ilustración 1.28.

Pero el agua no solo es capaz de disolver sustancias iónicas, sino también multitud de compuestos con los que puede formar enlaces de hidrógeno o, en general, **sustancias polares** con las que establece interacciones dipolo-dipolo (como, por ejemplo, el propio amoníaco). En cambio, las **moléculas apolares** como el metano [véase la ilus-

tración 1.25] no podrán disolverse en agua, razón por la cual merecen el calificativo de **hidrofóbicas**.

6. Capacidad de ionización. Muchas sustancias no solo se disuelven en agua, sino que reaccionan con ella. En el cloruro de hidrógeno (HCl), por ejemplo, el átomo de hidrógeno tiene una carga δ^+ tan elevada —debido a la gran avidez del cloro hacia los electrones— que atrae fuertemente a un par de electrones sin compartir de una molécula de agua, formando con éstos un enlace covalente y rompiendo el que le unía al cloro: $\text{H}_2\text{O} + \text{HCl} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$ [véase la ilustración 1.29]. El **protón** (el átomo de hidrógeno sin su electrón, H^+) cedido por el HCl puede saltar de molécula en molécula de agua, formando sucesivos **iones oxonio**⁴ (H_3O^+), hasta que uno de ellos se solvata por unas seis moléculas de agua ($\text{H}_{15}\text{O}_7^+$) que lo estabilizan. Estas sustancias que liberan protones en disolución reciben el nombre de **ácidos**.

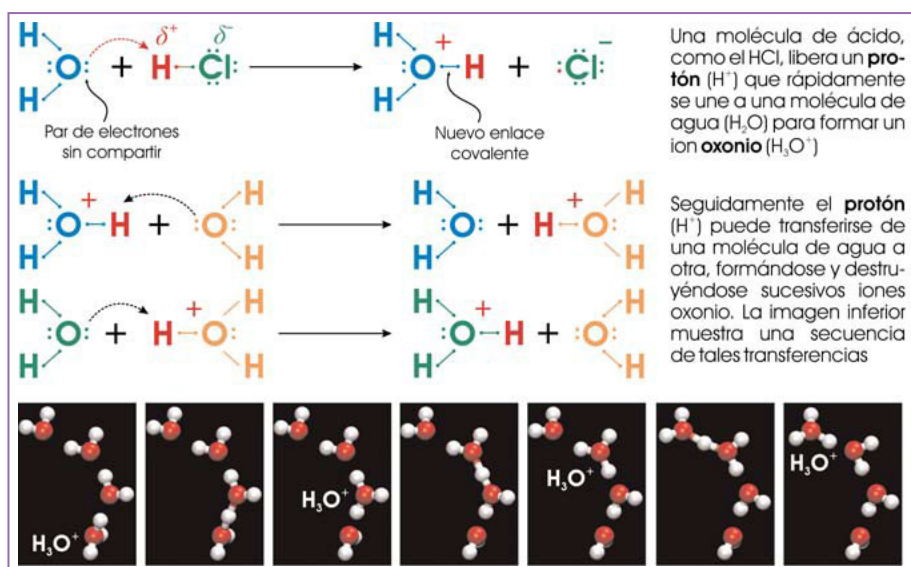


Ilustración 1.29. Un protón (H^+) “extra” aportado por un ácido puede difundirse a través de la red de enlaces de hidrógeno del agua mediante la formación y ruptura de enlaces covalentes (mecanismo de Grotthuss). (Fuentes: ASH y <http://en.wikipedia.org/wiki>).

Por su parte, el amoníaco (NH_3) actúa a la inversa: en lugar de ceder un protón a una molécula de agua puede arrancárselo a través del par de electrones no compartidos de su átomo de nitrógeno, convirtiéndola en un ión OH^- (**hidroxilo**): $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{OH}^- + \text{NH}_4^+$. Las sustancias que, como el amoníaco, aceptan protones en disolución se denominan bases.

Existen iones OH^- y H_3O^+ incluso en agua pura, ya que ésta puede actuar como un ácido y como una base (se dice que es **anfótera**) y reaccionar consigo misma: $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$. Se suele escribir esta ecuación así: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$; pero debe quedar claro que el protón H^+ no existe de for-

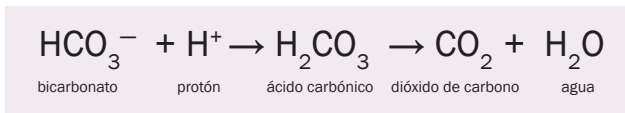
⁴ El nombre tradicional de H_3O^+ es **ion hidronio**, pero la **IUPAC** recomienda emplear el término **oxonio**, que indica la presencia de un átomo de oxígeno cargado positivamente capaz de establecer tres enlaces covalentes.

ma libre, sino como un ion oxonio (H_3O^+) o, más exactamente, como un “oxonio solvatado” ($\text{H}_{15}\text{O}_7^+$ o, incluso, $\text{H}_{43}\text{O}_{21}^+$).

Los productos de esta **autoionización del agua** tienen una vida media muy breve, y su concentración en agua pura a $25\text{ }^\circ\text{C}$ es de 10^{-7} M . Lógicamente, la concentración de H_3O^+ (o, abreviadamente, de H^+) se incrementará cuando se añada un ácido al agua, y disminuirá al añadir una base. Se suele medir dicha concentración mediante su logaritmo decimal cambiado de signo, cantidad que constituye el llamado **pH** o **potencial de hidrógeno**: $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$. Así, el pH del agua pura será $-\log (10^{-7}) = 7$. Toda disolución con $\text{pH} = 7$ se dice que es **neutra**; en las disoluciones **ácidas** el pH es menor que 7, y en las básicas es mayor que 7.

Las sales minerales

La mayor parte de los organismos requiere que el pH esté próximo a la neutralidad, y tolera mal desviaciones del valor óptimo, incluso si son pequeñas (la acidez del estómago, por ejemplo, sirve para matar a muchas de las bacterias que ingerimos con los alimentos). Por esta razón disponen de medios para amortiguar los cambios de pH, en particular ciertas **sales** que actúan como sistemas tampón. Un **sistema tampón** consta de un ácido y una base que se transforman el uno en el otro cediendo o aceptando protones, según haya subido o bajado del pH, respectivamente. En el interior de las células abunda el **tampón fosfato** [véase la ilustración 1.30]; y en la sangre existe el **tampón bicarbonato**, que elimina el exceso de ácido en forma de H_2O y CO_2 (el cual se expulsa en los pulmones):



Las sales minerales no solo contribuyen a la regulación del pH. Realmente, juegan muchos otros papeles en la bioquímica de los organismos, entre los que destacan:

- **Intervienen en la regulación de la presión osmótica** que se ejerce sobre la membrana plasmática como consecuencia de la diferente concentración de solutos a un lado y otro de la misma. Estudiaremos con detalle este efecto en la Unidad 3.
- Participan en diversos procesos fisiológicos, como la **contracción muscular** (con el ión Ca^{2+} como protagonista) o la **transmisión del impulso nervioso** (Na^+ y K^+).
- En estado sólido, **confieren resistencia a muchas estructuras esqueléticas**, tanto internas como externas. Así, el carbonato cálcico (CaCO_3) se halla en los caparazones de crustáceos y moluscos y el fluoruro de calcio (CaF_2) en el esmalte de los dientes.

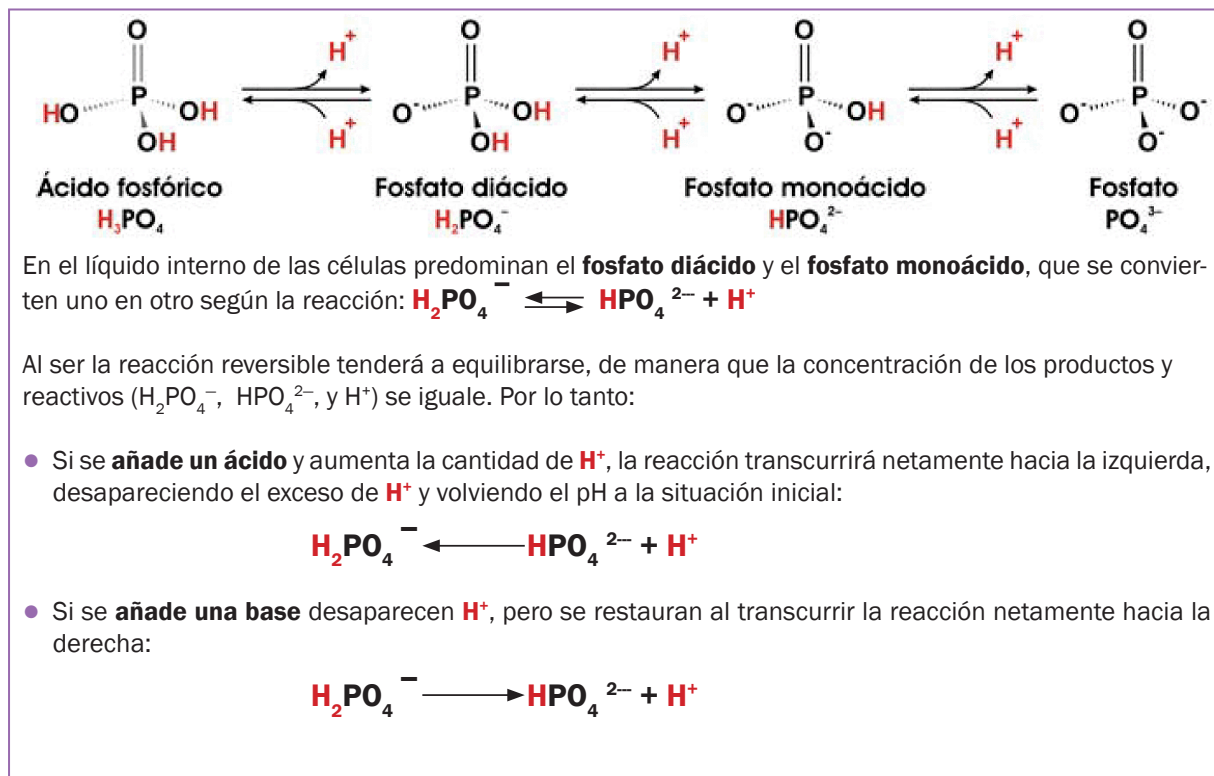


Ilustración 1.30. Acción del tampón fosfato frente a un exceso o un déficit de protones. (Fuente: ASH).

El carbono, base de la vida en la Tierra

Después del agua, los principales componentes de las células son las **biomoléculas** orgánicas. El esquema básico de las biomoléculas se fundamenta en reunir átomos de cierto elemento y construir con ellos largas cadenas o esqueletos de muy diversas formas (lineales, ramificados, cíclicos...), a los que se añaden en distintas posiciones átomos de otros elementos o grupos de ellos enlazados covalentemente (los llamados **grupos funcionales**); de esta forma se obtiene una variedad casi ilimitada de biomoléculas, desde la humilde glucosa hasta el gigantesco ADN. Ahora bien, ¿cuál o cuáles son los elementos más adecuados para formar estos esqueletos?

Para empezar, un elemento tal ha de poder formar más de dos enlaces covalentes con otros átomos (si admitiese solo dos enlaces podría unirse consigo mismo formando largas cadenas o anillos; pero serían esqueletos desnudos, sin otros átomos adicionales). Solo nueve elementos cumplen esta condición [véase la ilustración 1.21], y de ellos solo tres son relativamente abundantes [véase la ilustración 1.23]: el carbono (C), el nitrógeno (N) y el silicio (Si). ¿Es posible “eliminar” alguno más?

Desde luego que sí. Teóricamente son posibles esqueletos nitrógenados, es decir, cadenas de átomos de nitrógeno; pero se descomponen espontáneamente en nitrógeno molecular (N_2), ya que su triple enlace es más estable que el enlace sencillo [véase la ilustración 1.31].

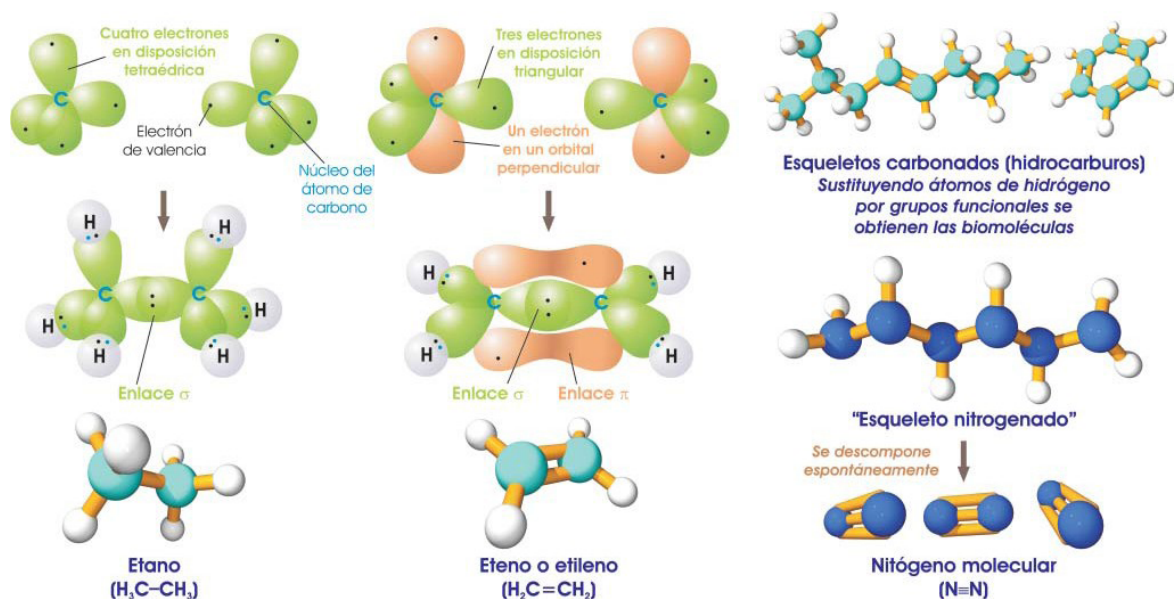


Ilustración 1.31. El carbono y el nitrógeno pueden formar enlaces sencillos, dobles y triples; pero los enlaces sencillos de carbono son más estables que los de nitrógeno. (Fuente: ASH).

Descartado, pues, el nitrógeno, interesémonos por el carbono y el silicio, capaces ambos de establecer hasta cuatro enlaces. En particular, prestemos atención a la fortaleza de dichos enlaces, medida por la energía necesaria para romperlos (la llamada **energía de disociación**):

Tipo de enlace	C - C	C - O	Si - Si	Si - O
Energía de disociación (kJ mol ⁻¹)	347	359	221	451

Un enlace será más estable cuanto mayor sea su energía de disociación. Puede observarse que el enlace Si-Si es mucho menos estable que el enlace Si-O; al ser el oxígeno el tercer elemento más abundante del Universo, las cadenas de silicio tenderán a combinarse con él y originar compuestos oxidados. En cambio, el enlace C-C es casi tan estable como el enlace C-O. Y como la corteza terrestre contiene una cuarta parte de silicio pero menos del 1 % de carbono, casi todo el oxígeno libre que existía en la Tierra primitiva debió combinarse preferentemente con silicio formando **silicatos**, dejando así al carbono libre para polimerizarse con facilidad.

Los grupos funcionales y la jerarquía de biomoléculas

El **carbono**, pues, ha sido el triunfador en la bioquímica de la Tierra. Los esqueletos de carbono reciben el nombre de **hidrocarburos**, porque las valencias "libres" del carbono están saturadas con átomos de hidrógeno [véase la ilustración 1.31]. Todas las biomoléculas son, simplemente, hidrocarburos en los que uno o más átomos de hidrógeno han sido sustituidos por **grupos funcionales**, principales causantes de sus propiedades (entre otras cosas, los hidrocarburos son de por sí insolubles en agua, pero no si están unidos a ciertos grupos funcionales).

Además, de los grupos funcionales dependen las reacciones químicas que experimenten las biomoléculas. Conviene fijarse atentamente en los grupos funcionales que se presentan en las ilustraciones 1.32 y 1.33, porque aparecerán en reiteradas ocasiones a lo largo del curso.

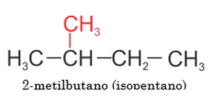
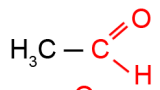
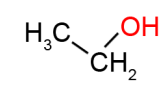
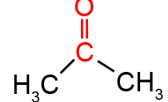
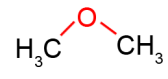
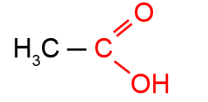
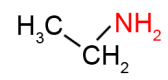
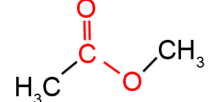
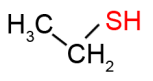
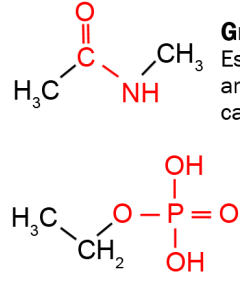
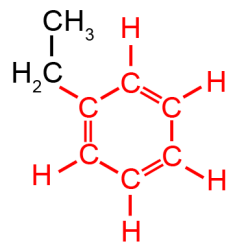
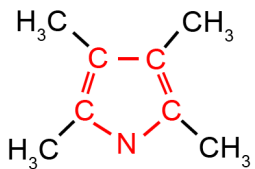
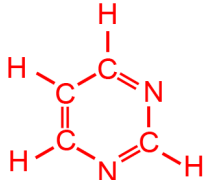
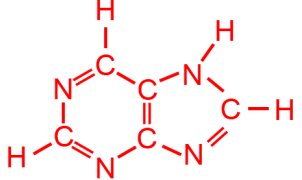
Grupos funcionales con enlaces sencillos		Grupos funcionales con enlaces dobles	
 <p>Grupo metilo Resulta de la ruptura de una molécula de metano liberando un átomo de hidrógeno.</p>	 <p>Grupo carbonilo Se llama aldehído si está en el extremo de una molécula y cetona si está en medio. El carbono tiene una δ^+ y el oxígeno una δ^-, por lo que reacciona como ácido y como base.</p>		
 <p>Grupo alcohol Es un ión hidroxilo unido a un carbono por un enlace covalente. Forma enlaces de hidrógeno con facilidad, por lo que es muy soluble.</p>	 <p>Grupo carboxilo Forman los ácidos carboxílicos que tienden a ceder el hidrógeno del OH como un protón (H^+), quedando como un anión carboxilato ($-COO^-$).</p>		
 <p>Grupo éter Los éteres suelen ser inmiscibles en agua y poco reactivos. Disuelven bien sustancias orgánicas.</p>	 <p>Grupo éster Se forma al unirse un ácido carboxílico y un alcohol, con pérdida de agua.</p>		
 <p>Grupo amino Forma enlaces de hidrógeno más débiles que el alcohol. Las aminas son muy básicas, reaccionando bien con ácidos para dar sales.</p>	 <p>Grupo amido Es menos básico que el grupo amino. El enlace C-N tiene carácter de doble enlace.</p>		
 <p>Grupo tiol Los tioles son más ácidos que los correspondientes alcoholes. Se oxidan con facilidad.</p>	 <p>Grupo fosfato Puede funcionar como tampón y unirse a un grupo alcohol dando un "éster de fosfato".</p>		
Grupos funcionales cíclicos			
 <p>Grupo fenilo</p>	 <p>Grupo pirrol</p>	 <p>Pirimidina</p>	 <p>Purina</p>

Ilustración 1.32. Principales grupos funcionales lineales y cíclicos (Fuente: ASH).

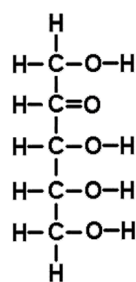
La existencia de grupos funcionales permite que unas moléculas puedan reaccionar con otras y unirse formando moléculas de mayor tamaño. De hecho, las biomoléculas celulares están ordenadas en una jerarquía de complejidad molecular creciente:

- En el nivel más bajo encontramos unas tres docenas de **monómeros** o sillares estructurales, moléculas de baja masa molecular tales como la glucosa y otros azúcares sencillos, el glicerol, los aminoácidos o las bases nitrogenadas del ADN.

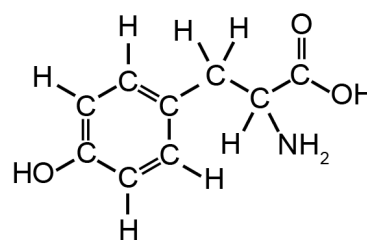
- Los monómeros se unen covalentemente para formar **macromoléculas** de elevada masa molecular. Así, las **proteínas** están formadas por la unión covalente de aminoácidos; los **polisacáridos** como el almidón, por la unión de monosacáridos o azúcares sencillos; los **lípidos** o moléculas insolubles en agua constan de sillares como el glicerol o los ácidos grasos, y los **ácidos nucleicos** son cadenas de nucleótidos —moléculas que incluyen un monosacárido y una base nitrogenada—.
- Finalmente, las macromoléculas se asocian mediante enlaces *relativamente débiles* (como enlaces de hidrógeno) y forman ensamblajes **supramacromoleculares**. Así, la **membrana plasmática** está formada fundamentalmente por lípidos y proteínas.

Actividades

- ¿Por qué llamaría Schrödinger “orden a partir del desorden” al segundo de los mecanismos responsables de la organización de los seres vivos?
- Los cuerpos calientes tienden a dispersar su energía como calor hacia un entorno más frío. Pero los mamíferos y las aves mantenemos nuestra temperatura constante, incluso en invierno. ¿Supone esto un quebrantamiento de la segunda ley? Razona la respuesta.
- ¿A qué se debe la diferencia de puntos de ebullición entre el H_2O y el NH_3 ? Razónalo en términos de enlaces de hidrógeno. ¿Es viable el NH_3 como fluido celular? ¿Por qué? ¿En qué condiciones podría haber vida “basada en el amoníaco”?
- Una solución tiene un pH de 6, ¿qué concentración de H^+ presenta por litro de disolución?
- Si el pH de una solución cambia de 3 a 6, cómo será la nueva solución ¿más ácida o más básica? ¿Aumenta, disminuye o permanece constante la concentración de protones?
- El pH del plasma sanguíneo humano es normalmente de 7,4. Pero el abuso de alcohol puede provocar la liberación de ácidos (cetoacidosis alcohólica) que rebajen el pH hasta 7,1 o menos. Calcula la relación de protones del plasma de una paciente con cetoacidosis alcohólica respecto a la del plasma de una persona sana.
- Al bucear sin equipo de inmersión y contener la respiración mucho tiempo aumenta la concentración de CO_2 en la sangre. Explica el efecto que tendrá sobre su pH.
- Determina los grupos funcionales que incluyen las biomoléculas adjuntas.
- Mencionábamos en el epígrafe 1.3 que el etanol y el éter dimetílico, pese a responder a la misma fórmula empírica (C_2H_6O), tienen propiedades muy diferentes. ¿A qué se debe esto?



Ribulosa



Tirosina



RECUERDA

La elevada organización de los seres vivos se mantiene y se incrementa gracias a:

- Las **moléculas de ADN**, que almacenan la información que controla el desarrollo del organismo.
- La **nutrición**, que concentra energía en moléculas complejas a costa de disipar energía por el entorno.

Esas moléculas complejas dependen de las características del agua y del carbono:

- El **agua** posee las propiedades que la convierten en el mejor disolvente de la Tierra gracias a su **carácter dipolar**, que induce la presencia de **enlaces de hidrógeno**.
- El agua disuelve casi todo tipo de moléculas **polares**. También es capaz de capturar protones (H^+) de algunas moléculas (**ácidos**) y de cedérselos a otras (**bases**).
- El **carbono** es capaz de unirse consigo mismo formando largas cadenas y anillos (**esqueletos carbonados**), a los que se pueden enlazar **grupos funcionales** para originar las **biomoléculas**.

3. Características esenciales de los seres vivos

Ha llegado el momento de replantear el problema de la organización en los seres vivos. Hasta ahora, lo único que sabemos al respecto es que podemos trazar el esquema básico de la arquitectura celular (una jerarquía de moléculas apoyada en esqueletos carbonados y grupos funcionales) y que la ordenada estructura de los organismos no es incompatible con las leyes de la física (en especial con la segunda ley de la termodinámica). Será suficiente con esto para nuestros actuales propósitos; ya tendremos ocasión en las próximas unidades de profundizar en esta dirección.

Ahora abordaremos, aunque sea someramente, otro aspecto de la cuestión. No nos contentaremos con averiguar cómo mantienen o incrementan los seres vivos su grado de complejidad y organización; vamos a intentar entender también por qué lo hacen.

3.1. El argumento del diseño y la evolución por selección natural

¿Por qué existen organismos tan complejos? La respuesta obvia es que los han engendrado otros organismos de la misma especie, igual de complejos. Entonces, ¿cuál es la razón de la existencia de esa especie... o de cualquier otra, incluida la nuestra?

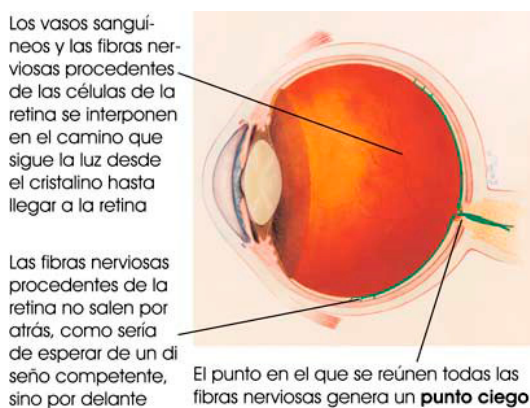


Ilustración 1.34. *La débil conexión entre la retina y la cara posterior del ojo (con el correspondiente peligro de desprendimiento) demuestra que no es obra de un ingeniero competente, sino resultado de una evolución que se limita a modificar estructuras ya existentes con anterioridad. (Fuente: <ftp://ftp.nei.nih.gov>).*

Es sorprendente el número de personas que, incluso hoy en día, no solo ignoran la respuesta a tan profundo problema, sino que realmente desconocen que exista un problema. Se trata, en breve, del problema de la complejidad biológica, absolutamente inmensa, que da la impresión de haber sido diseñada con un propósito (ver, volar, nadar...). En su célebre Teología natural (1802), el clérigo anglicano William Paley (1743-1805) explicaba que la precisión de las piezas de un reloj y la complejidad de su montaje invitan a pensar que ha sido diseñado por un ser inteligente (el relojero); pero un organismo es muchísimo más complejo que un reloj, así que debe haber sido diseñado por una inteligencia aún mayor (Dios), que ha dispuesto sus partes para asegurar su exquisita adaptación al entorno. Este es el **argumento del diseño**.

Aunque filósofos como el escocés David Hume (1711-1776) habían realizado una crítica demoledora de este argumento como prueba de la existencia de Dios, nadie ofreció una explicación alternativa al

aparente diseño de los seres vivos hasta 1859, fecha en que el naturalista británico Charles Robert Darwin (1809-1882) publicó la primera edición de su más afamado libro, *El origen de las especies*. Pese a ser un confeso admirador de Paley, Darwin se esforzó, sin embargo, en “dar la vuelta” a sus argumentos:

- En primer lugar, el énfasis de Paley en la perfecta adaptación de las especies choca con la realidad de una naturaleza llena de defectos y órganos vestigiales que solo se pueden interpretar como reliquias del pasado [véase la ilustración 1.34]. Dicho de otro modo, las especies han **evolucionado** y la naturaleza, en palabras del biólogo François Jacob, “no trabaja como un ingeniero, sino como un chapucero... que aprovecha todo lo que encuentra a su alrededor para obtener algún objeto que sea útil”.
- Pese a lo dicho, Darwin aceptó que, en realidad, las adaptaciones predominan sobre las imperfecciones, como afirmaba Paley; pero no por las razones aducidas por el teólogo, sino exactamente por las contrarias. En pocas palabras, las adaptaciones que exhiben los organismos no son el resultado de un diseño deliberado, sino un “efecto colateral” de la lucha por su propio beneficio (entendiendo por tal la posibilidad de tener más hijos que puedan, a su vez, seguir reproduciéndose): los que por casualidad estén mejor adaptados —aquellos que utilicen los recursos más eficazmente o se protejan mejor frente a los depredadores o los rigores climáticos— gozarán en general de mejor salud y vivirán más, por lo que podrán dedicar más tiempo y energía a la tarea de reproducirse (en terminología moderna, tendrán más eficacia biológica); si sus descendientes heredan esos rasgos que les vuelven más “eficaces”, su proporción aumentará generación tras generación. Este es el proceso de la selección natural [véase la ilustración 1.35].

No se debe pensar que la selección natural es una mera fuerza negativa, que se limita a eliminar las variantes peor adaptadas de una población; de hecho, Darwin le otorgaba un papel mucho más positivo, capaz de forjar novedades evolutivas —de crear individuos bien adaptados además de eliminar a los no aptos—.

La ilustración 1.36 representa cómo podría haber surgido algo tan complejo como un ojo con la sola ayuda de la selección natural, sin necesidad de diseñador. Obsérvese que no aparece “de golpe”, por puro azar. Solo se necesita que se produzcan continuamente variaciones de escasa amplitud (por ejemplo, pequeños cambios en el grosor de la capa transparente) y que no se hallen orientados en una dirección preferente (es decir, que los aumentos de grosor sean tan probables como las disminuciones); la selección natural actuará entonces como un filtro, promoviendo la acumulación gradual de las variaciones favorables, esto es, las que confieren mayor eficacia biológica.

Darwin desconocía por completo el mecanismo por el que se genera esa variación, y de ahí el enorme mérito que tiene el que



*Ilustración 1.35. Modelo de evolución por selección natural. Difiere de la selección artificial en que lo único que se "selecciona" directamente es la mayor **eficacia biológica** de unos individuos (los que más aportan a la siguiente generación de reproductores); los demás rasgos serán seleccionados en la medida en que contribuyan a la eficacia biológica. (Fuentes: <http://commons.wikimedia.org/wiki/ASH>).*

haya sido capaz de predecir sus propiedades e incluso de sugerir algunas "leyes" generales. Hoy la situación es distinta, e iremos profundizando en esas fuentes de variación en las unidades 5, 6 y 7. Por ahora nos bastará con una de ellas: las mutaciones, que nos van a permitir conectar el macromundo de la evolución con el micromundo cuántico [véase la ilustración 1.17], o, lo que es lo mismo, el problema de Darwin con el de Schrödinger.

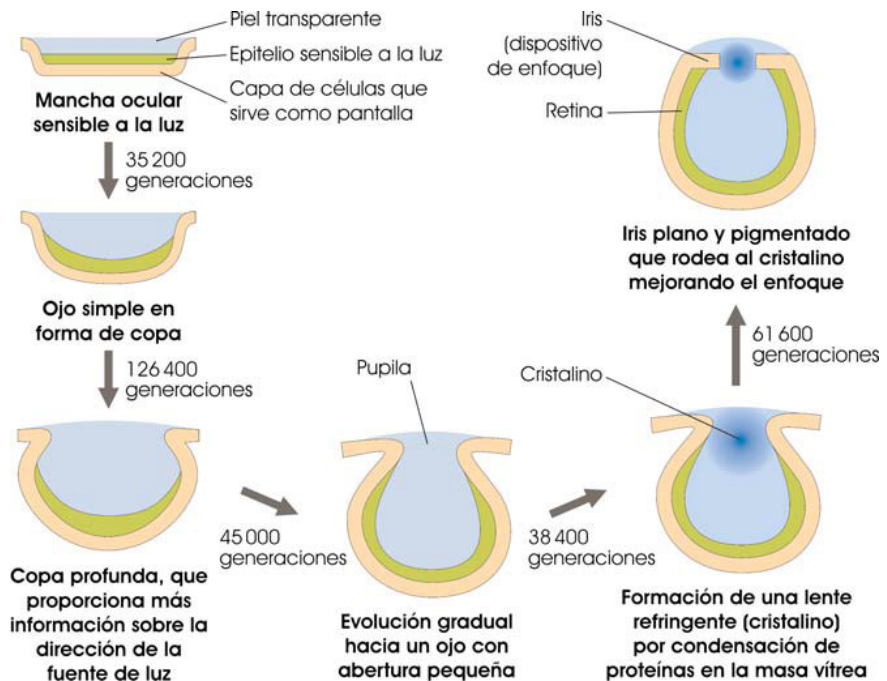


Ilustración 1.36. *Creatividad de la selección natural, manifestada en esta simulación de la evolución de un ojo de pez a partir de una capa de células sensibles a la luz. En cada generación se producen mutaciones que cambian ligeramente el tamaño o la forma; algunas de ellas mejorarán la visión, y los individuos que las porten tendrán algunas oportunidades más de sobrevivir y reproducirse (por ejemplo, divisarán mejor a los depredadores). (Fuente: ASH).*

3.2. Criterios para definir la vida: las necesidades de la célula

Si se recapitula lo visto hasta ahora, buscando compaginar la teoría celular y la teoría de la evolución de Darwin con las aportaciones de Schrödinger, llama la atención la doble imagen de los organismos que parece emerger de dicha panorámica:

1. Por un lado son entidades que se **reproducen**, dotadas de moléculas de ADN que experimenta **mutaciones heredables** que sirven de sustrato a la evolución por **selección natural**.
2. Por otra parte, los organismos son “máquinas de supervivencia” extraordinariamente complejas, que se mantienen gracias a la **energía** que fluye a su través.

Quizá la parte más difícil de la Biología consista en articular ambas descripciones. ¿Son igual de esenciales? Un mulo no se reproduce, aunque conserva su estructura disipando energía y está vivo. En el extremo opuesto, los **virus** no son células ni tienen metabolismo [véase la *ilustración 1.38*], pero se reproducen usando la “maquinaria” de células a las que parasitan. ¿Están vivos?

El origen de la vida

Como ya estudiamos en primero de bachillerato, el científico ruso Alexander Ivanovich Oparin (1894-1980) y el genetista británico John Burdon Sanderson Haldane (1892-1964) propusieron la teoría sobre una *evolución molecular abiogénica* de los seres vivos.

Según esta teoría, la primitiva atmósfera carecía de oxígeno y estaba formada por gases como el metano, el amoníaco y el vapor de agua. La radiación ultravioleta proveniente del Sol era intensa, y fuertes relámpagos se producían en la propia atmósfera; por efecto de estas energías, los gases empezaron a reaccionar entre sí dando lugar a pequeñas moléculas orgánicas.

Al mismo tiempo la Tierra empezó a enfriarse, lo que condujo a la condensación del vapor de agua atmosférico y su posterior precipitación; estas lluvias arrastraron las moléculas de la atmósfera hacia los mares que se iban formando. Las moléculas orgánicas se concentraron en los cálidos mares primitivos —Oparin llamó **caldo nutritivo** o **sopa primordial** a estos mares someros especialmente cargados de sustancias orgánicas— y aparecieron nuevas moléculas orgánicas cada vez más complejas. Algunas de esas moléculas se unieron constituyendo unas entidades individualizadas con forma de pequeñas esferas llamadas **coacervados**, dotadas de un metabolismo rudimentario, pero lejos aún de las células más primitivas.

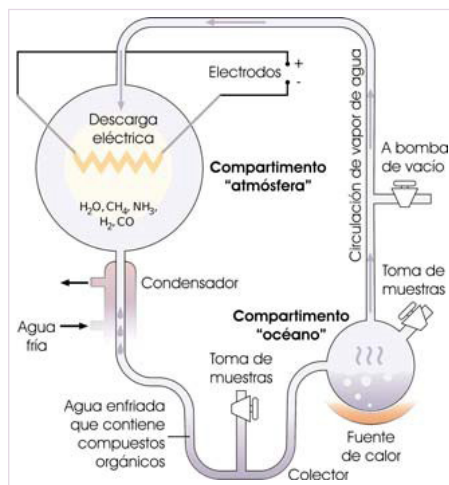


Ilustración 1.37. Experimento de Miller-Urey. En el compartimento "atmósfera" se reproducen las condiciones de la atmósfera primitiva. En el compartimento "océano" se sintetizan compuestos orgánicos (Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/>).

El proceso continuó hasta que apareció una molécula que fue capaz de dejar copias de sí misma, es decir, algo parecido a reproducirse; esta molécula sería similar a un ácido nucleico. Los coacervados que tenían "el ácido nucleico" empezaron a mantenerse en el medio aislándose para no reaccionar con otras moléculas, y finalmente empezarían a intercambiar materia y energía con el medio, dando lugar a primitivas células (que se desarrollaron en mares tranquilos y cálidos protegidos por el agua de la intensa radiación ultravioleta).

Desgraciadamente, el soporte experimental de este modelo es muy endeble. En 1953, Stanley Lloyd Miller (1930-2007) y Harold Clayton Urey (1893-1981) reprodujeron en el laboratorio parte de las condiciones ambientales y demostraron que es posible la síntesis abiótica de algunas biomoléculas, como ciertos aminoácidos; pero nunca se han detectado nucleótidos en este tipo de experimentos. La evolución abiótica de las moléculas a los coacervados ha sido confirmada experimentalmente, pero el tránsito de estos hasta el primer ser vivo es totalmente desconocido; solo podemos elaborar

hipótesis más o menos verosímiles, ya que los fósiles más antiguos que conocemos son muy posteriores a las primeras formas de vida sobre la Tierra.



Ilustración 1.38. Fotografía lograda con el MET del virus Parainfluenza, responsable de infecciones respiratorias. Carece de estructuras y procesos celulares, y consta únicamente de una molécula de ARN (similar al ADN) y de una cubierta de proteínas (Fuente: <http://phil.cdc.gov/phil>).

Un intento de poner en orden estas ideas y hallar una definición explícita de vida procede del biólogo húngaro Tibor Gánti (1933-2009), quien en 1971 determinó las propiedades esenciales de los seres vivos y las separó de las puramente accidentales. Es decir, distinguió dos tipos de **criterios de la vida**:

- 1.** Los **criterios absolutos** abarcan las propiedades que son necesarias y suficientes para que un objeto sea un sistema vivo. Según estos criterios, un sistema vivo:
 - A.** Es una **unidad individualizada** del entorno, que pierde sus propiedades si se subdivide en partes.
 - B.** Disipa energía, manipulándola por medios **químicos** (metabolismo) para realizar trabajo que le permita reaccionar frente a cambios externos (**irritabilidad**) y mantener su medio interno relativamente invariable (**homeostasis**).
 - C.** Posee un subsistema que conserva la **información** precisa para su desarrollo y funcionamiento y un subsistema capaz de “leer” y “utilizar” dicha información.
- 2.** Los **criterios potenciales** puede poseerlos un ser vivo, aunque no obligatoriamente (sin embargo, son decisivos para la expansión de la vida en la Tierra):
 - A.** Es capaz de **crecer** y de **reproducirse**.
 - B.** Si la reproducción no es del todo exacta se originan **variaciones heredables**.
 - C.** Debe **morir** en algún momento.

Podemos preguntarnos ahora cuál será el sistema más sencillo al que podamos calificar de “vivo”. Gánti descubrió que una célula debería constar como mínimo de:

- 1.** Un **subsistema limitante**. El criterio 1A impone a la célula una estructura, la **membrana plasmática**, capaz de impedir que los componentes celulares salgan del sistema, se pierdan y la célula deje de existir como tal. Como esos componentes son polares, por hallarse en un medio acuoso, las moléculas de la membrana plasmática deben ser a la vez apolares (para impedirles el paso) y polares (para poder existir en un entorno acuoso). Hay moléculas con estas características, como los **glicerofosfolípidos** que estudiaremos en la Unidad 2.
- 2.** Un **subsistema metabólico** (criterio 1B). Se trata esencialmente de un reactor químico fluido capaz de sintetizar sus propios componentes moleculares y los de los otros subsistemas a partir de **nutrientes** de alto contenido energético. Se corresponde con el **citoplasma** celular.

3. Un **subsistema informativo** (criterio 1C). Consta de una o varias moléculas de un polímero capaz de duplicarse y, a la par, controlar el crecimiento celular. El **ADN** puede cumplir este propósito gracias a que cada una de sus hebras es una especie de copia en negativo de la otra; si se separan, cada hebra podrá servir de “molde” para regenerar su complementaria.

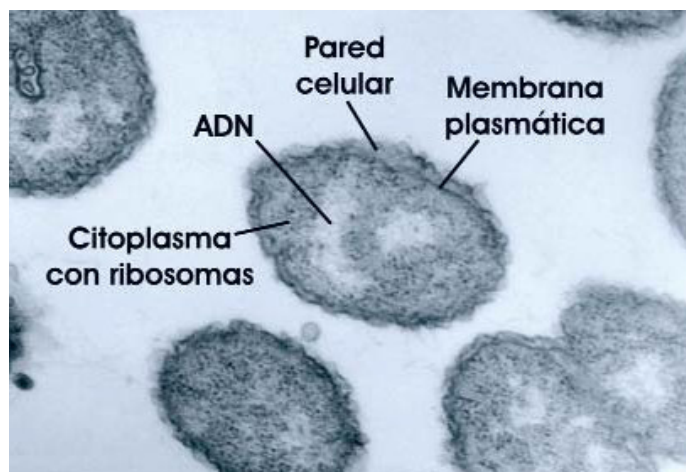


Ilustración 1.39. Micrografía electrónica de la bacteria *Neisseria gonorrhoeae*, causante de la gonorrea, aumentada 100 000 veces (Fuente: <http://phil.cdc.gov/phil>).

Existen en la actualidad células que se hallan próximas a este modelo. Sin embargo, todas las células conocidas incorporan, además de los tres subsistemas mínimos, otros elementos adquiridos en el transcurso de la evolución [véase la ilustración 1.39]:

- Todas tienen **enzimas**, catalizadores específicos capaces de acelerar una reacción metabólica concreta sin consumirse en el proceso. Suelen estar formadas por proteínas.
- La presencia de proteínas conlleva la necesidad de fabricarlas. Eso ocurre en corpúsculos llamados **ribosomas**. Los ribosomas necesitan “planos” que les indiquen en qué orden deben disponer los aminoácidos que forman la secuencia de cada proteína. Los **ácidos nucleicos** (ARN o ADN) asumen ese papel.

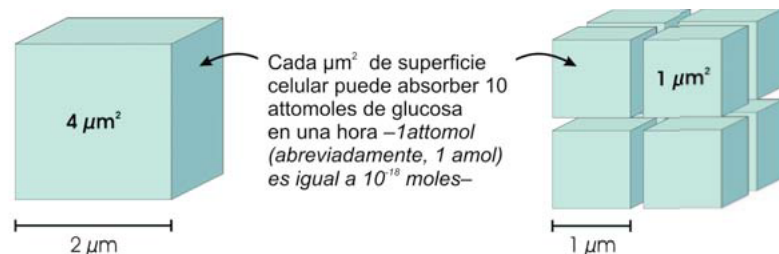
La energía libre que usan los seres vivos procede en última instancia del Sol [véase la ilustración 1.20]. Las llamadas células **fotótrofas** (literalmente, “que comen luz”) poseen moléculas coloreadas (**pigmentos**) capaces de captar la energía solar; ejemplos de tales moléculas son las **clorofilas** y los **carotenoides** que estudiaremos en las Unidades 8 y 9. Las células que se limitan a ingerir **nutrientes** y degradarlos a moléculas menores, liberando su energía, se llaman **quimiótrofas**.

3.3. Formas, dimensiones y tipos celulares

Otra característica que comparten la inmensa mayoría de las células es su tamaño. Muchas de ellas miden entre 2 y 30 μm de longitud, lo que significa que en un cubo de 1 cm de arista pueden acomodarse entre 70 y 200 000 millones de células.

¿Por qué no suelen ser más grandes? La razón es que los nutrientes han de entrar en las células a velocidades apropiadas a su ritmo metabólico. Ahora bien, este movimiento de moléculas está restringido por factores que dependen del tamaño celular:

- *Las distancias a las que han de difundir.* Si las células fuesen muy grandes las moléculas nutritivas podrían tardar en difundirse por todo el citoplasma. Ello limitaría la capacidad de las células para controlar su metabolismo. En las reacciones químicas que se llevan a cabo en un laboratorio esto no supone ningún problema, ya que se puede agitar el matraz de la reacción para mezclar bien los ingredientes; pero la célula carece de dispositivos de agitación.
- *La superficie efectiva de las células.* Una superficie grande en relación al volumen celular permite entrar a muchas moléculas por unidad de tiempo. Pero la relación superficie/volumen, y con ella el flujo de nutrientes, disminuye al aumentar el tamaño [véase la ilustración 1.40].



"Célula" cúbica de 2 μm de lado
 Superficie total: 24 μm^2
 Volumen: 8 μm^3
 Relación superficie/volumen = 3/1
 Absorción de glucosa = 240 amol/hora
Conclusión: Cada μm^3 de célula recibe 30 amol de glucosa por hora

Ocho "células" de 1 μm de lado
 Superficie total: 48 μm^2
 Volumen: 8 μm^3
 Relación superficie/volumen = 6/1
 Absorción de glucosa = 480 amol/hora
Conclusión: Cada μm^3 de célula recibe 60 amol de glucosa por hora

Ilustración 1.40. *Cuanto mayores son las dimensiones de una célula menor es su relación superficie/volumen y menor es la cantidad proporcional de nutrientes que recibe (Fuente: ASH).*

Ante los problemas que plantea tener un tamaño grande, la mayoría de las células ha "optado" por conservar un tamaño lo más reducido posible: las tres cuartas partes de toda la materia viva de la Tierra está constituida por células que por regla general tienen entre 0,5 y 2 μm de diámetro. Este tipo de células se llaman **procariotas**. Las **bacterias** son organismos formados por una sola célula procariótica. Son los seres vivos más antiguos de todos: se conocen posibles fósiles bacterianos en sedimentos

datados en 3556 millones de años. Hoy en día ocupan una gama de ambientes más amplia que la de ningún otro grupo de seres vivos.

Pero hay células que se han complicado enormemente la vida, pues su diámetro varía usualmente entre 10 y 100 μm y su volumen es de 100 a 10 000 veces superior al de las células procarióticas. Son las células **eucarióticas**.

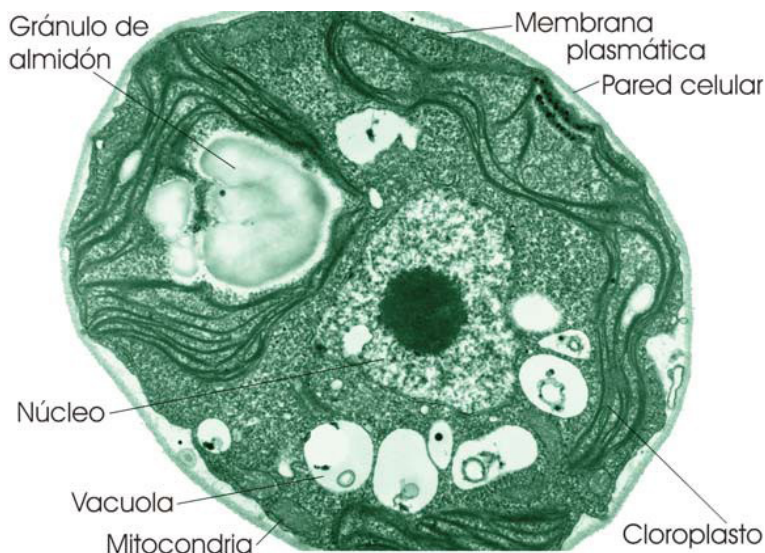


Ilustración 1.41. Micrografía electrónica del alga unicelular *Chlamydomonas reinhardtii*, mostrando algunos orgánulos típicos de una célula eucariótica (Fuente: <http://remf.dartmouth.edu/imagesindex.html>).

Las células eucariotas surgieron hace entre 900 y 2100 millones de años y forman parte de los **animales, plantas y hongos**, así como de los **protozoos** y de multitud de algas unicelulares (**cromistas**). ¿Cómo solventan los problemas asociados al gigantismo?

- El problema de la difusión lo han solucionado dividiendo su citoplasma en compartimentos, u **orgánulos**, que acortan la distancia a la que deben desplazarse las moléculas con el fin de entrar en colisión y reaccionar. Estos orgánulos son estructuras rodeadas por membranas similares a la membrana plasmática, tales como el *retículo endoplasmático*, las *mitocondrias* o los *cloroplastos*. Hasta las moléculas de ADN, de las que suelen presentar varias unidades empaquetadas con proteínas (**cromosomas**), se hallan rodeadas por una cubierta nuclear, formando el **núcleo** (de hecho, *eucariota* significa, en griego, “con verdadero núcleo”). En cambio, las células procarióticas poseen una sola molécula de ADN, sin proteínas ni cubierta nuclear.
- En cuanto a la disminución de la relación superficie/volumen, la han contrarrestado aumentando su área superficial mediante **microvellosidades** (pliegues de la membrana plasmática).

- Recientemente, sin embargo, se ha cuestionado la distinción entre procariotas y eucariotas basada en el tamaño celular. Por un lado, se han hallado bacterias descomunales observables a simple vista, como *Thiomargarita namibiensis*, del tamaño de una tilde ('). En el extremo opuesto, se conocen grupos de eucariotas, como los **nanoeucariotas** y los **picoeucariotas**, cuyo rango de tamaño (menor de 10 μm) se solapa con el de las bacterias. El alga mediterránea *Ostreococcus tauri* es el eucariota más diminuto jamás descrito: con un diámetro de 0,8 μm , conserva un cloroplasto, varias mitocondrias y un núcleo con 14 cromosomas.

Los descubrimientos más controvertidos conciernen a las llamadas **nanobacterias**, con tamaños del orden de 0,1 μm , o a estructuras filamentosas conocidas como **nanobios**, de hasta 0,02 μm , que aparentemente tienen ADN y pueden reproducirse por sí solas. Muchos biólogos opinan que carecen del espacio necesario para albergar moléculas indispensables para la vida —muchos nanobios son más pequeños que un ribosoma— y que son meros cristales en crecimiento; la detección de ADN se debería, según estos científicos, a contaminación por otros organismos. Para otros investigadores, en cambio, se trata de formas de vida esencialmente diferentes, quizá de origen extraterrestre, que obligarán a escribir nuevos capítulos en los libros de biología.

Como siempre, el tiempo y la investigación meticulosa decidirán quién tiene razón.

Actividades

21. En Oriente Próximo habita *Spalax ehrenbergi*, un topo subterráneo dotado de ojos rudimentarios (y, por tanto, ciego). ¿Cómo puede haber evolucionado este rasgo?
22. ¿Podrían ser seleccionados organismos que estuviesen mal adaptados, o no serlo los mejor adaptados? Propón ejemplos. ¿Qué enseñanzas se obtienen de ellos?
23. Una de las “leyes de la variación” de Darwin decía que cuanto más diversas sean las condiciones ambientales mayor cantidad de variación se producirá. Así se explicaría que los animales domésticos, criados bajo condiciones muy dispares, sean mucho más variados que sus contrapartidas salvajes (compárese la diversidad de perros con la de lobos). ¿Es aceptable esta explicación? Propón una alternativa.
24. Calcula la relación de superficie a volumen en *Neisseria gonorrhoeae*, la célula esférica de 0,5 μm de diámetro de la ilustración 1.39. Compárala con la relación de superficie a volumen en una ameba globular, cuyo diámetro es de 150 μm .

- 25.** Señala cuáles de los siguientes “objetos” pueden considerarse sistemas vivos, y justifica la respuesta:
- a. Un embrión congelado.
 - b. Una célula cancerígena.
 - c. Una neurona.
 - d. Un virus.
 - e. La llama de un mechero.
 - f. Una máquina de von Neumann (autómata capaz de construir duplicados de sí mismo y de transferir a sus “hijos una copia de su programa).



RECUERDA

Toda célula debe estar integrada por los siguientes sistemas:

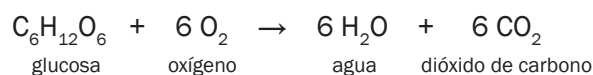
- Un **subsistema limitante**, formado por una **membrana plasmática** que rodea a la célula e impide la dispersión de sus componentes, pero permite los intercambios selectivos de nutrientes a su través.
- Un **subsistema energético**, el **citoplasma**, que es un medio fluido en el que ocurren las reacciones metabólicas que sintetizan los componentes propios y de los demás subsistemas. Posee mecanismos **enzimáticos** para captar la energía solar o la almacenada en **nutrientes** y conservarla en forma de moléculas como el **ATP**, que constituye el “combustible” celular que le permitirá realizar trabajo.
- Un **subsistema informativo**, formado por una o varias moléculas de **ADN** que almacenan la información necesaria para sintetizar las enzimas y las demás proteínas (en los ribosomas). Una molécula de ADN es capaz de duplicarse, transmitiéndose una copia a cada célula hija durante la mitosis. A veces se dan errores durante la duplicación y, si se transmiten a la descendencia a través de los gametos, originan cambios (**mutaciones**) sobre los que puede operar la **selección natural**.

Las células pueden ser de dos tipos básicos:

- Las **células procariotas**, pequeñas, con una única molécula de ADN no separada del resto del citoplasma. Carecen de orgánulos. Son las células de las bacterias.
- Las **células eucariotas** son mayores y poseen varias moléculas de ADN asociadas a proteínas (**cromosomas**) y rodeadas por una **cubierta nuclear**. Poseen **orgánulos** muy diversos. Se hallan en protozoos, cromistas, hongos, animales y plantas.

Solucionario

1. El corcho forma la cubierta protectora que desarrollan algunas plantas leñosas, como el alcornoque, en sustitución de la epidermis. Se desarrolla a partir de un meristemo (tejido embrionario) secundario, el felógeno o cámbium suberógeno, que, como todos los tejidos, está formado por masas vivas, más o menos esféricas, a las que hoy llamamos **células**. Pero las células vegetales están englobadas en una especie de coraza, la **pared celular** (formada principalmente por **celulosa**), en cuyo interior cada célula posee su propia cámara; al desarrollarse el corcho la célula muere, dejando un hueco que generalmente se llena de aire, mientras que el entramado protector que lo rodea se engrosa con una sustancia impermeable llamada **suberina** y forma las “paredes” de las cellulae que observó Hooke.
2. Con el objetivo y el ocular indicados, el aumento total es de $97 \times 30 = 2910$ veces. Por consiguiente, un objeto de $0,8 \mu\text{m}$ de diámetro tendrá un tamaño aparente de $2910 \times 0,8 \mu\text{m} = 2328 \mu\text{m} = 2,3 \text{ mm}$. Sin embargo, todas las estructuras internas de la célula con un tamaño aparente inferior a unos $0,6 \text{ mm}$ (la cuarta parte del tamaño de la bacteria) apenas se verán como algo más que un objeto borroso por muchos aumentos que apliquemos, ya que ese tamaño aparente se corresponde con $0,2 \mu\text{m}$ reales, que es el máximo poder de resolución de un microscopio óptico. En definitiva, sí podrá ver la bacteria, pero no podrá estudiar la estructura del organismo, que es lo que se proponía.
3. $100 \times 200 = 20\,000$ aumentos.
4. Entre 20 y 33 capas según tengan un espesor de 50 o de 30 nm, respectivamente.
5. A se ha obtenido con un microscopio electrónico de barrido; B se ha logrado con un microscopio óptico; C se ha conseguido con un microscopio electrónico de transmisión.
6. Los conocimientos actuales nos permiten rechazar el preformismo, aunque la epigénesis, hoy aceptada, es bastante diferente de la que propugnaba Buffon. Para los genetistas, lo que transmiten los padres a la descendencia es un conjunto de moléculas (de ADN) que contienen *información* para que se expresen los distintos rasgos que caracterizan al organismo, pero no las partículas que constituyen su cuerpo —los ladrillos de construcción, por así decirlo— y que, según Buffon, se encontraban en los líquidos seminales. Las moléculas de ADN que “viajan” en el óvulo se combinan en el cigoto con las que transporta el espermatozoide, se duplican en cada división celular y organizan la diferenciación del organismo.
7. Puesto que la glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) contiene, además de oxígeno, solo carbono e hidrógeno, al quemarla en presencia de oxígeno (O_2) se obtendrá exclusivamente dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). La ecuación del proceso, ajustada para que haya el mismo número de átomos de cada elemento a ambos lados de la misma, es:



8. En primer lugar, si la respiración ocurría en los pulmones la temperatura de éstos debería ser superior a la del resto del organismo, ya que es ahí donde se liberaría el calor. Por supuesto, esto no es así. Además, muchos seres vivos, como las plantas, también respiran, aunque no tengan órgano respiratorio alguno. Lo mismo ocurría con tejidos aislados de animales recién sacrificados, que, pese a sus muy diversas procedencias (músculo, cerebro, riñón... y no solo pulmones), eran capaces de consumir oxígeno y producir dióxido de carbono; es decir, la respiración es algo que ocurre en todos los tejidos del ser vivo. En todo caso, resultaba problemático entender cómo podía tener lugar una combustión sin llama, lo que ponía en entredicho el papel de la respiración como generadora del calor animal.
9. Los estudiosos de granos de polen (palinólogos) suelen enfocar su atención en la superficie de los mismos, ya que sus rasgos superficiales permiten identificar la planta que los produjo. En tal caso, el microscopio más apropiado es el MEB, que permite formar una imagen tridimensional. Pero si lo que se pretende es observar el interior del grano de polen (su organización celular), bastará con un buen microscopio óptico, ya que el tamaño del grano de polen (80 μm) es muy superior al límite de resolución de este instrumento (0,2 μm).
10. La persona “normal” y la anémica tienen moléculas de hemoglobina algo diferentes (es más ligera la molécula de hemoglobina del individuo “normal”, ya que migra a más velocidad al aplicar el campo eléctrico). El hijo de ambos tiene en sus glóbulos rojos los dos tipos de hemoglobina, ya que en la electroforesis se aprecian dos manchas (situadas aproximadamente a la altura de las correspondientes a cada uno de sus progenitores).
11. La rata utiliza la glucosa para “quemarla” lentamente en el interior de sus células, durante el proceso de la respiración. Pero, según vimos en la actividad 7, la combustión de la glucosa proporciona únicamente dióxido de carbono y agua. Puesto que el dióxido de carbono es el que contiene los átomos de carbono que pertenecían a la glucosa, lo que comprobaríamos es que la rata espira dióxido de carbono radiactivo.
12. Los organismos obtienen del entorno energía de elevada calidad y utilizan parte de ella (energía útil) para realizar trabajo, básicamente para organizar sus moléculas y mantener o incrementar sus estructuras ordenadas. A cambio, devuelven una cantidad equivalente de energía al entorno, en forma de productos de deshecho y, sobre todo, de calor, que se disipa por los alrededores agitando las moléculas e incrementando el grado de desorden. Da la impresión, pues, de que los organismos “extraen orden” del entorno, dejándolo convertido en algo más desordenado; de ahí la expresión *orden a partir del desorden*.
13. Por supuesto que no. Las aves y mamíferos poseemos mecanismos que ralentizan la disipación de calor por el entorno (por ejemplo, las plumas, el pelo, la grasa subcutánea y, en el ser humano, la ropa) y retardan la consecución del equilibrio térmico. Pero, además, podemos utilizar la segunda ley a nuestro favor: como nos obliga a dispersar buena parte de la energía que adquirimos con los alimentos, dejemos que esa dispersión (en forma de calor) ocurra en el interior de nuestros cuerpos; de esta manera compensaremos el calor que se pierde en contacto con el exterior y podremos mantener una temperatura relativamente constante.
14. Cada molécula de agua tiene dos pares de electrones sin compartir y dos hidrógenos con $\delta+$, exactamente el número necesario como para que se puedan formar hasta cuatro enlaces con moléculas vecinas [véase la ilustración 1.26] que involucren a todos los hidrógenos. En cambio, el amoníaco solo tiene un par sin compartir, pero tres $\delta+$, por lo que en un conjunto de moléculas de amoníaco siempre quedarán átomos de hidrógeno sin enlazar, y se transformará en gas con mayor facilidad que el agua. Por esta razón, en la Tierra el amoníaco no podría ser un sustituto del agua como líquido celular. Desde luego, en algún mundo con una temperatura lo suficientemente baja o una presión lo suficientemente alta el amoníaco podría

ser el sustituto perfecto, ya que en esas condiciones posee propiedades comparables a las del agua.

- 15.** Puesto que $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$, despejando obtenemos que $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$. Para un pH 6, $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-6}$ M. Es decir, tiene una concentración de 0,000001 moles de H_3O^+ (o, lo que es casi lo mismo, de H^+) por litro de disolución.
- 16.** Más básica. La concentración de protones ha disminuido de 10^{-3} M a 10^{-6} M.
- 17.** En el plasma de una persona normal, $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7.4} = 3,98 \times 10^{-8}$ M, mientras que en el paciente de cetoacidosis $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7.1} = 7,94 \times 10^{-8}$ M. Por lo tanto:

$$\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{cetoacidosis}}}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{normal}}} = \frac{7,94 \times 10^{-8}}{3,98 \times 10^{-8}} \approx 2$$

Es decir, la concentración de iones oxonio en el paciente es el doble que en la persona sana. Esto se debe a que la escala de pH es una escala logarítmica, no lineal, por lo que una disminución de una unidad de pH representa multiplicar por diez la concentración de protones.

- 18.** El exceso de CO_2 reacciona con H_2O produciéndose H_2CO_3 , que se descompondrá en HCO_3^- y H^+ . De esta manera aumentará la concentración de H^+ , o sea, disminuirá el pH (el plasma sanguíneo se volverá más ácido).
- 19.** La ribulosa tiene 4 grupos alcohol y un grupo carbonilo (cetona). La tirosina tiene 1 grupo alcohol, 1 grupo amino, 1 grupo carboxilo y 1 grupo fenilo.
- 20.** Aunque ambos compuestos tengan los mismos átomos, su disposición espacial es diferente. En particular, se agrupan formando distintos grupos funcionales, que son los que confieren a las moléculas orgánicas sus propiedades características. En la ilustración 1.32 aparecen, justamente, el etanol como ejemplo de alcohol y el éter dimetílico como ejemplo de éter. La posibilidad de que el grupo alcohol pueda formar enlaces de hidrógeno, pero el éter no, hace que el primero tenga un punto de ebullición relativamente alto (hace falta energía para romper enlaces de hidrógeno), mientras que el segundo es muy volátil.
- 21.** En primer lugar, no es lícito decir que “se les han atrofiado los ojos a fuerza de no usarlos”, o afirmaciones parecidas. El que en una población se haya fijado ese rasgo indica que probablemente confiera a sus portadores mayor eficacia biológica (mayor posibilidad de tener descendientes) respecto a los que no lo poseían. Así pues, la pregunta que tenemos que hacernos es: *¿por qué, en una hipotética población formada por roedores subterráneos con diferente grado de desarrollo de los ojos, tenderían a reproducirse más aquellos que los tienen reducidos?* Las respuestas pueden ser especulativas (quizá la energía que ahorran en desarrollar ojos la invierten en leche para sus hijos, en buscar comida o en excavar túneles; quizá evitan las infecciones oculares que se producirían al llenárseles los ojos de tierra; quizá el área del cerebro habitualmente dedicada a la visión la emplean en otros sentidos que les permiten orientarse mejor), pero lo importante es saber formular la pregunta adecuada.
- 22.** Los peces gupis machos con colores vistosos atraen más a los depredadores que sus congéneres de colores apagados, por lo que estarán peor adaptados; sin embargo, serán seleccionados porque también atraen más a las hembras de su propia especie y, por lo tanto, tendrán más oportunidades de reproducirse (es decir, tendrán mayor eficacia biológica). En el extremo opuesto, si un individuo perfectamente adaptado (por ejemplo, el leopardo más fuerte, más veloz, más hábil en la caza y más resistente a las enfermedades) es estéril su eficacia

biológica será nula y no será seleccionado. Estos ejemplos muestran que la selección natural actúa exclusivamente sobre la eficacia biológica. Habitualmente habrá una correlación positiva entre la eficacia biológica y la adaptación, de modo que, indirectamente, serán seleccionados los individuos mejor adaptados; pero, como vemos, no siempre es necesariamente así.

- 23.** Las mutaciones se dan con la misma frecuencia en los organismos domésticos y en los silvestres, y lo mismo se aplica a las otras causas de la variación. Es decir, no aparecen más variaciones en unas poblaciones que en otras. Lo que ocurre es que, en la naturaleza, la selección natural tenderá a eliminar despiadadamente a los organismos que se aparten de la norma, ya que generalmente estarán peor adaptados a un ambiente que suele ser bastante estable. Pero bajo domesticación, donde el animal no tiene que luchar por conseguir comida y está protegido de los depredadores, de las enfermedades y de las inclemencias del tiempo, la selección natural está muy “relajada” y pueden persistir variantes que, en la naturaleza, serían por completo inviables (piénsese, por ejemplo, en un perro caniche, que probablemente estaría incapacitado para cazar o para huir de otros depredadores).
- 24.** El volumen de una esfera es $V = (4/3)\pi r^3$ y su superficie $S = 4\pi r^2$, siendo r el radio, por lo que la relación de superficie a volumen será: $S/V = 4\pi r^2 / (4/3)\pi r^3 = 3/r$. Como el radio r es igual a $d/2$, siendo d el diámetro, tendremos que la relación superficie a volumen se expresará por la fórmula: $S/V = 6/d$. En *Neisseria gonorrhoeae*, $S/V = 6/(0,5 \mu\text{m}) = 12/1$, y en la ameba, $S/V = 6/(150 \mu\text{m}) = 0,04/1$. Por consiguiente, la relación S/V de *Neisseria gonorrhoeae* será $12/0,04 = 300$ veces mayor que la de la ameba. Es decir, si todos los nutrientes tienen que entrar por la membrana, cada unidad de volumen de *Neisseria gonorrhoeae* “dispone” de una superficie 300 veces superior a la de la ameba, y su ritmo metabólico será más rápido.
- 25. a.** Un embrión congelado carece de metabolismo y no reacciona frente a estímulos externos o internos (criterio 1B), pero la situación es reversible y estará potencialmente vivo.
- b.** Una célula cancerígena cumple todos los criterios menos el 2C (es potencialmente inmortal), pero como se trata de un criterio no absoluto se la considera un ser vivo.
- c.** Podría considerarse que una llama tiene “metabolismo” (disipa energía), pero no está controlado por un subsistema informativo (criterio 1C), por lo que no está viva.
- d.** Un virus carece de metabolismo propio (criterio 1B) y, según Gánti, no debería considerarse un ser vivo.
- e.** Aunque una neurona no pueda reproducirse (criterio 2A) es un sistema vivo porque cumple todos los criterios absolutos (1A, 1B y 1C).
- f.** Una máquina de von Neumann cumple todos los criterios, tanto absolutos como potenciales, excepto el 1B, ya que la energía no se controla por medios químicos, sino mecánicos y eléctricos.

Glosario

Abiogénesis

Surgimiento de la vida a partir de materia no viva.

Fotólisis del agua

Ruptura de la molécula de agua por acción de la radiación solar, dando lugar a oxígeno, electrones e iones de hidrógeno.

Homeostasis

Conjunto de mecanismos conducentes al mantenimiento de una relativa constancia en las composiciones y las propiedades del medio interno de un organismo.

Irritabilidad

Capacidad que posee todo organismo para detectar, interpretar y responder a los estímulos (cambios en el ambiente).

Isótopos

Variaciones atómicas de un elemento químico, con el mismo número de protones pero diferente número de neutrones.

IUPAC

Siglas, en inglés, de la *Unión Internacional de Química Pura y Aplicada*, organización no gubernamental dedicada al desarrollo de las reglas de nomenclatura química.

Lente acromática

Lente hecha de distintos tipos de vidrio que permite la refracción de la luz sin descomponerla en los colores que la integran, lo que forma imágenes más nítidas.

Mecánica cuántica

Rama de la física que postula que, a escala subatómica, la energía no se intercambia de forma continua, sino en cantidades discretas o cuantos, y que el movimiento de una partícula se describe como la evolución de una onda.

Mecanicismo

Doctrina que explica todos los fenómenos, incluidos los que ocurren en los seres vivos, en términos de leyes de la naturaleza, sin recurrir a causas sobrenaturales.

Mitosis

Proceso de división del núcleo celular en dos núcleos hijos, cada uno de ellos con el mismo número y tipo de cromosomas que el núcleo inicial.

Movimiento térmico

Vibraciones, oscilaciones y traslaciones aleatorias que experimentan los átomos y moléculas de un cuerpo, cuya energía cinética media se mide por la temperatura.

Notocorda

Cordón esquelético elástico de los embriones de los cordados, que tiene por finalidad mantener la forma del cuerpo y servir de anclaje a los músculos.

Nutrición

Proceso que incluye el intercambio de materia y energía entre el exterior y el interior de un organismo y de cada una de sus células, así como su transporte interno y su transformación mediante el metabolismo celular (precedida, en los animales, por la digestión).

Nutriente

Cualquier sustancia que necesita una célula para sus procesos metabólicos. Los nutrientes pueden ser inorgánicos — como el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono, ciertos iones minerales (cloruros, nitratos, sulfatos...) y, en ocasiones, el nitrógeno del aire— u orgánicos, tales como la glucosa, el colesterol, los ácidos grasos, los aminoácidos...

Respiración

Descomposición de una molécula compleja para liberar la energía que contiene, hasta convertirla en sustancias sencillas (dióxido de carbono, amoníaco, agua) que ya no poseen energía útil. Generalmente el proceso ocurre gracias a la acción del oxígeno.

Bibliografía

ASIMOV, I.: Fotosíntesis. Barcelona, Plaza & Janés, 1992.

Uno de los más conocidos divulgadores científicos, y también afamado escritor de ciencia-ficción, nos muestra con estilo claro y ameno el proceso del que depende la vida. Aunque se trata de un libro antiguo (fue escrito en 1968), su principal atractivo es que, partiendo de preguntas casi triviales (¿por qué no se agotan la comida ni el oxígeno?), logra introducirnos en la comprensión de los esfuerzos de tantos científicos por desentrañar el mecanismo de la fotosíntesis.

CAIRNS-SMITH, A. G.: Siete pistas sobre el origen de la vida. Madrid, Alianza, 1990.

El autor, emulando a Sherlock Holmes, va buscando “pistas” entre los seres vivos actuales para intentar averiguar su origen, lo que le permite explorar la estructura y funcionamiento de las células desde una perspectiva sorprendente, prescindiendo de tecnicismos.

DE DUVE, C.: La célula viva (2 tomos). Barcelona, Prensa Científica, 1988.

En este libro, su autor, premio Nobel de Medicina, nos introduce en un maravilloso viaje por el interior de una célula eucariótica viva, reduciéndonos con la imaginación al tamaño de bacterias y permitiéndonos nadar a nuestro gusto por su interior. Combina magistralmente la amenidad y el rigor científico, y constituye la mejor forma de adentrarse en los contenidos de la asignatura.

MAYNARD SMITH, J., Y SZATHMÁRY, E.: Ocho hitos de la evolución. Barcelona, Tusquets, 2001.

Obra que recorre de forma panorámica la evolución de los seres vivos, desde el origen de la vida hasta la aparición del lenguaje, jalonándola de una serie de “transiciones principales” (la aparición de las células, el surgimiento del sexo, la emergencia de la pluricelularidad...). Dirigido a un público no especializado, hace hincapié en los principales problemas que deben resolver los biólogos y trata muchos de los aspectos de la asignatura desde una perspectiva evolutiva.

SCHRÖDINGER, E.: ¿Qué es la vida? Barcelona, Tusquets, 1983.

Es uno de los textos más influyentes en la historia de la Biología, escrito en 1944 por uno de los físicos más prestigiosos. Schrödinger, presentándose a sí mismo como un “físico ingenuo”, intenta dilucidar —con prosa clara y argumentos persuasivos— los problemas de la herencia y la organización celular; parte únicamente de consideraciones físicas y predice la estructura de los genes antes del descubrimiento de la doble hélice.

SOL, C. Y OTROS: Selectividad Biología: pruebas de 2006. Madrid, Anaya, 2007.

Es un libro bastante económico en el que se plantean y se resuelven las cuestiones formuladas en pruebas de acceso a la Universidad de toda España.

TEIXIDÓ, F.: Biología. Schaum. Madrid, McGraw-Hill/Interamericana, 2005.

Adaptado al currículo vigente de segundo curso de bachillerato, en cada uno de sus capítulos se resumen de forma concisa los principales conceptos de Biología, se aportan instrucciones y consejos para no cometer errores en los exámenes y se proponen y resuelven multitud de ejercicios y problemas. Útil para preparar las pruebas de acceso a la Universidad.

VOGEL, G. Y ANGERMANN, H.: Atlas de biología. Barcelona, Omega, 1987.

Se trata de un libro que conserva plena vigencia en la presentación de los contenidos básicos de la Biología de forma esquemática y asociada siempre a ilustraciones claras y detalladas.

WATSON, J.: La doble hélice. Barcelona, Salvat, 1987.

Best-seller internacional desde su publicación, en 1968, narra de forma autobiográfica los acontecimientos que desembocaron en el descubrimiento de la estructura del ADN. Constituye una interesante descripción del modo en que trabajan los científicos, de sus anhelos y sus mezquindades; en suma, un relato de la naturaleza del éxito.

Aviso legal

El contenido de esta unidad es adaptación del existente en el libro de Biología para 2º de Bachillerato a distancia (NIPO: 660-09-096-2).

Adaptación: César Martínez Martínez
Asesor Técnico Docente Biología y Geología. CIDEAD, 2016.

La utilización de recursos de terceros se ha realizado respetando las licencias de distribución que son de aplicación, acogiéndonos igualmente a los artículos 32.3 y 32.4 de la Ley 21/2014 por la que se modifica el Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual. Si en algún momento existiera en los materiales algún elemento cuya utilización y difusión no estuviera permitida en los términos que aquí se hace, es debido a un error, omisión o cambio de licencia original.

Si el usuario detectara algún elemento en esta situación podrá comunicarlo al CIDEAD para que tal circunstancia sea corregida de manera inmediata.

En estos materiales se facilitan enlaces a páginas externas sobre las que el CIDEAD no tiene control alguno, y respecto de las cuales declinamos toda responsabilidad.



DIRECCIÓN GENERAL DE
FORMACIÓN PROFESIONAL

