



BLOQUE II. LA CÉLULA VIVA. MORFOLOGÍA, ESTRUCTURA Y FISIOLOGÍA CELULAR

TEMA 6. CÉLULA EUCARIÓTICA. FUNCIÓN DE REPRODUCCIÓN

- 6.1. El ciclo celular. Interfase y división celular.
- 6.2. Mitosis: etapas e importancia biológica.
- 6.3. Citocinesis en las células animales y vegetales.
- 6.4. La meiosis: etapas e importancia biológica.

6.1. EL CICLO CELULAR. INTERFASE Y DIVISIÓN CELULAR

Uno de los principios de la teoría celular es el que afirma que toda célula procede de otra célula y todo ser vivo proviene de otro ser vivo. Es una de las características propias y exclusivas de la vida el realizar copias o reproducirse. Hay diferentes maneras de hacerlo. Aquí se tratará del proceso de reproducción celular asexual o mitosis.

Causas desencadenantes de la división celular:

- a) Cuando la relación **tamaño del núcleo / tamaño del citoplasma** (tamaño referido a volumen) se desequilibra en el sentido de un mayor crecimiento del citoplasma, el núcleo se duplica para seguidamente dividirse en dos el citoplasma, restableciéndose el equilibrio. La causa última parece ser la falta de control del citoplasma por parte del núcleo que queda muy alejado de algunas regiones celulares.
- b) Las **necrohormonas**, son sustancias producidas por células destruidas por una lesión (una herida por ejemplo) y que inducen la división de las células próximas (en seres pluricelulares): se trata de reponer el tejido destruido. Estos procesos de proliferación celular están perfectamente regulados para evitar un excesivo número de nuevas células.
- c) Hay diversas **sustancias químicas** que influyen en la división celular. Por ejemplo, se emplean "hormonas" vegetales para que a los esquejes de plantas les salgan raíces. La misma hormona del crecimiento en humanos promueve las divisiones celulares en muchos tejidos a lo largo de toda la infancia y la adolescencia.

Se conoce como **ciclo vital celular o ciclo celular** al conjunto de todos los procesos que tienen lugar desde que una célula "nace" por división de una célula precursora (madre) hasta que se divide en dos (células hijas). También puede definirse como el período de tiempo que transcurre desde que se forma una célula hasta que ésta se divide, dando lugar a nuevas células. Por lo tanto, el ciclo celular es todo lo que sucede a una célula entre dos divisiones celulares sucesivas. De todo lo anterior se deduce que el ciclo celular es la vida de la célula y cuanto en ella acontece.

El ciclo celular consta de cuatro períodos: G₁, S, G₂ y M. Los períodos G₁, S y G₂, comprendidos entre dos divisiones sucesivas, reciben el nombre de **interfase** o **período de reposo** (un nombre nada acertado). La fase M comprende la división del núcleo y la del citoplasma (cariocinesis y citocinesis respectivamente).

El **período G₁** de la interfase tiene una duración variable. Es el período postmitótico y en él se produce síntesis del ARNm y de proteínas. La célula, si es de tipo animal, posee un solo diplosoma (con sus dos centriolos). Que la célula fabrica proteínas quiere decir que está realizando reacciones químicas (metabolismo) y que por lo tanto está en plena actividad: se nutre y se relaciona. El **período S** tiene una duración, en general, más corta que la fase G₁. Es el período en el que se produce la replicación del ADN y, por tanto, la duplicación de la cromatina, apareciendo

parejas de moléculas de ácido nucleico (tantas como cromosomas tenga la célula). Las dos fibras se mantienen unidas por un punto que denominamos centrómero. Continúa la síntesis del ARNm y también se sintetizan histonas. Junto a cada centriolo del diplosoma se forma un procentriolo. Cuando se ha terminado de hacer lo anteriormente comentado, la célula continúa con sus actividades “normales” (producción de ARNm y proteínas), Dado que el proceso de síntesis consume una gran cantidad de energía, la célula entra nuevamente en un proceso de crecimiento y adquisición de ATP. Es la fase **G₂**. La energía adquirida durante la fase **G₂** se utilizará para el proceso de mitosis. Esta fase tiene una duración generalmente también corta (unas pocas horas); es el período premitótico. Cuando una célula se diferencia y no va a dividirse más, entra en una fase de “reposo” continuado que se ha dado en llamar periodo **G₀**. (El hecho de que esté sintetizándose ARNm significa que la célula no está realmente en “reposo”: si hay ARNm es que se están fabricando proteínas, fundamentalmente enzimas, que intervendrán en unas u otras reacciones químicas. Y por supuesto, sintetizar ATP implica estar nutriéndose y realizando complejos procesos metabólicos. Hay que insistir en lo desafortunado del término “en reposo”).

Estas etapas del ciclo celular están reguladas de modo muy complejo por la acción de muchos genes. Como curiosidad se puede decir que en estos momentos, en la investigación contra el cáncer se estudian las proteínas que regulan los periodos celulares con el fin de poder interrumpir los procesos de mitosis en las células cancerosas y así evitar la proliferación de las mismas.

6.2. MITOSIS: ETAPAS E IMPORTANCIA BIOLÓGICA

La **mitosis** es el proceso de **división celular** mediante el cual, a partir de una célula madre, aparecen dos células hijas con idéntica dotación cromosómica que la progenitora. Existen dos significados para el término mitosis: en sentido amplio acaba de ser definido pero en un sentido más restringido se refiere solo a la división del núcleo o cariocinesis [es frecuente que en Biología y Geología aparezcan términos que pueden generar confusión por emplearse para designar un todo y también una de sus partes].

La **mitosis** entendida como **cariocinesis** se ha dividido para su mejor estudio en cuatro fases: **profase, metafase, anafase y telofase**.

a) **Profase**. La profase se inicia con el hinchamiento del núcleo, debido al paso del agua del citoplasma a través de la doble membrana nuclear. Cada conjunto de dos fibras de cromatina idénticas (producto de la replicación del ADN) comienza a condensarse o arrollarse formando un solo cromosoma, con sus dos cromátidas que continuarán unidas a través del centrómero. Los nucléolos se deshacen al principio de la división y desaparecen. La membrana nuclear se rompe, desapareciendo casi toda al final de esta fase y poniéndose en contacto el nucleoplasma y el hialoplasma (la lámina nuclear parece intervenir en este proceso).

En las células animales, los dos diplosomas se separan (el que había se ha terminado de duplicar a partir de los procentriolos) y se sitúan en extremos opuestos de la célula, constituyendo los dos **polos** de la célula en división. En el hialoplasma se originan unas fibras de microtúbulos, que van de diplosoma a diplosoma formando el **huso mitótico o acromático**. Los cromosomas se dirigen hacia el **plano ecuatorial** de la célula. En las células vegetales, que no poseen centriolos, los microtúbulos del huso son organizados por regiones del citoplasma (llamadas centros organizadores de los microtúbulos). La estructura resultante de microtúbulos es muy semejante a la de las células animales pero menos visible.

b) **Metafase**. En la metafase, la membrana nuclear desaparece totalmente [Hay excepciones]. Los cromosomas, que ya están completamente replegados o condensados, se sitúan en forma de V (cada rama de la V es doble) con el centrómero en el vértice de la V dirigido hacia el huso acromático y los cuatro brazos del cromosoma dirigidos hacia la periferia celular. La estructura así formada se denomina **placa ecuatorial**, ya que todos los cromosomas se disponen en el “plano ecuatorial”. (Se trata de una analogía de la célula con el globo terráqueo: es también aproximadamente esférica y posee dos polos y ecuador).



c) **Anafase.** El período de anafase comienza con la separación de las cromátidas al escindirse los centrómeros. Así, se separan los “cromosomas hijos”, que se dirigen hacia los polos (un integrante del par se dirige hacia un polo y el otro integrante hacia el polo opuesto). Las fibras del huso se acortan y parece que literalmente tiran de las cromátidas de cada cromosoma doble. Recuerda que ambas cromátidas son idénticas pues fueron el resultado de la duplicación del ADN en el periodo de síntesis.

d) **Telofase.** En la telofase los dos grupos de cromosomas, **formados cada uno de ellos por una sola cromátida**, alcanzan los polos desapareciendo las fibras del huso. Los cromosomas se desespiralizan (o desenrollan) y a partir de las membranas del retículo endoplasmático y los restos de la lámina nuclear se forma la nueva membrana nuclear. También se constituyen los nucléolos. El final de esta fase es también el fin de la cariocinesis. El resultado es una célula con dos núcleos idénticos en información genética.

Tras la cariocinesis, la célula comenzará la citocinesis, proceso de división del citoplasma, que llevará a la formación de dos nuevas células, cada una con el núcleo formado anteriormente. Hay diferentes modos de realizar la citocinesis que serán expuestos más adelante.

IMPORTANCA BIOLÓGICA DE LA MITOSIS

La mitosis es un proceso, común a todo tipo de células eucarióticas, haploides o diploides, mediante el cual se garantiza que las células hijas tengan el mismo número de cromosomas que la célula madre y la misma información genética (idéntica en cantidad y en “calidad”). Se trata de una reproducción **asexual**.

En los organismos unicelulares es un mecanismo normal de reproducción y en los pluricelulares es necesario que durante su crecimiento y desarrollo, desde el mismo cigoto, las nuevas células que se forman tengan **toda** la información genética y que obviamente sea la **misma** información genética (el mismo número de cromosomas) que el resto de las células del organismo. De igual forma, cuando se reparan los tejidos dañados, las nuevas células deben ser idénticas a las que reemplazan.

Otro tema diferente es que una célula de un organismo pluricelular solo emplee una pequeña parte de toda la información de la que dispone, que será la que necesite para llevar a cabo sus funciones dentro del organismo una vez que se haya especializado o **diferenciado**. Recuerda que todas y cada una de nuestros billones de células proceden de un cigoto ¡todas por mitosis!

En la reproducción asexual (ahora nos referimos a organismos unicelulares):

- Las **células hijas son idénticas** a la célula de la cual proceden, puesto que son producidas como resultado de la división celular por mitosis.
- Como consecuencia, la descendencia tiene **las mismas ventajas o desventajas** que las células progenitoras para sobrevivir en un medio determinado.
- **Un solo individuo** es suficiente para llevar a cabo el proceso.

Así, la mitosis tiene la ventaja de la sencillez, pero la desventaja de no crear variedad. Y parece que son las variaciones las que han asegurado, por una parte, la diversidad de los seres vivos y, por otra parte, la propia supervivencia de las especies.

Conocemos casos de reproducción asexual en seres pluricelulares (no se trata de mitosis): los olivos se obtienen a partir de una rama de otro; una estrella de mar puede regenerar dos individuos si la cortamos por la mitad. Hay casos excepcionales (ni los olivos ni las estrellas se reproducen mediante fragmentos) y otros habituales (ciertos animales y vegetales), pero siempre estos seres cuentan además con un modo de reproducción sexual.

6.3. CITOCINESIS EN CÉLULAS ANIMALES Y VEGETALES

Existen dos modos de hacer la citocinesis: la que presentan las células animales y la que realizan las células vegetales.

En las células animales, la membrana plasmática se invagina por la zona ecuatorial (se estrecha) gracias a la actuación de fibras del citoesqueleto, que producen un surco anular (en forma de anillo). Los orgánulos citoplasmáticos se reparten equitativamente entre las dos porciones celulares; lógicamente, cada uno de los dos núcleos hijos quedará a un lado del estrechamiento. En las células vegetales, dada la existencia de una pared celular de naturaleza celulósica, la citocinesis se produce mediante la formación de un tabique intermedio de celulosa llamado **fragmoplasto** a partir de vesículas desprendidas del aparato de Golgi. Las membranas de las vesículas de Golgi serán las que formen la membrana plasmática de las nuevas células hijas, (el fragmoplasto va adquiriendo el aspecto de un disco que crecerá hasta tocar la membrana plasmática de la célula inicial). El fragmoplasto servirá posteriormente de base para que se deposite una pared celular a cada lado de él, quedando las dos células hijas perfectamente formadas. Tanto el fragmoplasto como luego las paredes, dejan finas perforaciones (plasmodesmos) a través de las cuales los citoplasmas de las dos células mantienen contactos, que es la forma que tienen las células vegetales de intercambiar materiales.

Formas especiales de citocinesis (o de división celular)

Existen varias modalidades de división celular, que se diferencian en la citocinesis, ya que el proceso de cariocinesis no admite variaciones. Se comentan las siguientes:

- 1- **Bipartición.** Tras la división del núcleo, el citoplasma se divide en dos partes aproximadamente iguales en tamaño. Es típica de muchos organismos unicelulares como la mayor parte de los grupos de protozoos, algas (también hay numerosos grupos unicelulares) y, por ejemplo, de las células en las primeras divisiones de los embriones de los seres vivos pluricelulares.
- 2- **Gemación.** Una vez que se ha duplicado el núcleo, se divide el citoplasma pero de manera desigual, resultando las dos células hijas de diferente tamaño. Es típica de las levaduras (grupo de hongos unicelulares).
- 3- **Esporulación.** Consiste en una serie de cariocinesis sucesivas dentro de la célula madre sin que tenga lugar la citocinesis. Posteriormente, cada núcleo hijo se rodea de una pequeña porción de citoplasma y membrana celular. En un momento dado, la célula madre se romperá liberando al medio multitud de células hijas que reciben el nombre de esporas. Este modo de división es típico de un grupo de protozoos llamados precisamente Esporozoos; como ejemplos pueden mencionarse el plasmodio (agente productor de la malaria o paludismo) y el toxoplasma (que produce la toxoplasmosis, una enfermedad leve para los humanos adultos pero muy peligrosa para los embriones).

6.4. LA MEIOSIS: ETAPAS E IMPORTANCIA BIOLÓGICA

Una de las características más notables y exclusiva de los seres vivos es la capacidad de perpetuación de los mismos a lo largo del tiempo, de modo que aunque los individuos mueren, las especies permanecen. Reproducirse es hacer copias de sí mismo. Ya sabemos que las instrucciones (o la información) que los seres vivos poseen se encuentra en forma de ADN traducible en proteínas y que el mismo proceso de reproducción incluye mecanismos de copia y reparto del material genético (como la mitosis) imprescindibles para que los descendientes puedan formarse y desarrollarse. Hay dos tipos fundamentales de reproducción: la asexual y la sexual.

En la reproducción asexual un solo organismo produce, salvo errores o mutaciones, copias idénticas de sí mismo, mientras que en la reproducción sexual se parte de dos progenitores que originarán descendientes que compartirán características de ambos, pero que no serán totalmente idénticos a ninguno de ellos (serán semejantes).



En un organismo pluricelular que se reproduzca asexualmente, se separa una unidad reproductiva (una yema) que constará de una o varias células que, tras su desarrollo, dará lugar a un duplicado del progenitor. Las ventajas de la reproducción asexual consisten en que solamente se necesita un individuo para producir descendientes; en que si al progenitor le fue bien en el ambiente en el que vivía, su descendencia va a contar con las mismas ventajas, ya que se mantienen fielmente las características del primero (salvo los eventuales casos de mutación); por último, estos procesos de hacer copias no excesivamente complejos. Tenemos ejemplos de este tipo de reproducción en las esponjas, los cnidarios y algunos grupos más de animales y vegetales.

Para la reproducción sexual, en cambio, se necesitan dos individuos; además, los procesos de la formación de las unidades reproductivas (gametos) son muy complejos: se necesitan mecanismos que aseguren la unión de las mismas (fecundación) y el desarrollo (desarrollo embrionario) de la célula resultante de la unión de aquellas (zigoto). Hay que preguntarse por qué a pesar de ello la reproducción sexual es predominante en la naturaleza, adoptándola desde seres muy sencillos a los más complicados.

La explicación de estos hechos parece estar clara: la reproducción sexual presenta claras ventajas evolutivas con respecto a la reproducción asexual ya que es una fuente de alta **variabilidad genética**. Así, los descendientes no son idénticos a sus padres y ni siquiera los hermanos lo serán entre sí. Esta variedad o diversidad en cualquier población (seres parecidos pero no idénticos) es la que permite que ante condiciones adversas, o simplemente cambios del medio, la especie sobreviva puesto que entre todos los individuos siempre pueden existir algunos mejor adaptados que sobrevivirán y se reproducirán. Esta acción del ambiente sobre los individuos recibe el nombre de selección natural. La reproducción sexual, en resumen, ha asegurado la continuidad de la vida en la Tierra y además ha potenciado enormemente la diversidad de formas (Biodiversidad), porque la acción conjunta de la variabilidad genética y la selección natural han llevado a la **evolución de las especies** y hoy día contamos con casi dos millones de ellas catalogadas. No obstante, aquí siguen las bacterias, tras casi 4.000 millones de años de evolución y sin emplear la reproducción sexual. [Como casi siempre, es más fácil hablar al modo "lamarkiano": decir que la reproducción sexual ha surgido *para* crear variabilidad y asegurar la supervivencia no es correcto. La reproducción sexual *no ha sido creado para nada*. Digamos mejor que ese mecanismo, surgido al azar, y posiblemente más simple que en la actualidad, supuso una ventaja para las especies que lo poseían puesto que sobrevivieron mejor y seguramente muchas de las especies que no contaban con ese mecanismo acabaron extinguiéndose].

La reproducción asexual emplea un mecanismo que asegura el reparto de la información y que consiste en la **mitosis**. La reproducción sexual, deberá presentar también mecanismos que aseguren el reparto de material genético desde los padres a los descendientes. Un individuo procede de dos progenitores, de los que recibe su información genética y por ello, poseerá lógicamente el doble que cada uno de ellos (doble número de cromosomas, doble espacio ocupado); en la siguiente generación habrá que pensar que los descendientes contarán con cuatro copias de material hereditario y así sucesivamente. Evidentemente en muy pocas generaciones los seres serían inviables... Pero existe un mecanismo que evita este problema. Este proceso recibe el nombre de **meiosis** y es en parte semejante a la mitosis ya que evolutivamente deriva de ella pero con resultados muy diferentes.

La meiosis consiste en reducir el número de cromosomas de una célula a la mitad, con el fin de que los individuos de una especie contengan siempre el mismo número de ellos.

[LOS CICLOS BIOLÓGICOS O REPRODUCTIVOS: MEIOSIS CIGÓTICA Y MEIOSIS GAMÉTICA.

Este proceso reductivo puede llevarse a cabo en distintas fases de la vida de los organismos, lo cual nos hace distinguir, en las especies que tienen reproducción sexual, tres tipos de **ciclos biológicos: Haplontes, Diplontes y Haplodiplontes**.

El ciclo haplonte es el que presentan ciertas algas primitivas y muchos hongos. Estos organismos cuentan con **un solo lote de información**, por lo que decimos que **son haploides**. En ellos, la meiosis tiene lugar inmediatamente después de la *fecundación*, esto es, tras la fusión de dos células especializadas que denominamos gametos. El *cigoto* fruto de la fecundación, contiene dos conjuntos de información, (procedentes de los dos gametos que a su vez provienen de los dos progenitores) y por ello se dice **diploide**. Tras la meiosis del cigoto se obtienen cuatro células con un solo juego de información y que diremos **haploides**. Cada una de estas células se desarrollará y originará un individuo adulto también haploide. Por lo tanto, este ciclo biológico se caracteriza por la existencia de seres adultos haploides y de una meiosis cigótica. [¡Atención!: El ciclo de vida de los hongos pluricelulares es muy compleja, pero podemos resumir diciendo que forman una estructura, la **seta**, que se encarga de fabricar células rodeadas de una envoltura resistente, las denominadas **esporas**. Estas esporas son producidas por meiosis de cigotos que se producen en las laminillas de la seta. De cada espора surgirá un nuevo micelio].

El ciclo diplonte es característico de los animales y excepcionalmente de algunas algas. Los individuos de estos grupos de seres vivos poseen dos lotes o juegos de información, de modo que tienen parejas de cromosomas con genes alelos (genes que informan sobre el mismo carácter). Son por lo tanto, **seres diploides**. La meiosis tiene lugar al formarse los gametos. Al producirse la fecundación, se obtiene un cigoto diploide que se desarrollará hasta originar un individuo adulto diploide también. Este individuo, al fabricar gametos a partir de células con dos conjuntos de cromosomas, recurrirá a la meiosis para que estos sean haploides. Por lo tanto, este tipo de ciclo presenta individuos diploides y meiosis gamética.

El ciclo diplohaplonte o haplodiplonte, es propio de los vegetales superiores y se caracteriza por la existencia de dos generaciones sucesivas, una diploide y otra haploide. Por este motivo también recibe el nombre de *ciclo reproductivo alternante*. Dentro de este tipo aparecen múltiples variantes, desde aquella en la que la generación haploide es la que alcanza mayor desarrollo y autonomía y la diploide vive “parásita” de la anterior (caso de los musgos), a aquella en la que individuos haploides y diploides tienen vidas independientes, como los helechos, llegando a aquellos grupos como las plantas superiores en los que los individuos diploides dominan y los haploides viven en su interior quedando reducidos a unas pocas células. (la meiosis no es ni cigótica ni gamética). Existen algunos grupos de celentéreos (medusas) que también poseen una reproducción alternante.]

Del apartado anterior deben quedar claros los conceptos de **individuos diploides e individuos haploides; meiosis gamética y de meiosis cigótica**. También debe quedar fijada la idea de que seres pluricelulares como nosotros, con un ciclo de vida diplonte, crecemos a partir de una primera célula -el cigoto- por sucesivas mitosis. Así también nuestras células se renuevan continuamente –epidérmicas, glóbulos rojos, etc.- por mitosis y solo nuestras células germinales, realizarán la meiosis con el fin de producir gametos].

LA MEIOSIS.

Conviene dibujar el proceso y seguirlo por medio de esquemas para después, de modo teórico, analizarlo. (Ver esquemas).

Ya ha sido definida la meiosis como un *proceso de reducción a la mitad del número de cromosomas que inicialmente posee una célula*. Lo que hay que añadir es que esa célula debe contar de partida con dos conjuntos de cromosomas: dotación diploide. Mediante la meiosis conseguiremos células hijas con *un solo lote de información* y, por lo tanto, no se trata simplemente de separar cromosomas cualesquiera, sino de separar los cromosomas que lleven información para los mismos caracteres, es decir **cromosomas homólogos**. Pero el proceso es más complicado que esto...



[Veamos un símil que puede ayudar a entender el porqué del proceso (algunos conceptos aparecerán con más detalle en el tema de genética mendeliana):

La información genética de una célula se encuentra “escrita” en los cromosomas. Cada cromosoma es como un tomo de una enciclopedia. El conjunto de cromosomas es la enciclopedia completa y, como en ella, cada volumen tiene una parte de la información total. Una célula diploide (cualquiera de las nuestras) contiene dos enciclopedias, con el mismo número de tomos y con información sobre las mismas palabras. Pero la manera de explicar cada término no tiene por qué ser idéntica: no se trata de dos enciclopedias iguales sino semejantes, de dos editoriales diferentes.

Pongamos que las enciclopedias de las células humanas tienen 23 tomos cada una. Tomos que van ordenados de la A a la Z. En total hay 46 libros, con toda la información que necesitan dichas células repetida dos veces. Cuando se realice la meiosis, se trata, como ya hemos dicho, de obtener células con sólo 23 cromosomas o tomos. Pero no vale con separar cualesquiera cromosomas para conseguir ese número: las dos células hijas no se pueden permitir tener ciertas informaciones repetidas (por ejemplo dos tomos de la A) y estar faltas de otras (ningún tomo de la M). Por lo tanto, el proceso de meiosis es tan complejo que debe conseguir separar dos lotes completos de información, para que ni sobre ni falte instrucción alguna. Pero eso sí: se pueden mezclar perfectamente los tomos de las dos enciclopedias, siempre y cuando tengamos al final dos conjuntos de libros ordenados, cada uno de ellos del tomo 1 al tomo 23.

Recordemos que una célula diploide cuenta con un lote de cromosomas que procede del padre y el otro juego es herencia de la madre. Tras la meiosis separaremos los dos lotes de información pero “barajando las dos enciclopedias” (nos da lo mismo que una de las células hijas tenga el tomo uno de una enciclopedia, el tomo dos de la otra, el tomo tres siempre y cuando ni haya libros repetidos ni nos falten tomos de alguna letra).

Sin salir de la comparación de las enciclopedias, hay que decir que el mecanismo de la meiosis es más complejo todavía, puesto que de una célula diploide inicial se van a obtener cuatro células haploides: por motivos que más adelante se expresan, justo antes de comenzar el proceso, ¡cada enciclopedia se fotocopia! (periodo de síntesis) por lo que en realidad partimos de cuatro enciclopedias, dos de cada editorial. Ésta es la razón por la cual hay que hacer dos divisiones seguidas en la meiosis].

*La meiosis consiste en dos mitosis sucesivas, en la primera de las cuales se separan los cromosomas homólogos y se obtendrán dos células haploides, pero cada cromosoma contará con dos cromátidas (cromosomas dobles). Cada una de estas células contendrá un solo juego de cromosomas, en los que se hallará toda la información propia de la especie a la que pertenezca. Esos cromosomas provendrán indistintamente del padre o de la madre, ya que el reparto se hace al azar. En la segunda división, las cromátidas de cada cromosoma se separarán como en una mitosis ordinaria, formándose otra vez dos células. El resultado final, por tanto, de una meiosis son cuatro células haploides a partir de una sola célula inicial. La complejidad de este proceso tiene que ver con que el *mecanismo de la evolución* “trabaja” a partir de lo que ya hay, en vez de “inventar” soluciones óptimas a los problemas que aparecen. Por eso, en vez de limitarse a separar las parejas de cromosomas homólogos, al tratarse de una modificación del mecanismo de la mitosis, comienza con la replicación del ADN (periodo S de la interfase), por lo que tendremos duplicadas todas las fibras de cromatina de modo que cuando empiecen a enrollarse para originar cromosomas, estos serán dobles (ya han sido estudiada la mitosis). Una vez que se ha realizado la **meiosis I** habrá que separar las cromátidas de cada cromosoma en la **meiosis II**, ya que las células no deben contener cromosomas dobles. De ahí que se obtenga el resultado final de cuatro células por cada una inicial.*

[Por si todo esto resultara sencillo de entender, ahora vienen más extravagancias: tras la fotocopia de cada enciclopedia, hay dos primeros tomos, dos segundos, y así hasta el 23 de cada una de las dos enciclopedias. En total hay nada menos que 92 libros (la información repetida cuatro veces). Tras la meiosis I, como ya hemos visto, conseguimos dos células con sólo 46 volúmenes: 23 tomos con sus 23 tomos fotocopiados correspondientes y, no importando si el tomo 1 (y su fotocopia) procede de una u otra de las enciclopedias iniciales. Lo más destacable del proceso de

meiosis I es que antes de separarse cada tomo de una enciclopedia intercambia algunos capítulos con un tomo de la otra enciclopedia, pero siempre se hace entre capítulos referentes a la misma información (por ejemplo, dos tomos de la letra A se cambian la página 3). Así, tras la separación tenemos que un volumen puede ser mezcla de las dos enciclopedias: es la recombinación].

Cada una de las dos divisiones meióticas comienza con *cariocinesis*, semejantes, en cuanto a las etapas que se suceden, a las estudiadas en la mitosis, con *profase*, *metafase*, *anafase* y *telofase*. También, tras cada una de ellas tiene lugar una *citocinesis* que originará dos nuevas células. Por ello, no se insistirá en los detalles sino que se resaltarán las diferencias con el proceso mitótico.

Tales diferencias son, que *en meiosis I se separan cromosomas homólogos*, pero antes de hacerlo tiene lugar el fenómeno de recombinación genética. La meiosis II es prácticamente una mitosis “normal”, en cuanto a que se separan las cromátidas de los cromosomas dobles. Con unos buenos esquemas es fácil seguir el proceso.

Gracias al fenómeno de **apareamiento de los cromosomas homólogos** (procedentes uno de la “madre” y otro del “padre”) durante **la profase I**, se producen intercambios de *genes alelos*, de forma que a partir de cuatro cromátidas por cada pareja de cromosomas homólogos, iguales dos a dos, ahora tendremos cuatro cromátidas diferentes (aunque con genes que codifican para los mismos caracteres). Es decir, si una especie poseyera solo una pareja de cromosomas, su meiosis produciría nada menos que 4 gametos diferentes. (Ver esquema). Cada célula “madre” de gameto sufrirá recombinación al azar, siendo variable el número y posición de los **quiasmas** o **sobrecruzamientos**. Si la célula en cuestión tiene más de dos cromosomas (más de un par), cada pareja sufrirá sobrecruzamientos de modo independiente. Como lo normal es que un individuo fabrique muchos gametos, cada uno de ellos, tras la meiosis, puede presentar cualquier combinación de genes alelos. Esto supone una amplísima **variabilidad genética** contando solo con la recombinación. [Estos mecanismos son de una complejidad increíble y suceden continuamente en los seres vivos. Siendo un proceso complicado, es habitual que se produzcan errores: un porcentaje importante de los gametos formados son inviables por haberse intercambiado fragmentos no homólogos o por poseer cromosomas de más o de menos].

Por su relevancia conviene detallar los fenómenos que tienen lugar durante la **profase I**: Se pueden distinguir 5 subfases, que comienzan con la de **leptotene** [*leptos* = *delgado*]. En ella los cromosomas se van formando y haciendo visibles, cada uno de los cuales está formado por dos cromátidas que se encuentran muy unidas una a la otra (tanto que no se aprecian); **zigotene** [*zigos* = *unión*], los cromosomas homólogos se aparean o unen de modo que quedan totalmente alineados a lo largo de toda su longitud. Este apareamiento se denomina sinapsis. Esto sucede con la mediación de unas proteínas que constituyen el **complejo sinaptonémico**. El resultado es una estructura constituida por cuatro cromátidas que se denomina **tétrada** o cromosoma **bivalente**. La tercera subfase es la denominada **paquitene** [*paqui* = *grueso*], en ella se produce el **sobrecruzamiento** (o crossing-over). Realmente, dos cromátidas de cromosomas homólogos se superponen o cruzan una o más veces a lo largo de su longitud. La consecuencia de este fenómeno será la recombinación genética o intercambio de genes. Este sobrecruzamiento se da solo en una de las cromátidas de cada cromosoma homólogo. Le sigue la subfase de **diplotene** [*diplo* = *doble*], en la cual los cromosomas homólogos inician su separación pero siguen unidos a través de los puntos de sobrecruzamiento de las cromátidas hermanas que van a sufrir el intercambio. Se denominan **quiasmas** a estos puntos de contacto. La **diacinesis** [*diacinesis* = *movimiento de separación*] es la última etapa dentro de la profase I y a lo largo de ella los cromosomas se condensan al máximo, lo que los hace visibles al microscopio óptico (hasta esta fase, en realidad no se aprecian bien las dos cromátidas de cada cromosoma por no estar del todo condensada la cromatina y por permanecer muy juntas. En este momento se van separando o **segregando** a pesar de seguir unidas en los quiasmas). Cada par de cromátidas hermanas está unida por su centrómero y cada par de cromosomas homólogos permanece unido a través de sus quiasmas. Al final de esta fase, la membrana nuclear y el nucleolo desaparecen y se forma el huso acromático. El resumen de esta fase es que contamos con cuatro cromátidas en cada pareja de cromosomas, de las cuales



dos de ellas no han sufrido recombinación (una de procedencia materna y otra paterna) y otras dos son recombinantes (por lo que esas dos serán diferentes a las parentales u originales y también lo serán entre sí, puesto que aunque todas llevan información para los mismos caracteres, las cuatro son diferentes en el conjunto de los alelos que contienen). (En el mecanismo de recombinación intervienen enzimas).

Muchos de los conceptos que es preciso nombrar para estudiar la meiosis, se verán en el siguiente bloque temático (por ejemplo, genes alelos).

Aun en el caso de que no existiera recombinación, vamos a ver que el propio proceso de meiosis genera variabilidad. Ya se ha comentado que en la primera división meiótica se separan los cromosomas homólogos. Si una célula cuenta con dos parejas de homólogos (un total de 4 cromosomas) hay dos posibilidades: que los dos cromosomas que procedían del mismo progenitor de la célula que sufre la meiosis vayan a una de las células resultantes y, por lo tanto, que los dos procedentes del otro progenitor vayan a la otra célula (ver esquemas) o bien que a una de las células vaya uno "del padre" y otro de la "madre"; eso hace $2^2 = 4$ gametos diferentes. Si partiéramos de células con tres parejas de cromosomas, las posibilidades de posibles gametos diferentes son $2^3 = 8$. Pensemos ahora en una especie como la nuestra, con 23 parejas de cromosomas. Durante la meiosis de una célula puede dar la casualidad de que a una célula hija vayan a parar los 23 cromosomas que se heredaron del padre, yendo a la otra a parar, forzosamente, los otros 23 que corresponderán a los heredados de la madre, pero también puede formarse una célula en meiosis I que tenga 22 cromosomas procedentes del padre y uno de la madre y la otra célula tendrá 22 cromosomas de la madre y uno del padre... el número de gametos diferentes que se pueden formar resulta ser de **2^{23} diferentes** ¡y todo ello sin contar con la recombinación!. Si añadimos el hecho de que un nuevo individuo es el resultado de la unión de dos gametos, las posibilidades de variación son inmensas. (Ver esquemas).

Incluso un organismo hermafrodita (con ambos sexos) que recurra a la autofecundación (por ejemplo las plantas de guisantes de Mendel o las tenias intestinales también llamadas solitarias consiguen variabilidad).). [Ver el caso de una planta de guisante heterocigota para un carácter y que se autofecunde].

Resumiendo: la variabilidad o diversidad de los seres vivos aun en los individuos de una especie radica en los siguientes hechos:

1- **Mutación.** Son cambios en la información genética. Constituyen la base de la variabilidad (por mucha recombinación, si no hay alternativas o alelos diferentes, no hay nada que hacer).

2- Reproducción sexual:

- a) Un individuo lleva información de dos progenitores diferentes.
- b) La recombinación aumenta el número de gametos distintos.
- c) El reparto de cromosomas homólogos durante la meiosis baraja aún más la "lotería genética", ya que al azar, se van a cada extremo de la célula en división cromosomas de origen paterno y de origen materno.