

Profase. El ADN se condensa y forma cromosomas constituidos por dos cromátidas mientras los centrómeros se separan.

Esquema de formación del huso mitótico. Los microtúbulos se alargan desde cada centrosoma. Llega un momento en que interactúan entre sí. Dado que cada uno crece en sentido contrario, los centrosomas se van separando poco a poco. Finalmente, acaban en lugares opuestos formando los polos del huso.

Las etapas de la mitosis

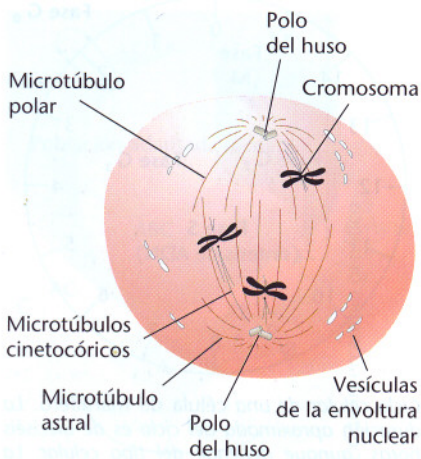
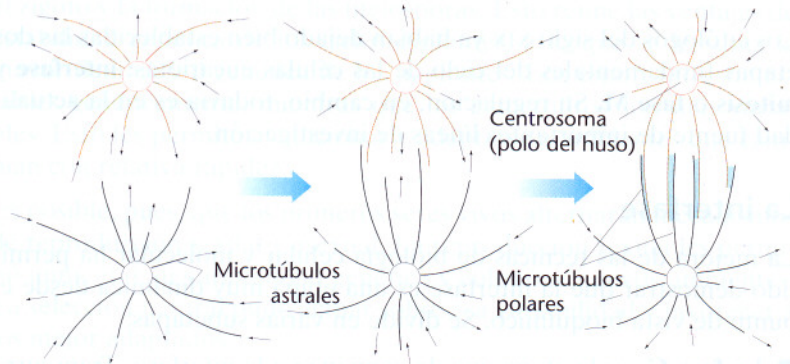
La **mitosis** consiste, en esencia, en el reparto de los cromosomas entre las dos células hijas. Los cromosomas no intervienen directamente en este proceso, sino que son desplazados por los microtúbulos del huso mitótico.

La mitosis se divide en seis fases. Cinco de ellas transcurren en una secuencia ordenada: *profase*, *prometafase*, *metafase*, *anafase* y *telofase*. La sexta fase es la *citocinesis*, aunque comienza durante la anafase.

■ Profase

El ADN duplicado durante la *fase S* se condensa. Al principio de la profase, los **centriolos** se separan y originan dos centrosomas. Alrededor de cada uno se disponen radialmente los microtúbulos del **áster**. La interacción de los microtúbulos de los dos ásteres separa los centrosomas hacia lados opuestos. Hacia la mitad de la profase se muestran los **cromosomas**, formados por dos **cromátidas** que permanecen unidas por el **centrómero**. El nucléolo va desapareciendo poco a poco.

Al final de la profase se desarrolla sobre los centrómeros una estructura proteica especial: el **cinetocoro**, que permite a los cromosomas interactuar con los microtúbulos. Éstos empiezan a unirse a los cinetocoros formando una estructura filamentosa que irá de polo a polo de la célula en división: el **huso mitótico**.



Prometafase. La rotura de la membrana nuclear permite a los microtúbulos interactuar con los cromosomas.

■ Prometafase

Da comienzo con la desorganización de la membrana nuclear, lo que origina vesículas, indistinguibles de las del retículo endoplasmático, que se mantienen en las cercanías del huso durante la mitosis. Al desaparecer la membrana nuclear, los microtúbulos pueden acceder a la zona nuclear e interactuar con los cromosomas. Los que se unen al cinetocoro reciben el nombre de *microtúbulos cinetocóricos*; los otros, que forman parte del huso, se denominan *microtúbulos polares*; y los exteriores al huso son los *microtúbulos astrales*.

Los dos centrómeros migran a los polos opuestos de la célula y forman los denominados **polos del huso**. Así, sirven de anclaje a los microtúbulos del huso mitótico.

Cada una de las cromátidas interacciona con microtúbulos cinetocóricos de uno de los polos del huso. Los microtúbulos de cada polo tiran de los cromosomas en sentido contrario. Por todo ello, los cromosomas son alineados en una zona ecuatorial de la célula.

Metafase

Es la etapa más larga de la mitosis, ya que, hasta que la célula no recibe las señales de que los cromosomas están alineados gracias a los microtúbulos cinetocóricos, no acaba la metafase. Cada cromátida queda orientada hacia uno de los polos. Se forma la llamada **placa metafásica** o **ecuatorial**.

Anafase

El comienzo transcurre con una repentina separación de las dos cromátidas de cada cromosoma, debido al acortamiento de los microtúbulos cinetocóricos y al alargamiento de los microtúbulos polares.

Al finalizar la anafase, los microtúbulos se desorganizan y las cromátidas forman dos grupos en los polos opuestos de la célula. Allí formarán parte del núcleo de una nueva célula.

Telofase

Los dos grupos de cromátidas situados en los polos opuestos se desorganizan y el ADN se desempaqueta. Como consecuencia, vuelve a organizarse el nucléolo.

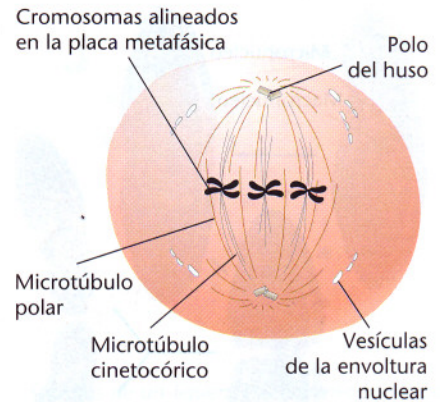
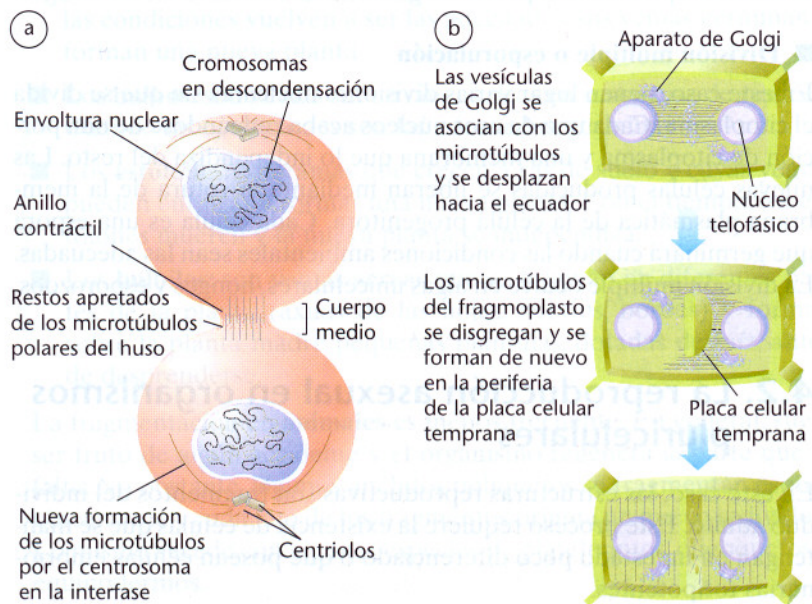
Los microtúbulos polares se alargan todavía más. La membrana nuclear se reconstruye a partir de las vesículas de la prometafase. Al final de la telofase se han formado los dos núcleos de las células hijas.

Citocinesis

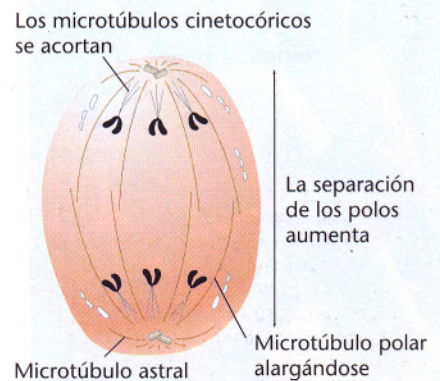
En células animales consiste en la división del citoplasma en dos mediante un proceso llamado **segmentación**.

En las células vegetales, el citoplasma se divide mediante la formación de una nueva pared celular, la **placa celular**. Ésta se produce por la fusión de vesículas asociadas a los microtúbulos del huso, los cuales forman una estructura cilíndrica llamada **fragmoplasto**.

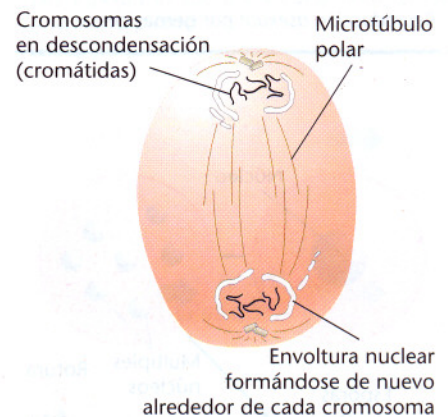
La comunicación entre las dos células hijas queda asegurada gracias a la formación de unos poros: los **plasmodesmos**.



Metafase. Los microtúbulos del huso mitótico ordenan los cromosomas y forman la placa ecuatorial.



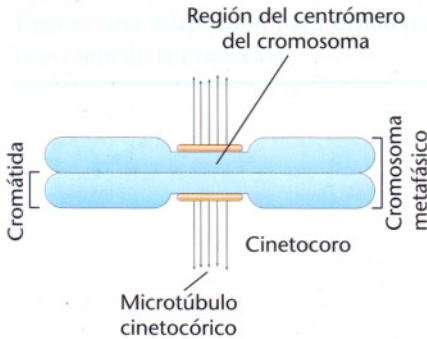
Anafase. Las cromátidas son separadas y llevadas a los polos de la célula por acción de los microtúbulos.



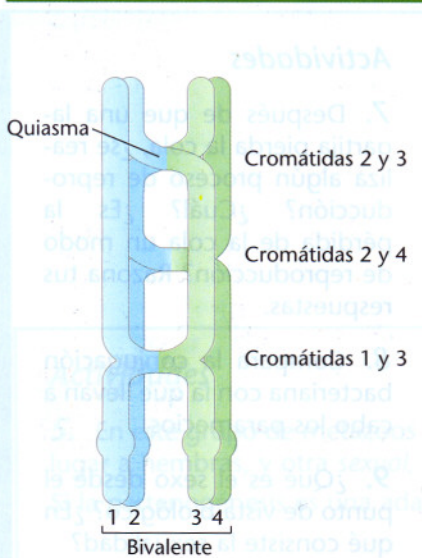
Telofase. La membrana nuclear se reorganiza sobre los dos grupos de cromátidas, al tiempo que el ADN que las forma se desempaqueta.

a) Citocinesis en células animales.
b) Citocinesis en células vegetales.

Curiosidades



En este esquema se puede apreciar cómo cada cromátida presenta un cinetocoro al que se unen microtúbulos.



Tres quiasmas resultantes de tres entrecruzamientos entre cromátidas.

La meiosis en los organismos eucariontes. En los eucariontes pluricelulares, el cigoto prolifera por mitosis y origina individuos adultos. La meiosis se produce a partir de células especializadas del adulto. En la mayoría de los eucariontes unicelulares, el cigoto sufre una división meiótica en su primera división celular. En este caso proliferan las células haploides por mitosis.

6 La meiosis

La meiosis es un proceso de reproducción celular en el cual cada célula progenitora diploide, la **gametogonia**, se divide en cuatro células haploides llamadas **gametos**. Estas células se fusionarán en el proceso de la **fecundación** y darán lugar al **zigoto**, una nueva célula diploide. En realidad es un proceso que consiste en dos divisiones celulares sucesivas, aunque sólo se produce una duplicación cromosómica.

Cada célula diploide tiene dos juegos de cromosomas iguales. Se pueden establecer, pues, pares de cromosomas del mismo tipo dotados de la misma información genética. Cada uno de los cromosomas de un mismo par se denomina **cromosoma homólogo**.

La duplicación de cada cromosoma durante la interfase origina dos cromátidas que permanecen unidas, tal y como ocurre en la mitosis. Cada una de ellas recibe el nombre de **cromátida hermana**.

En la primera división meiótica se produce la separación de cada uno de los dos juegos de cromosomas. En la segunda división meiótica, prácticamente idéntica a la mitosis, se separan cada una de las cromátidas hermanas. En consecuencia, cada célula hija sólo tiene un juego de cromosomas.

Cada una de las divisiones de la meiosis se divide a su vez (como en la mitosis) en cuatro etapas: *profase*, *metafase*, *telofase* y *citocinesis*.

La primera división meiótica

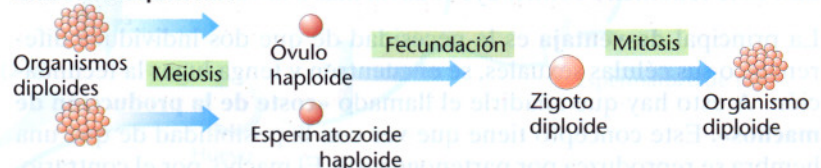
En esta etapa ocurre lo que, sin duda, es la característica más importante de la meiosis: la **recombinación genética**. Este proceso consiste en un intercambio de material genético entre las cromátidas de dos cromosomas homólogos. Ocurre durante la profase I y es visible morfológicamente porque los cromosomas aparecen entrecruzados.

■ Profase I

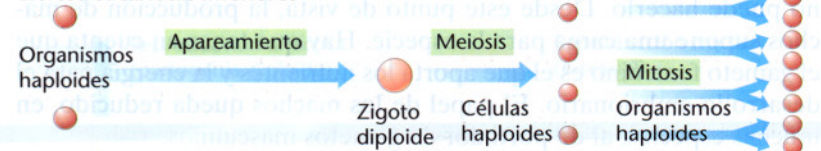
Durante esta etapa, tiene lugar la condensación de los cromosomas duplicados previamente en la interfase. También es el momento en que se produce el **entrecruzamiento cromosómico** y su posterior separación tras haber tenido lugar el intercambio de material genético.

Esta primera etapa de la primera división meiótica es la más compleja. Se divide en cinco fases, que transcurren de modo consecutivo: *leptoteno*, *zigoteno*, *paquiteno*, *diploteno* y *diacinesis*.

Eucariotas superiores



Ciertos eucariotas inferiores



- Durante el **leptoteno** se observa cómo los cromosomas empiezan a condensarse.

Cada cromosoma está formado por dos cromátidas unidas por el centrómero, pero no se distinguen porque ambas están alineadas.

La membrana nuclear está intacta, y se observa cómo cada cromosoma se encuentra unido por sus extremos a la cara interna de la membrana nuclear mediante la llamada *placa de unión*.

- El **zigoteno** da comienzo cuando empieza a producirse el apareamiento de los cromosomas. Este proceso recibe el nombre de **sinapsis** y suele empezar cuando los extremos se aparean, continuando hacia el interior. En otros casos, en cambio, el apareamiento da comienzo en el interior y transcurre hacia los extremos. El resultado final es la formación de una estructura con forma de escalera: el **complejo sinaptonémico**. El borde de esta estructura lo forma un eje proteico sobre el cual se plegarán las cromátidas, indistinguibles hasta el momento. El ADN se dispone en forma de bucles que salen de cada eje.

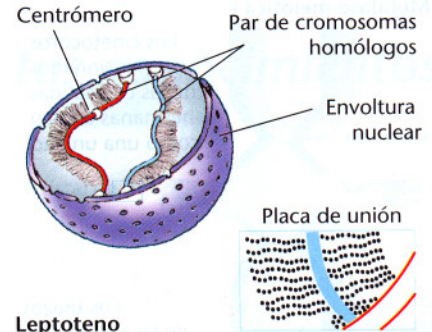
- El **paquiteno** da comienzo cuando la sinapsis ha concluido en todos los cromosomas.

Durante esta etapa aparecen sobre los complejos sinaptonémicos unos enormes complejos proteicos: los **nódulos de recombinación**. Todo parece indicar que son las estructuras encargadas de llevar a cabo la recombinación genética. Los nódulos dan lugar a la recombinación entre cromátidas no hermanas. Este entrecruzamiento no se aprecia en esta etapa, aunque será visible más adelante.

- En el **diplooteno** tiene lugar la separación o **desinapsis** de los cromosomas homólogos. La desaparición de los complejos sinaptonémicos deja a los cromosomas unidos tan sólo por los lugares donde se produjo el entrecruzamiento. Estos lugares se denominan **quiasmas**. Durante esta etapa, que puede durar años, se produce la descondensación del ADN y un aumento en la síntesis de ARN.

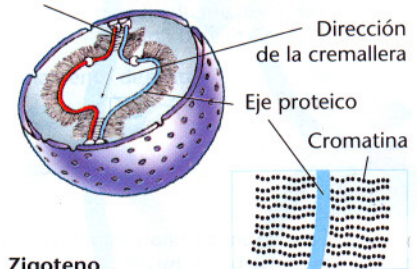
- La **diacinesis** empieza en cuanto acaba la síntesis de ARN. Los cromosomas se condensan y por primera vez se distinguen las dos cromátidas hermanas de cada cromosoma. La condensación hace aumentar el grosor de los cromosomas, al tiempo que se sueltan de la membrana nuclear. Se observa claramente cómo las dos cromátidas de cada cromosoma están unidas por sus centrómeros. Del mismo modo que aquéllos, todavía se mantienen unidos mediante los quiasmas entre cromátidas no hermanas que se han entrecruzado. El papel de los quiasmas es fundamental para la correcta separación de los cromosomas homólogos. Mantienen unidos los cromosomas al huso hasta la anafase I, momento en el cual las tensiones sobre los cinetocoros los harán desaparecer.

Al final de la diacinesis, la membrana nuclear empieza a desorganizarse. Se produce la separación de los centriolos y empieza a formarse el huso acromático.

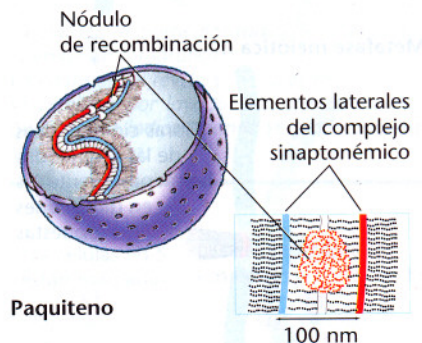


Leptoteno

Inicio del complejo sinaptonémico



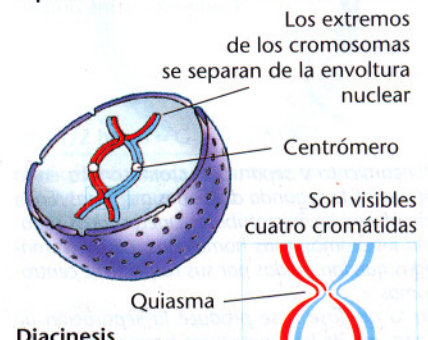
Zigoteno



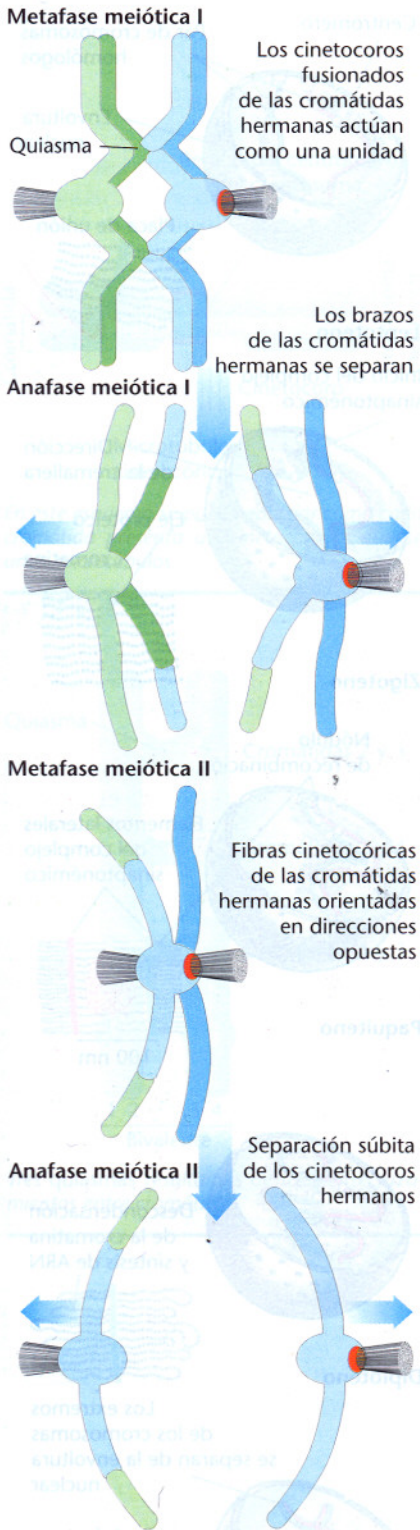
Paquiteno



Diplooteno



Diacinesis



Alineamiento y separación cromosómica en la primera y la segunda divisiones meióticas. En la metafase I los microtúbulos cinetocóricos separan los cromosomas homólogos, cuyas cromátidas quedan unidas por sus respectivos centrosomas. En la anafase II se produce la separación de cada uno de los cinetocoros hermanos.

■ Metafase I

En esta etapa se produce el crecimiento de los microtúbulos del huso. Los microtúbulos cinetocóricos crecen en sentidos opuestos a partir de cada cinetocoro de cada cromosoma homólogo. Al final de la metafase I, la interacción de los microtúbulos con los cromosomas produce el ordenamiento de los pares de homólogos para formar la placa metafásica. El plano ecuatorial de la célula no corta los centrómeros, como en la mitosis, sino los quiasmas.

■ Anafase I

En esta fase se produce la rotura de los quiasmas y la separación de los cromosomas homólogos. El resultado es la formación de dos juegos de cromosomas, uno en cada polo de la célula.

■ Telofase I

Da comienzo tan pronto como cada uno de los dos juegos de cromosomas ha llegado a su polo respectivo. Las fibras del huso desaparecen y se produce la reordenación de las membranas nucleares, que forman dos núcleos. Los cromosomas sufren una pequeña descondensación, no tan grande como en la mitosis, y entran en una corta interfase. En ésta no tiene lugar una nueva síntesis de ADN.

■ Citocinesis I

La separación de las dos células puede ocurrir durante la telofase, aunque hay especies en las que no ocurre hasta que se ha completado la segunda división meiótica. Con la citocinesis concluye la primera división meiótica y cada núcleo empieza la segunda división.

La segunda división meiótica

La única diferencia con la mitosis es que sólo hay un juego de cromosomas y no dos.

■ Tras la breve interfase que sucede a la primera división meiótica, la célula entra en la **profase II**: se produce la condensación de los cromosomas, una duplicación de los centrosomas y la formación de un nuevo huso. Mientras esto ocurre, la membrana nuclear se desorganiza.

■ Durante la **metafase II** se produce la ordenación de los cromosomas en la placa ecuatorial como resultado de las interacciones con los microtúbulos del huso. Los microtúbulos cinetocóricos parten de cada centrómero en direcciones opuestas hacia los dos polos del huso.

■ En la **anafase II** tiene lugar la rotura de los centrómeros y la separación y migración de las cromátidas hermanas hacia los dos polos opuestos. Los mecanismos implicados en el desplazamiento de las cromátidas son los mismos que se desarrollan en la mitosis.

■ En la **telofase II** se produce la formación de las membranas nucleares sobre los dos juegos de cromátidas separados.

■ La **citocinesis II** se produce como en la mitosis, mediante la formación de una constricción que acaba separando la célula en dos. Cada una de estas células es poseedora de un núcleo con un solo juego de los cromosomas que tenía la célula progenitora.