

6

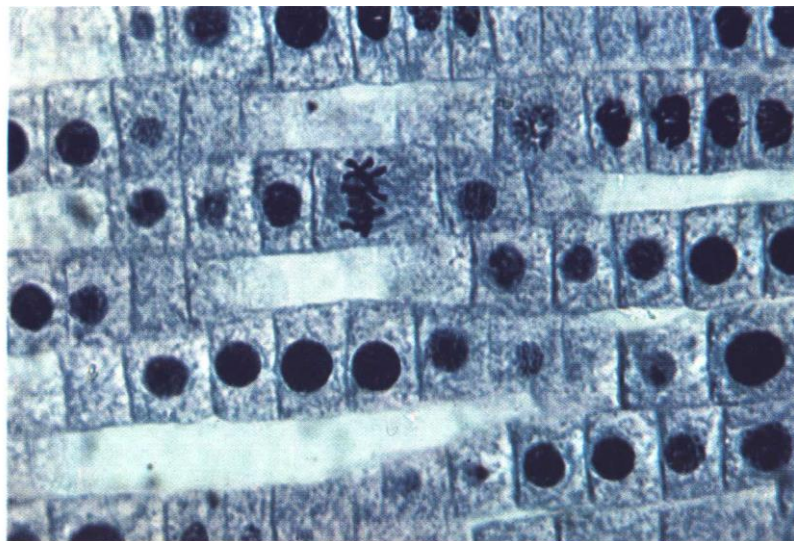
El núcleo y el ciclo celular

1

El núcleo

El **núcleo** es el orgánulo más importante de las células eucariotas. Encierra varias moléculas de **ADN** que **contienen la información genética** que determina las características de la célula y que es necesaria para **dirigir el funcionamiento celular**. El núcleo también se encarga de organizar el reparto de esa información durante la división de la célula.

Dependiendo del momento de la vida en que se encuentre la célula, se distinguen dos estados morfológicos y fisiológicos del núcleo: **el núcleo en interfase** y **el núcleo en división**.

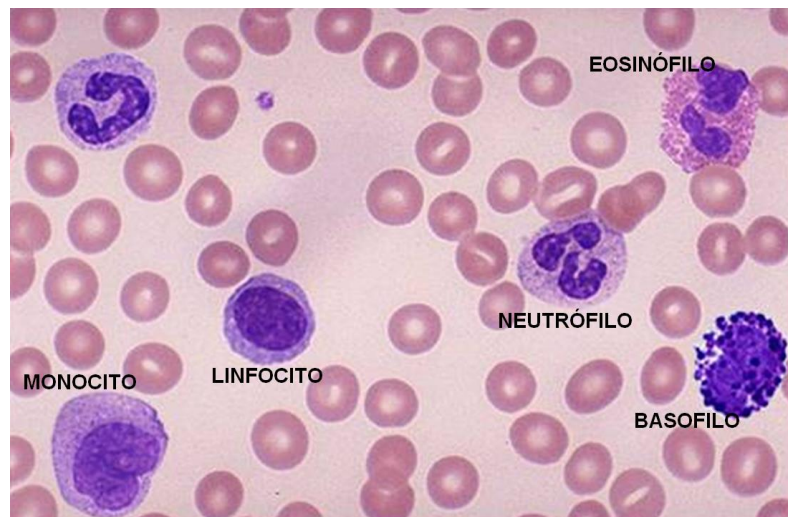


1.1. El núcleo en interfase

La interfase es el período entre dos divisiones sucesivas de la célula, en el que esta desarrolla una gran actividad metabólica. En esta fase, el núcleo aparece como una estructura única, más o menos esférica, en una posición central y con un tamaño variable, que está en relación con la actividad de la célula.

Hay algunas excepciones a esta generalidad, como los glóbulos rojos de los mamíferos, que pierden el núcleo al especializarse; los monocitos, que tienen núcleos de forma arriñonada; los neutrófilos, que lo tienen multilobulado; las células del músculo estriado, que tienen varios núcleos; algunos protozoos que son binucleados o multinucleados y muchas células vegetales, en las que una gran vacuola central desplaza el núcleo a un lado.

Las partes del núcleo interfásico son las siguientes:

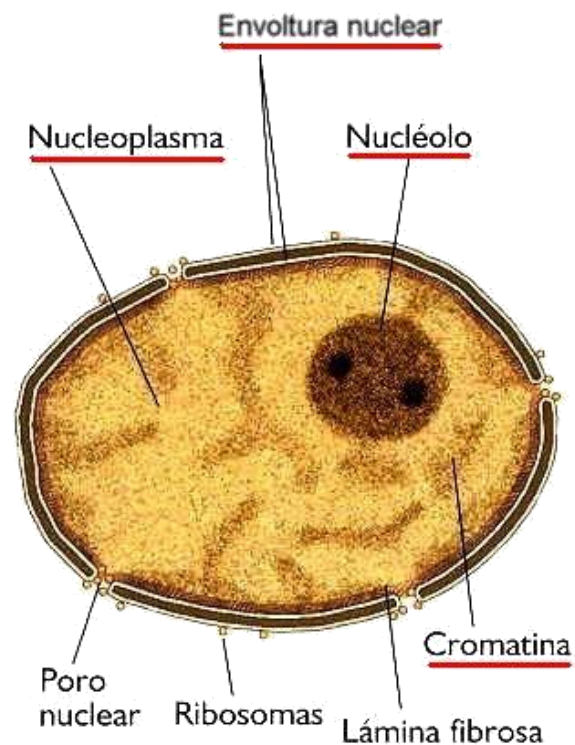


La envoltura nuclear

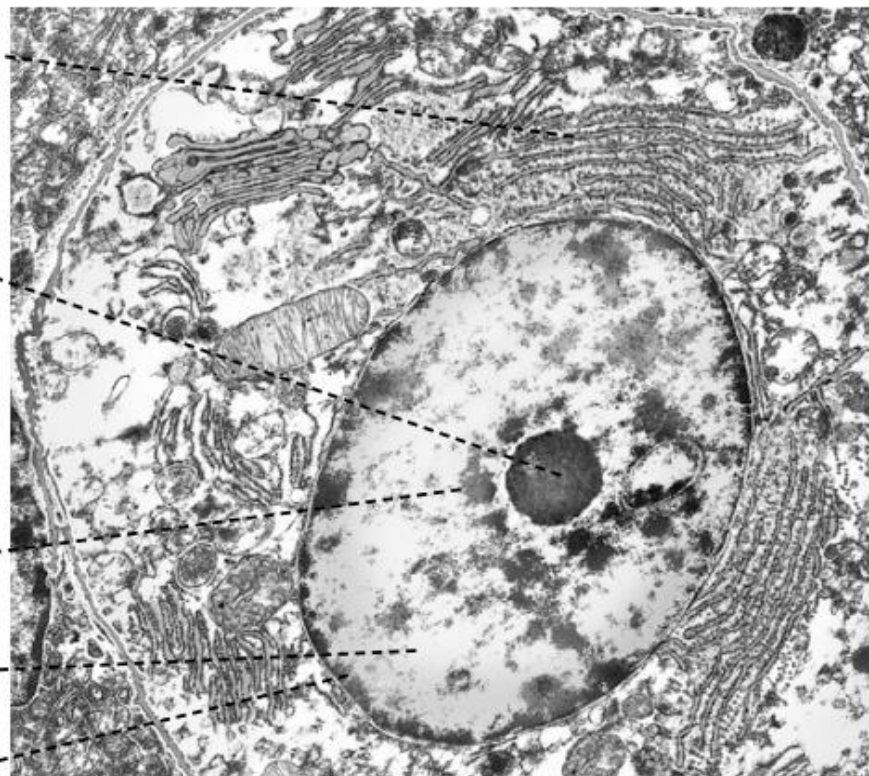
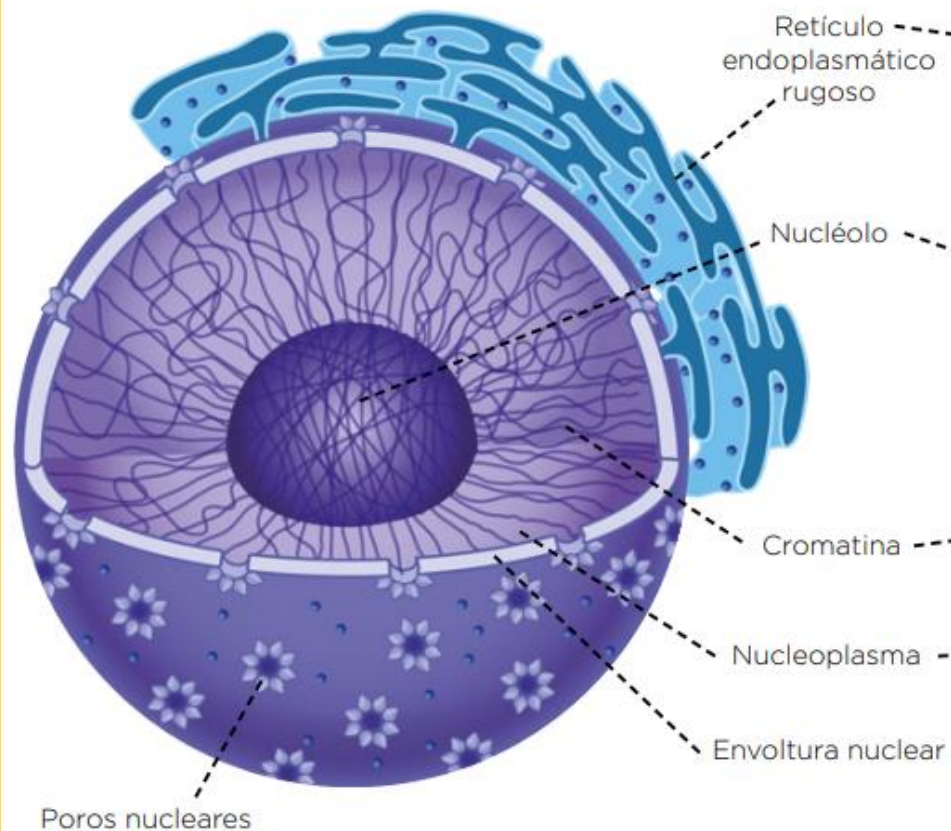
La **envoltura** o **membrana nuclear** es una doble membrana atravesada por numerosos poros, que separa el nucleoplasma del citoplasma celular.

Cada una de las dos membranas tiene un grosor de entre 7 y 9 nm y el conjunto presenta estas características:

- **La membrana nuclear externa** tiene continuidad con la membrana del RE rugoso y, al igual que este, lleva adheridos ribosomas en la cara citoplasmática.
- **La membrana nuclear interna** está recubierta por una red de fibras proteicas, la **lámina nuclear**, que le da forma al núcleo y ancla la cromatina.
- **El espacio perinuclear** queda entre las dos membranas y se comunica con el interior del RE.

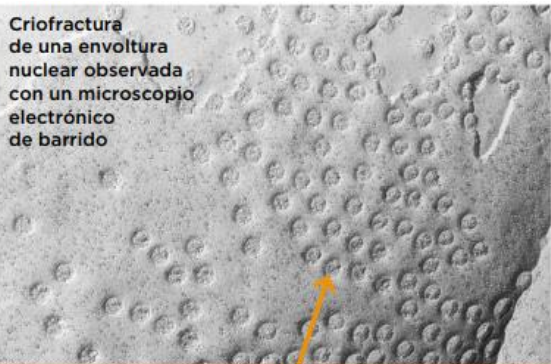


Estructura del núcleo interfásico



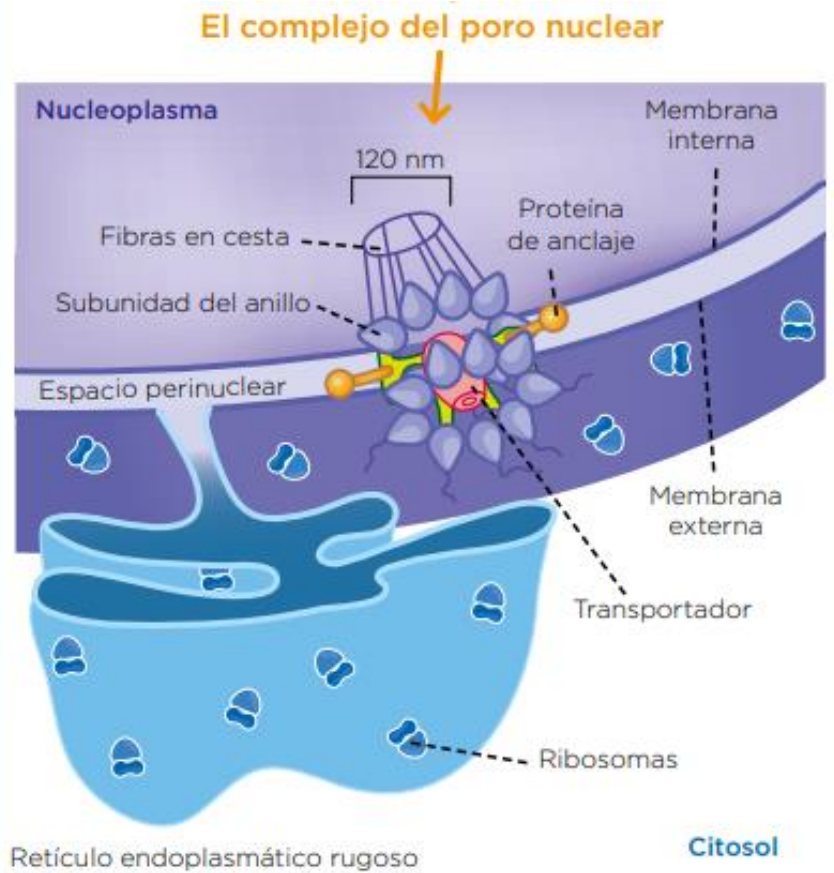
Aspecto del núcleo de una célula eucariota a través del microscopio electrónico de transmisión (MET).

- **Los poros nucleares** son pequeños orificios rodeados por el llamado **complejo del poro**, que mide unos 120 nm de diámetro y consta de fibras, proteínas de anclaje, de transporte y estructurales, en forma de anillo. Esta estructura regula el transporte selectivo de algunas moléculas, como el ARN, las proteínas ribosómicas, algunos iones, etc. Las moléculas polares pequeñas pasan por difusión pasiva a través del poro mientras que las macromoléculas pasan con aporte de energía. En cuanto a las moléculas apolares pequeñas, difunden a través de las membranas sin necesidad de pasar por el poro.

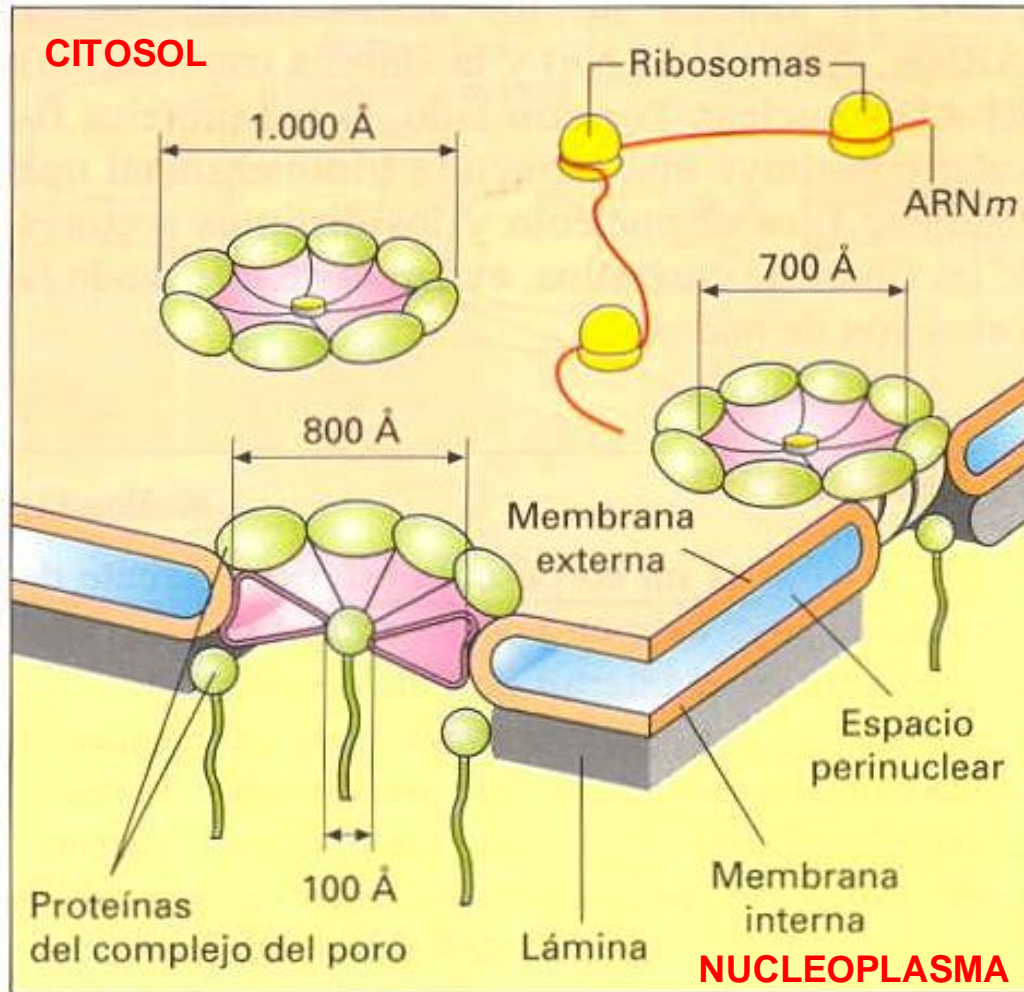


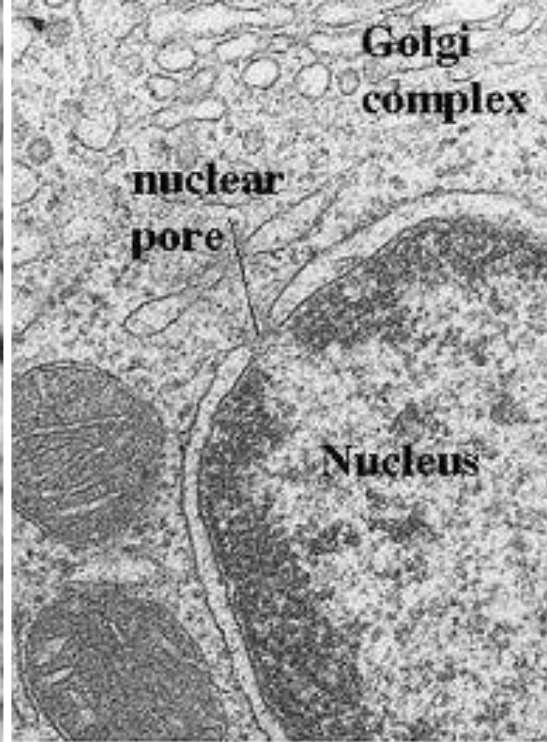
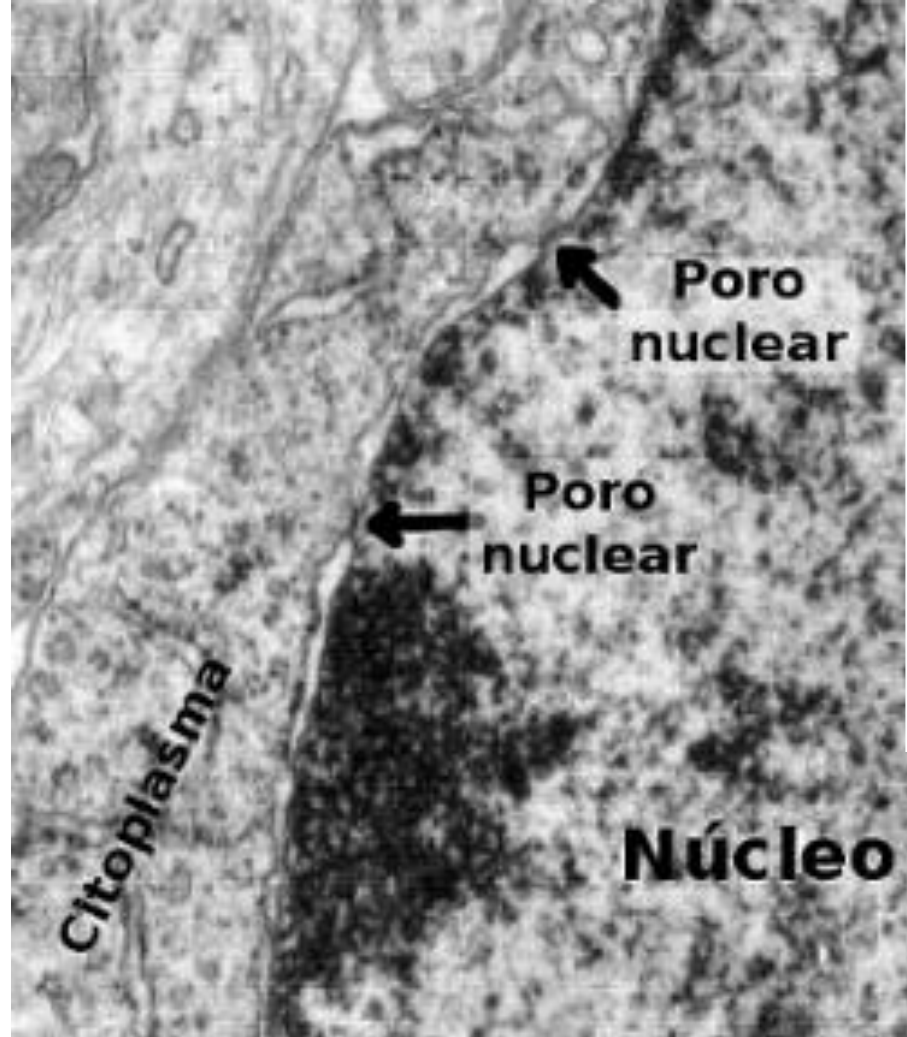
Criofractura de una envoltura nuclear observada con un microscopio electrónico de barrido

El complejo del poro nuclear



CITOSOL





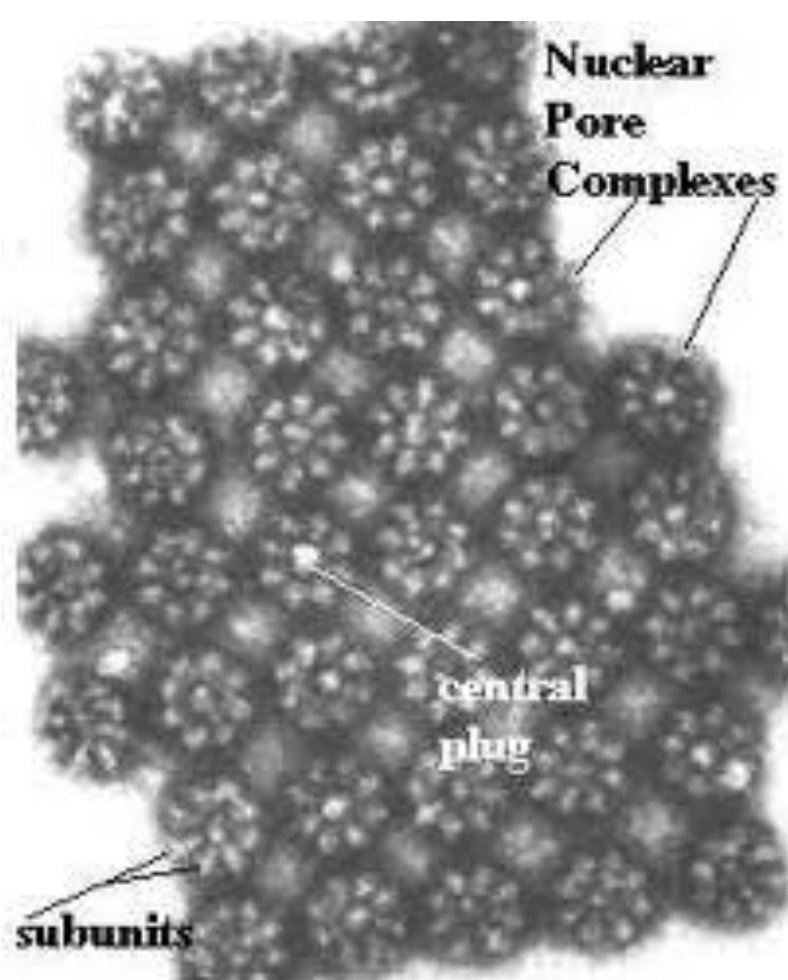
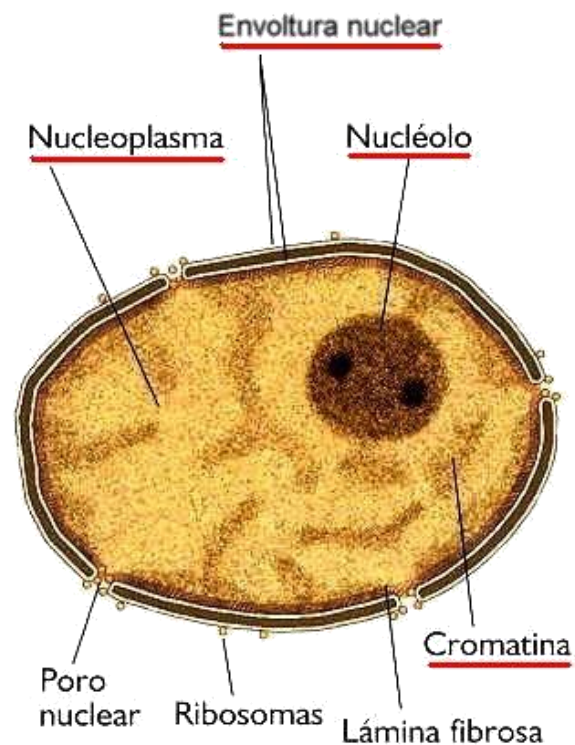


Fig. 3-4. Poros nucleares. Fotomicrografía (X47 778). En esta preparación de criofractura de un núcleo pueden observarse muchos poros nucleares (Tomado de Leeson TS, Leeson CR, Paparo AA: Text/Atlas of Histology Philadelphia, WB Saunders, 1988.)

El nucleoplasma

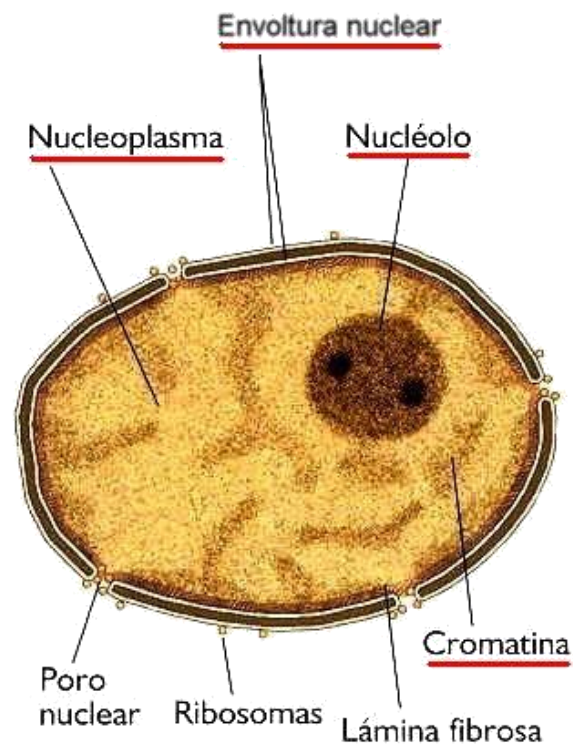
El **nucleoplasma**, **carioplasma** o **matriz nuclear**, es el conjunto formado por el medio acuoso y por la red de fibras que rellena el núcleo.

Su composición es similar a la del citosol, pero contiene componentes específicos necesarios para la síntesis de los ácidos nucleicos, como enzimas, ribonucleoproteínas, iones (K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y la cromatina.



La cromatina

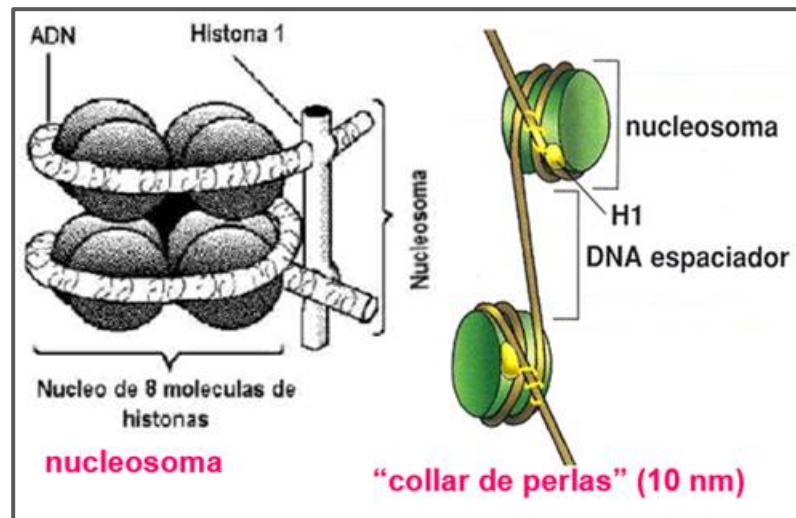
La **cromatina** es la forma poco condensada que tiene el material genético en el núcleo interfásico. Está formada por **ADN** unido a **proteínas** y tiene el aspecto de una maraña de fibras.



La cromatina

La **cromatina** es la forma poco condensada que tiene el material genético en el núcleo interfásico. Está formada por **ADN** unido a **proteínas** y tiene el aspecto de una maraña de fibras.

Si recordamos lo que se describió en unidades anteriores, las proteínas que forman parte fundamental de la cromatina son las **histonas**. En cada fibra de cromatina, el ADN se enrolla alrededor de un octámero de histonas a modo de carrete de hilo, de manera que su larguísima molécula se empaqueta en una menor longitud, de una forma organizada.



DNA

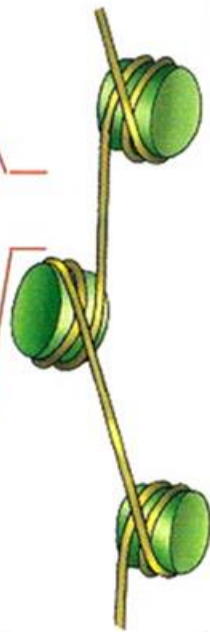
cromatina

empaquetamiento de la cromatina

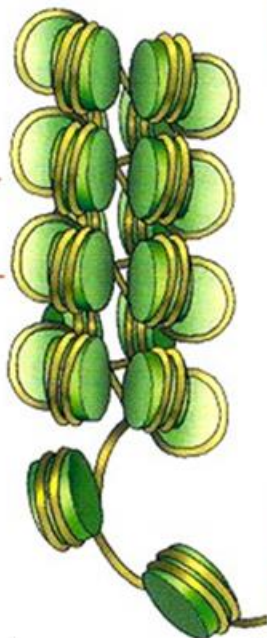
cromosoma metafásico al
microscopio electrónico



2 nm



11 nm



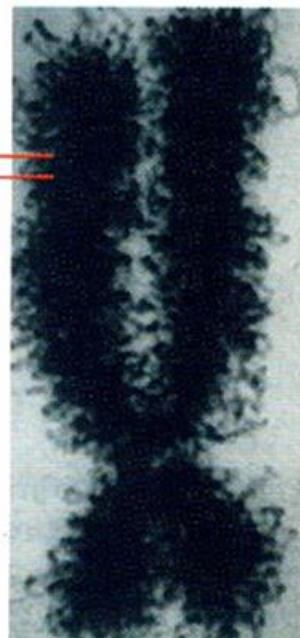
30 nm



300 nm



700 nm



1400 nm

Doble
hélice

(2 nm)

“Collar de
perlas”

(10 nm)

Solenoid
(30 nm)

Filamento
de 300 nm

Filamento
de 700 nm

Cromosoma

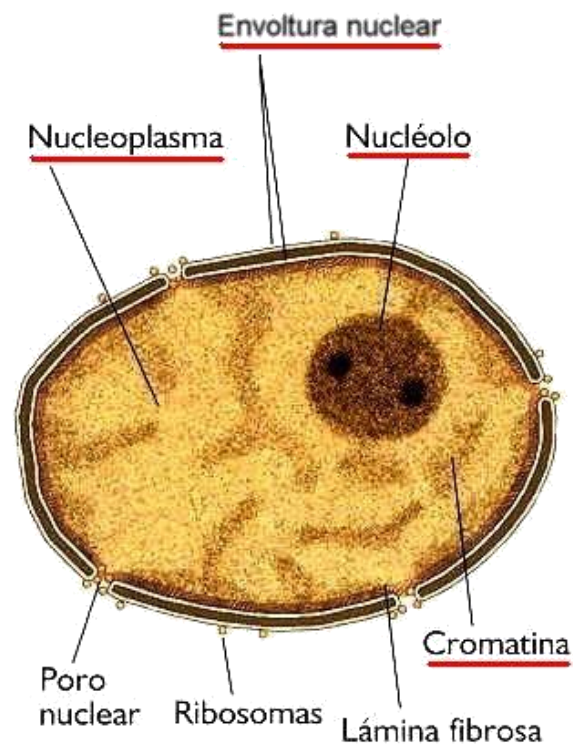


La cromatina

La **cromatina** es la forma poco condensada que tiene el material genético en el núcleo interfásico. Está formada por **ADN** unido a **proteínas** y tiene el aspecto de una maraña de fibras.

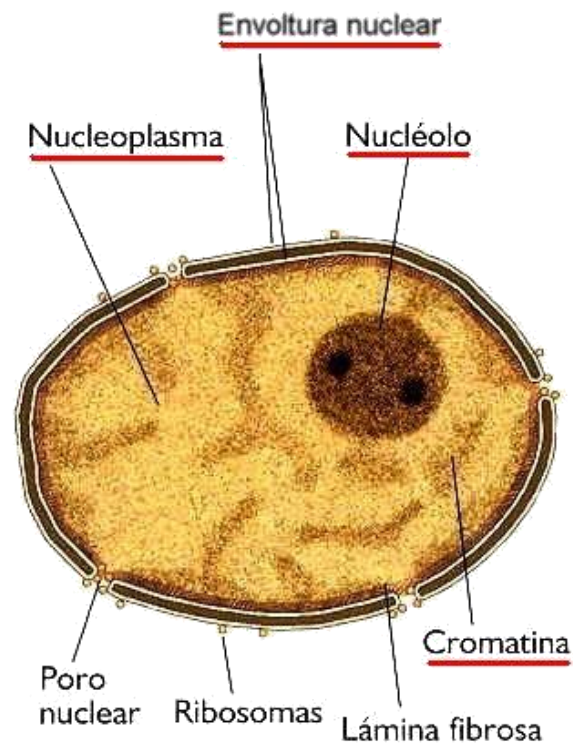
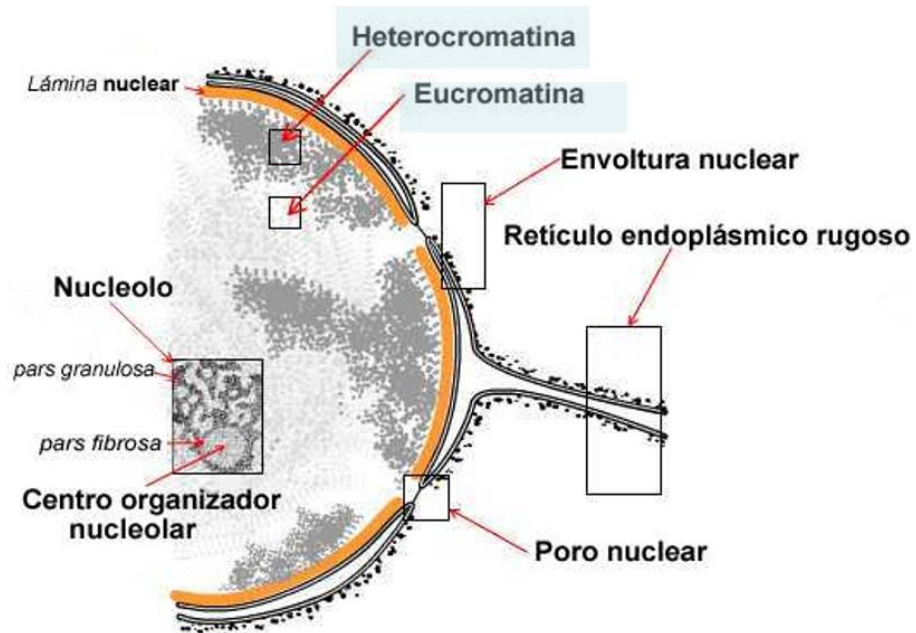
Si recordamos lo que se describió en unidades anteriores, las proteínas que forman parte fundamental de la cromatina son las **histonas**. En cada fibra de cromatina, el ADN se enrolla alrededor de un octámero de histonas a modo de carrete de hilo, de manera que su larguísima molécula se empaqueta en una menor longitud, de una forma organizada.

Este empaquetamiento tiene distintos grados, ya que las regiones de ADN que se transcriben, se desenrollan para quedar más accesibles a los complejos enzimáticos de la transcripción. Esto es visible al microscopio, ya que la cromatina aparece como una mezcla de dos regiones:



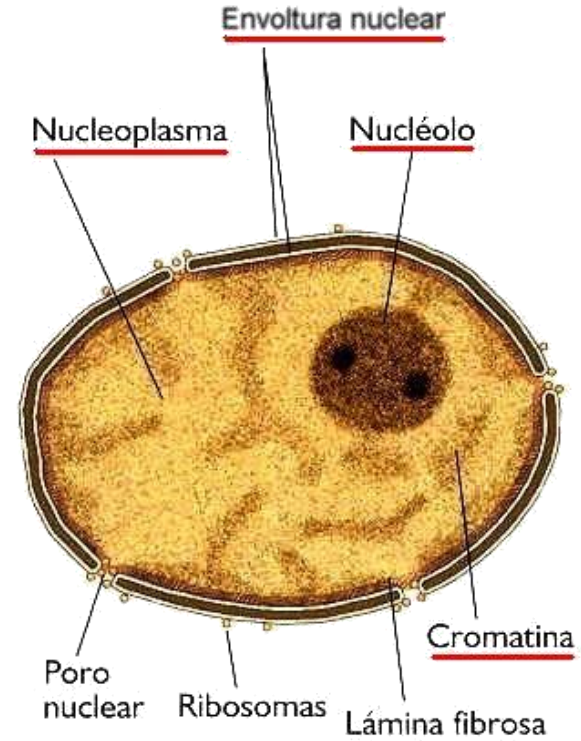
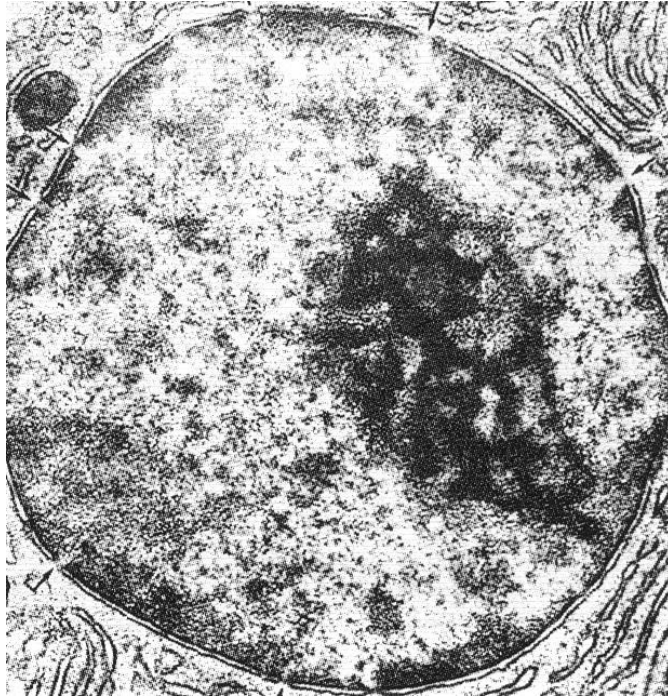
La heterocromatina. Se llama así a las regiones de la cromatina de aspecto más teñido, con un mayor grado de condensación, que se corresponden con partes del ADN que no se están transcribiendo o lo hacen poco.

La eucromatina. Se llama así a las amplias zonas menos teñidas, en las que la cromatina está menos condensada y en la que se está llevando a cabo la transcripción del ADN.



El nucléolo

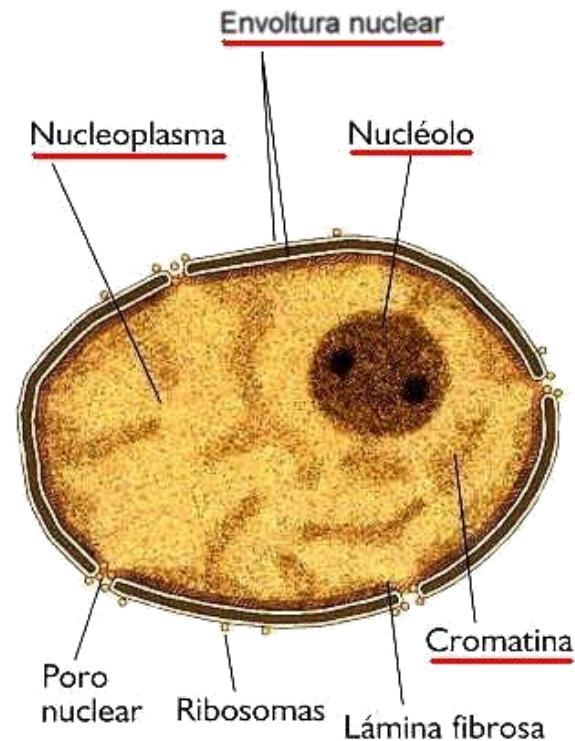
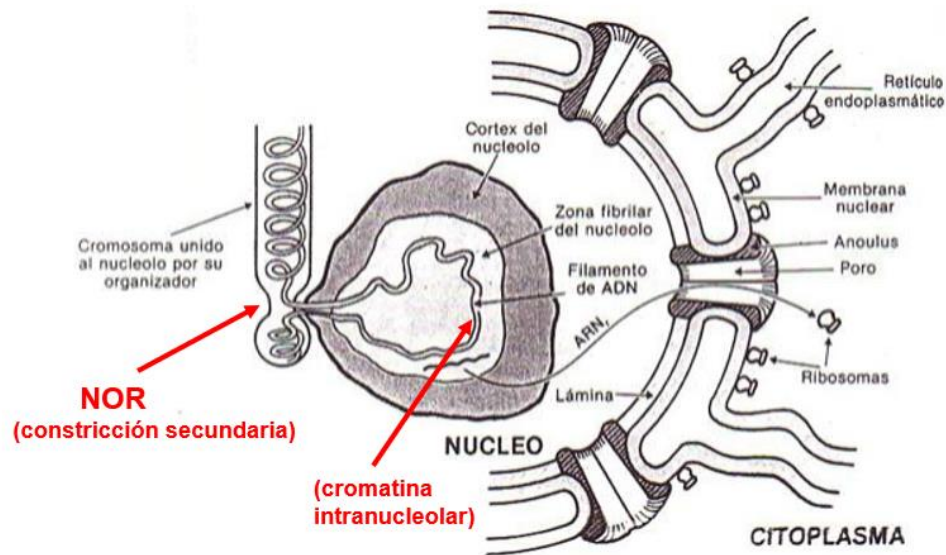
El **nucléolo** es una estructura esférica que se encuentra en el interior del núcleo y que está formada por **ADN, ARNr y proteínas ribosomales**.



El nucléolo

El **nucléolo** es una estructura esférica que se encuentra en el interior del núcleo y que está formada por **ADN, ARNr y proteínas ribosomales**.

Se sitúa cerca de ciertas áreas de cromatina que contienen el ADN cuya transcripción origina el ARNr. Estas áreas se llaman **regiones organizadoras del nucléolo (NOR)** porque, al finalizar la mitosis, el nucléolo se reorganiza en ellas.



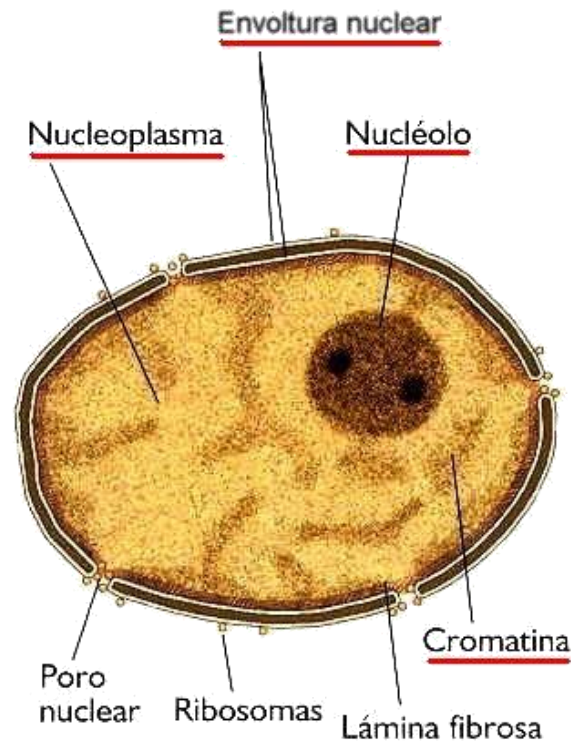
El nucléolo

El **nucléolo** es una estructura esférica que se encuentra en el interior del núcleo y que está formada por **ADN, ARNr y proteínas ribosomales**.

Se sitúa cerca de ciertas áreas de cromatina que contienen el ADN cuya transcripción origina el ARNr. Estas áreas se llaman **regiones organizadoras del nucléolo (NOR)** porque, al finalizar la mitosis, el nucléolo se reorganiza en ellas.

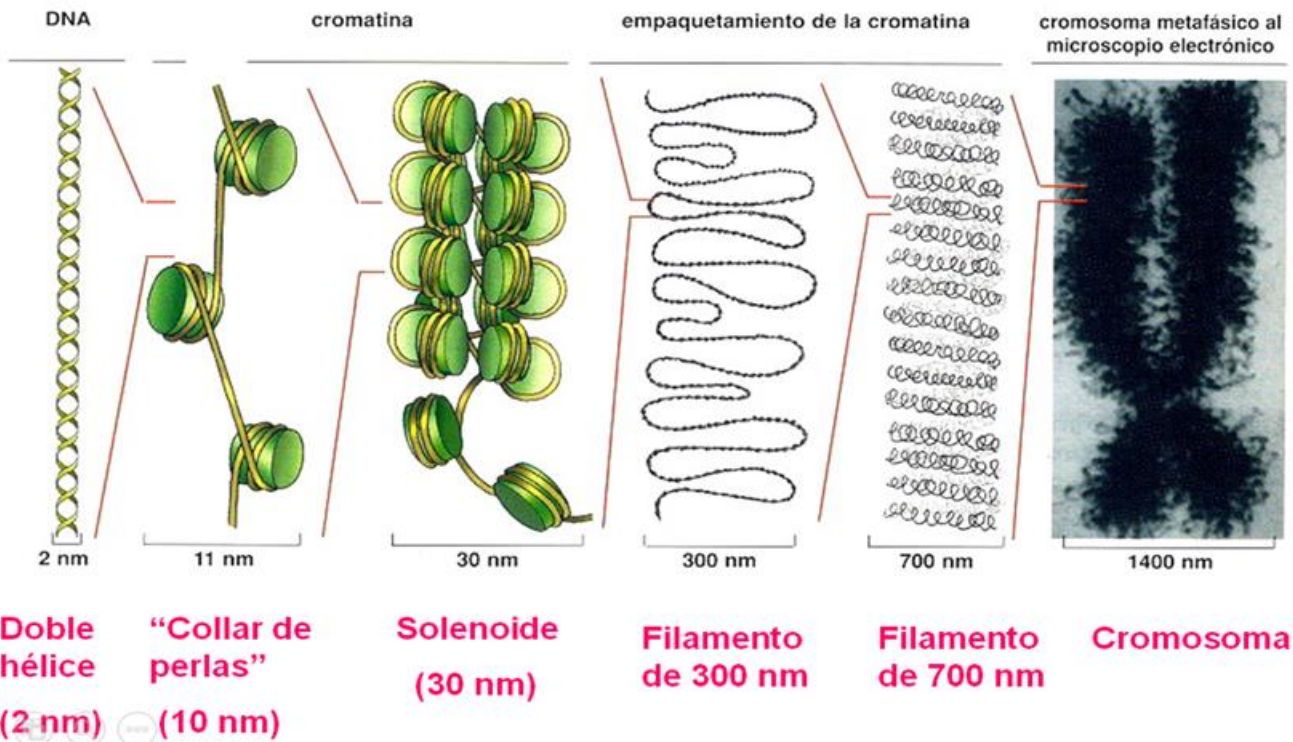
Las funciones del nucléolo son la síntesis del ARNr (excepto la del ARNr 5S, que se sintetiza fuera del nucléolo) y la organización de las subunidades de los ribosomas a partir del ARNr y las proteínas ribosomales. Las subunidades ribosomales salen del núcleo a través de los poros nucleares.

El tamaño del nucléolo es mayor en las células con intensa síntesis proteica, como los ovocitos, que fabrican vitelo, o las células de las glándulas, que producen sus secreciones. Estas células pueden tener más de un nucléolo. En cambio, las células con escasa síntesis de proteínas, como las neuronas, tienen un nucléolo muy pequeño, y los espermatozoides incluso carecen de él.



1.2. El núcleo en fase de división

Cuando una célula entra en fase de división, **el núcleo se desorganiza** mientras que las diferentes fibras de cromatina se compactan en unidades denominadas **cromosomas**.



1.2. El núcleo en fase de división

Cuando una célula entra en fase de división, **el núcleo se desorganiza** mientras que las diferentes fibras de cromatina se compactan en unidades denominadas **cromosomas**.

Cuando da comienzo la división celular, la actividad metabólica de la célula disminuye y el núcleo sufre diversas transformaciones:

La envoltura nuclear desaparece y como consecuencia el nucleoplasma queda disperso.

El nucléolo se desintegra. Se detiene la transcripción del ADN, por lo que no se sintetiza ningún ARN.

La cromatina se condensa. Las fibras de cromatina, con el ADN ya duplicado para la división, se enrollan sobre sí mismas y se van haciendo más cortas y anchas hasta transformarse en **cromosomas**.

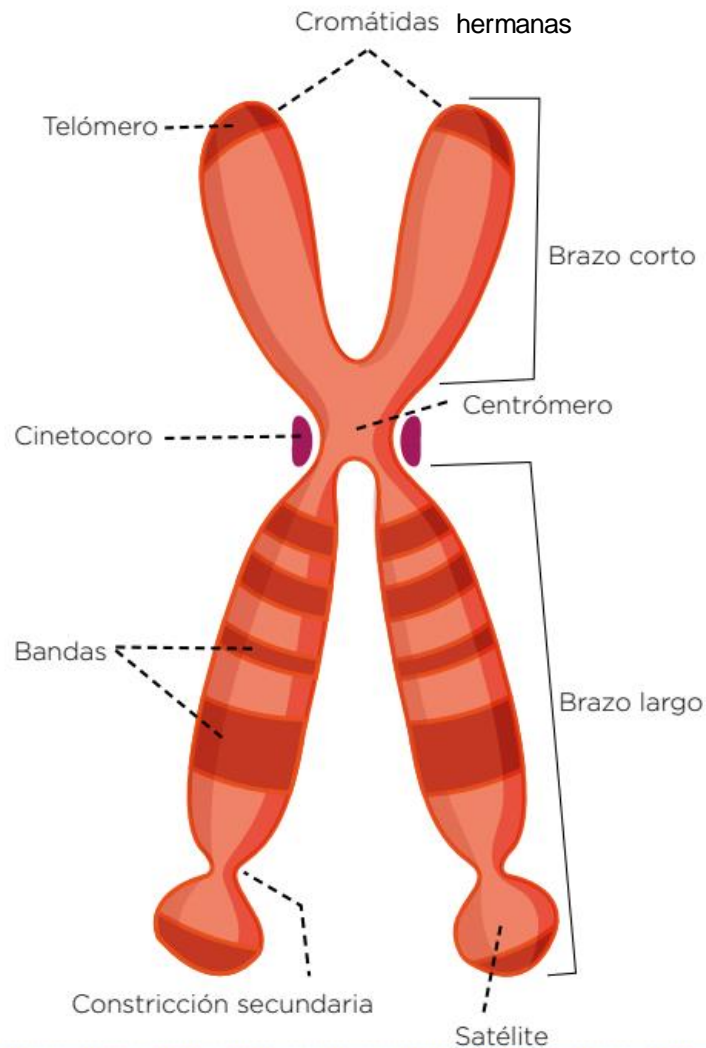
Estas transformaciones son temporales y solo tienen efecto mientras dura la división celular, de modo que, al final de dicha división, se revierten y la envoltura nuclear se reorganiza, el nucleoplasma se regenera, los cromosomas se descondencen en cromatina y se reanuda la transcripción de los genes en ARN y la actividad metabólica celular.

Los cromosomas

Los cromosomas son estructuras visibles al microscopio óptico, que se forman por el superenrollamiento o empaquetamiento que experimentan las fibras de cromatina cuando el núcleo entra en fase de división.

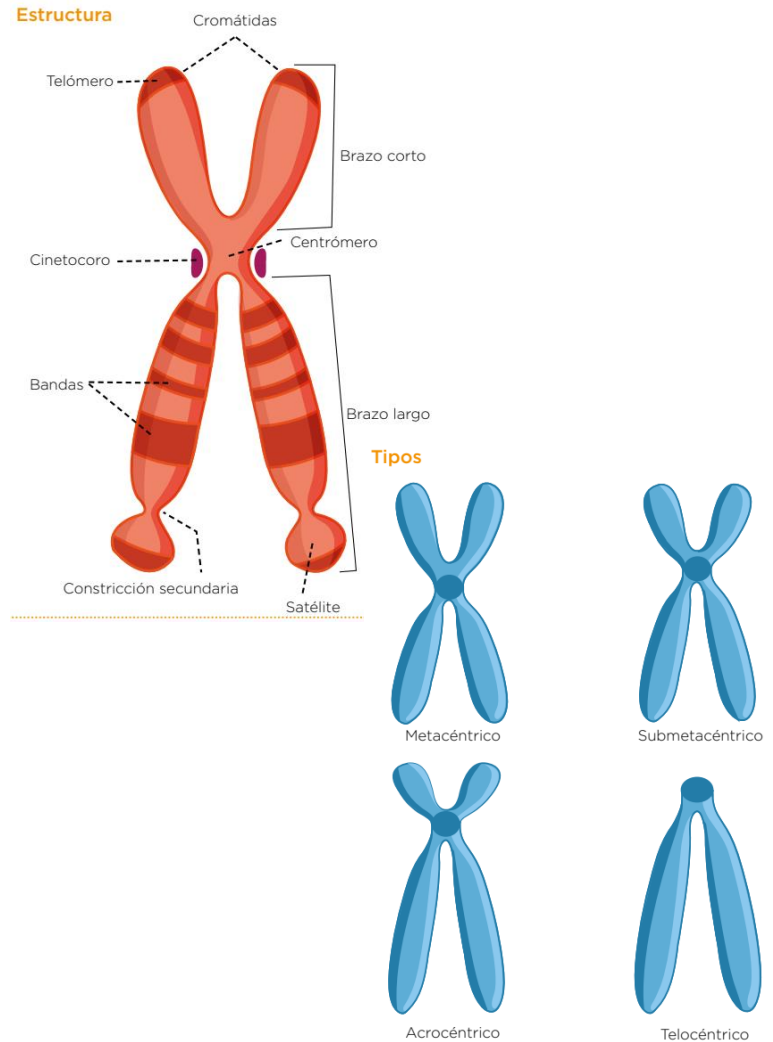
Cuando las fibras de cromatina se están empaquetando, el ADN de cada una ya se ha duplicado para repartirse en la división celular. Por eso, cuando los cromosomas alcanzan su mayor grado de empaquetamiento, se ven al microscopio como conjuntos de dos bastones, llamados **cromátidas hermanas**, que se unen entre sí por una región llamada **centrómero**.

- **Las cromátidas hermanas** son idénticas en cuanto a su forma y a la información que contienen, ya que cada una está formada por una de las dos moléculas de ADN que se duplicaron. Cuando los cromosomas se tiñen para su observación al microscopio, las dos cromátidas de un mismo cromosoma forman un mismo patrón de bandas claras y oscuras. Este **bandeo cromosómico** permite identificar los cromosomas.

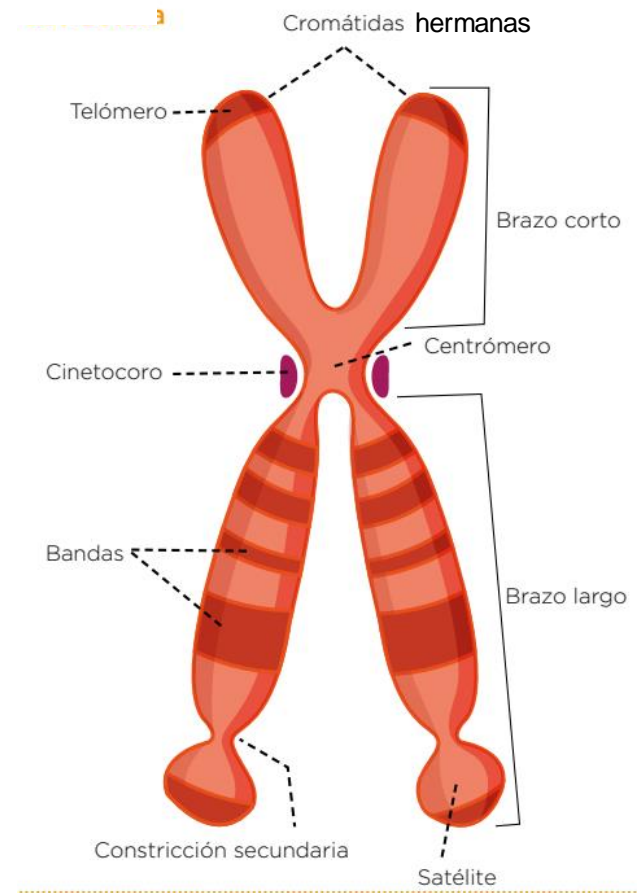


- **El centrómero** es la zona del cromosoma en la que se unen las dos cromátidas hermanas. Aparece como el estrechamiento principal del cromosoma, por lo que se llama **constricción primaria**. Divide el cromosoma en cuatro brazos: dos superiores y dos inferiores. Según la longitud de esos brazos, los cromosomas se clasifican en los siguientes tipos:

- **Metacéntricos.** Tienen un centrómero central y brazos de longitud muy similar.
- **Submetacéntricos.** Su centrómero se encuentra desplazado hacia uno de los extremos, por lo que tienen dos brazos algo más cortos que los otros dos.
- **Acrocéntricos.** Su centrómero está muy cerca de uno de los extremos, de modo que tienen dos brazos muy cortos y dos muy largos.
- **Telocéntricos.** Su centrómero está justo en un extremo, por lo que solo se distinguen dos brazos largos.



- **Los cinetocoros** son unas estructuras proteicas que se forman a cada lado del centrómero. A ellas se unen los microtúbulos del huso que desplaza los cromosomas en la división.
- **Los telómeros** son regiones de los extremos de los brazos de los cromosomas. Son fundamentales para conservar la estabilidad estructural de los cromosomas y para restaurar la degradación que se produce en ellos tras cada división celular. En ocasiones tienen **satélites**, que son zonas redondeadas formadas por una **constricción secundaria** al final del brazo.



Telómero

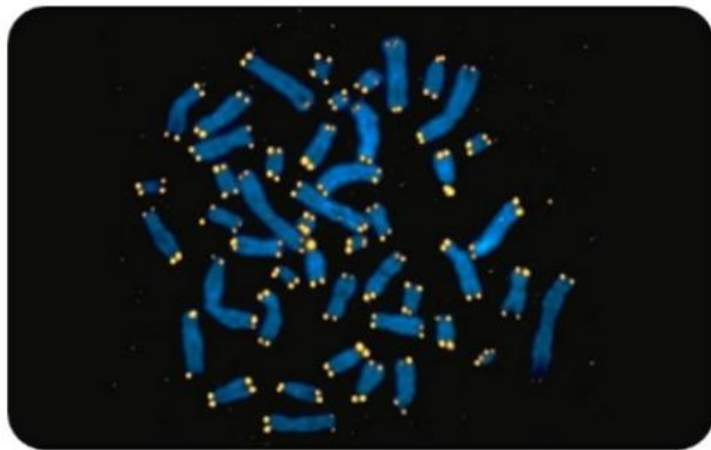
Elemento de DNA que sella los extremos de los cromosomas y les confiere estabilidad.

Integridad estructural

Asegura la replicación de los extremos del cromosoma

Protegen los cromosomas de las nucleasas (enzimas que digieren ADN)

Envejecimiento celular y cáncer





Los telómeros contienen secuencias cortas y ricas en T y G que se acortan durante la división celular. Con el tiempo esta erosión termina por eliminar los telómeros y, con ellos, algunos genes decisivos, por lo que la célula deja de dividirse y muere.

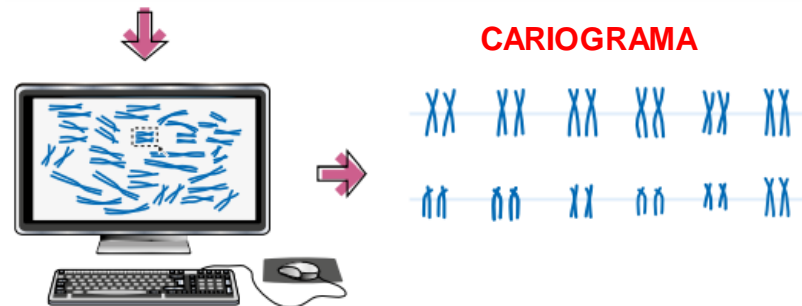
Algunas células, como las células madre contienen telomerasa que alarga los extremos de los cromosomas perdidos en cada división celular.

El cariotipo

El **cariotipo** es el conjunto formado por todos los cromosomas de una célula (su **dotación cromosómica**).

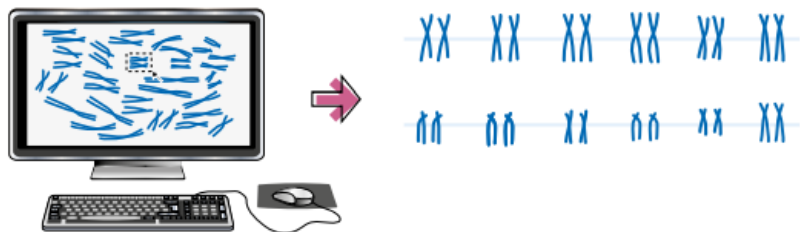
El cariotipo se puede visualizar al microscopio tratando y tiñendo una muestra de células que estén en fase de división, de modo que los cromosomas tengan un alto grado de condensación.

Una vez teñidos, los cromosomas mostrarán su bandeo característico. Entonces se realiza la observación y se toman microfotografías de la muestra. Estas fotografías se amplían y se tratan mediante un programa de edición para separar las imágenes de cada uno de los cromosomas y ordenarlos de mayor a menor. Así se obtiene un **cariograma**, que nos sirve como herramienta de estudio de los cromosomas para detectar anomalías en el número o en las características de los cromosomas.

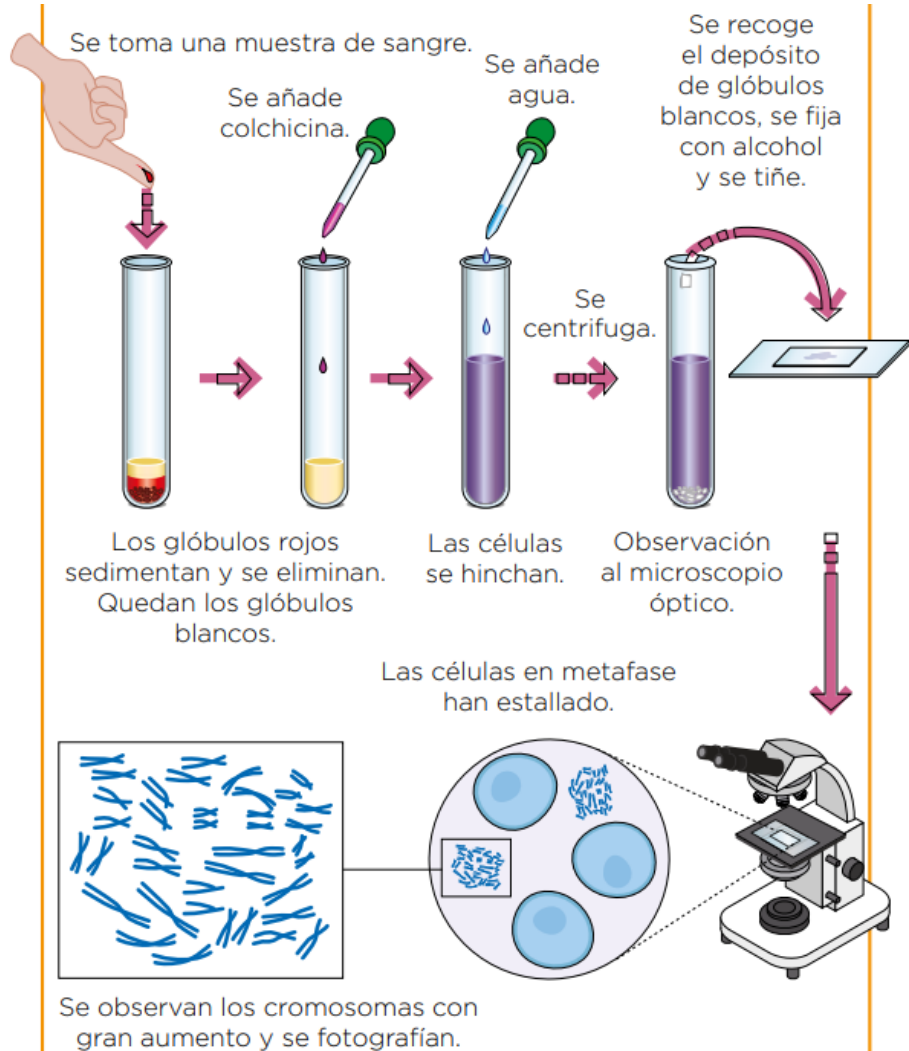


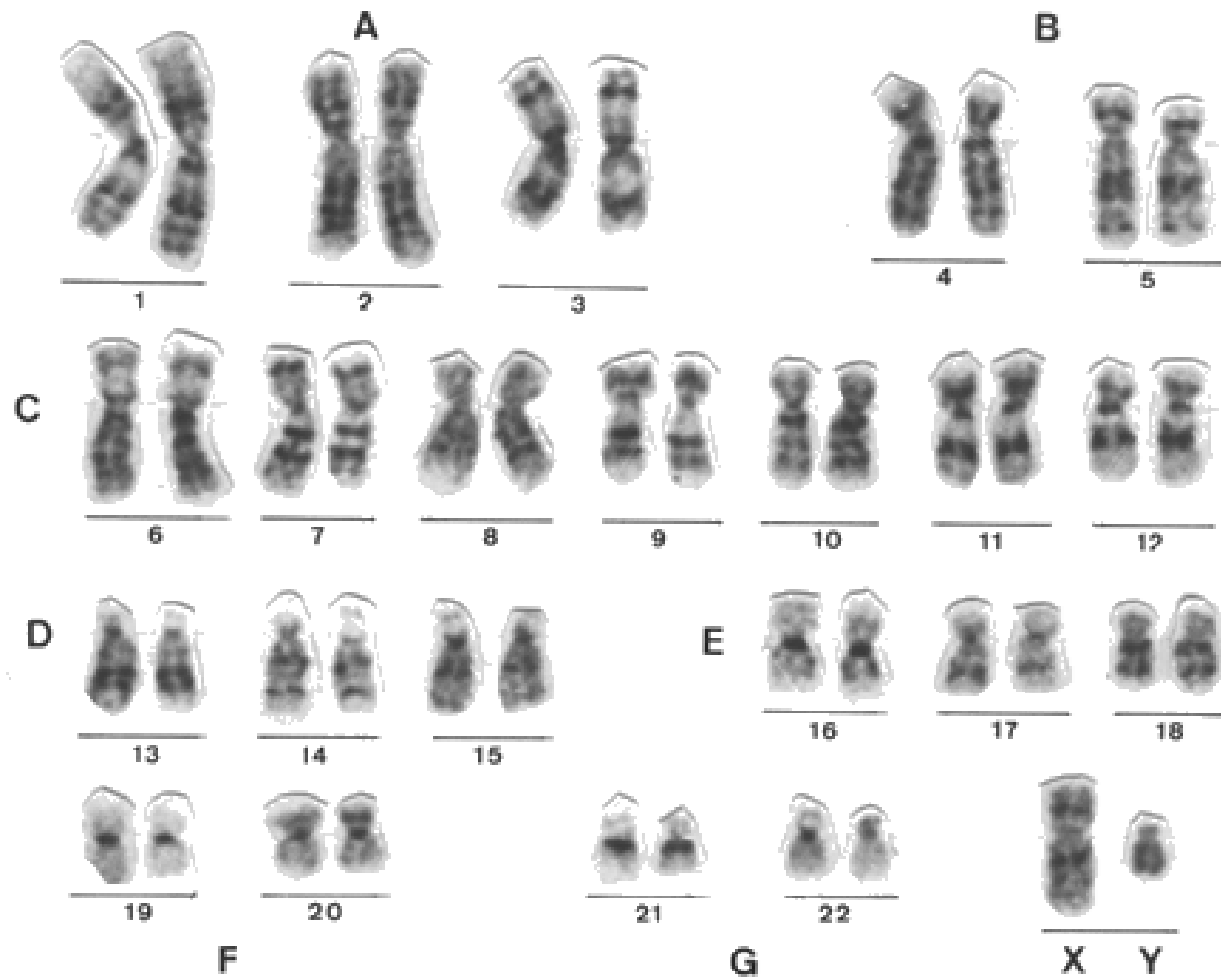
Con una aplicación informática de edición de imágenes se seleccionan los cromosomas y se sitúan de forma ordenada con los centrómeros alineados.

El cariograma es la representación visual de un cariotipo

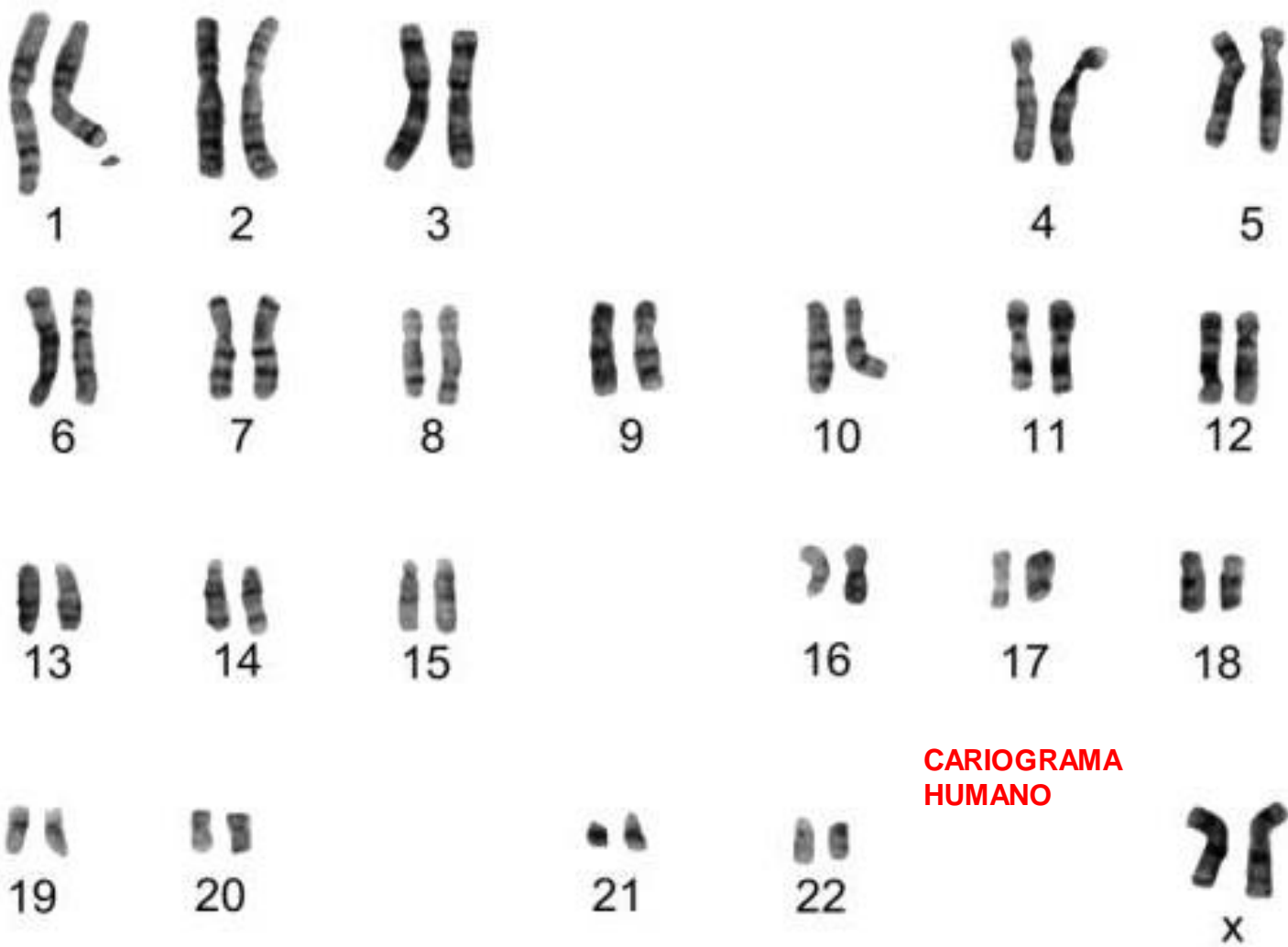


Con una aplicación informática de edición de imágenes se seleccionan los cromosomas y se sitúan de forma ordenada con los centrómeros alineados.

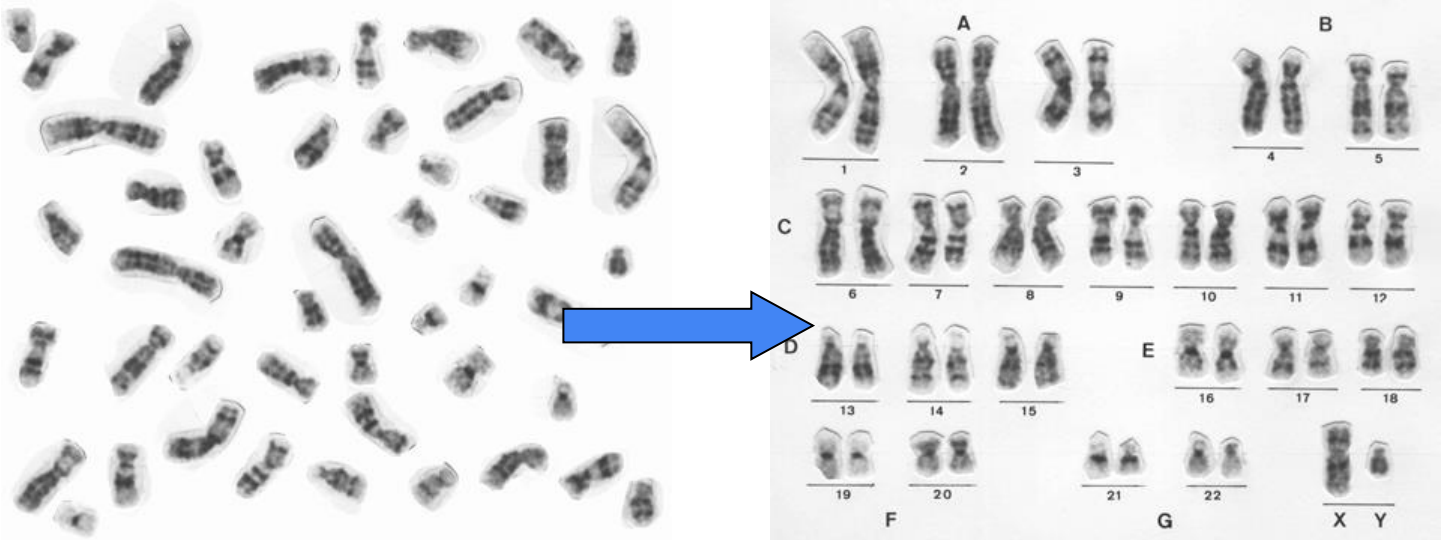




CARIOGRAMA HUMANO



CARIOGRAMMA
HUMANO

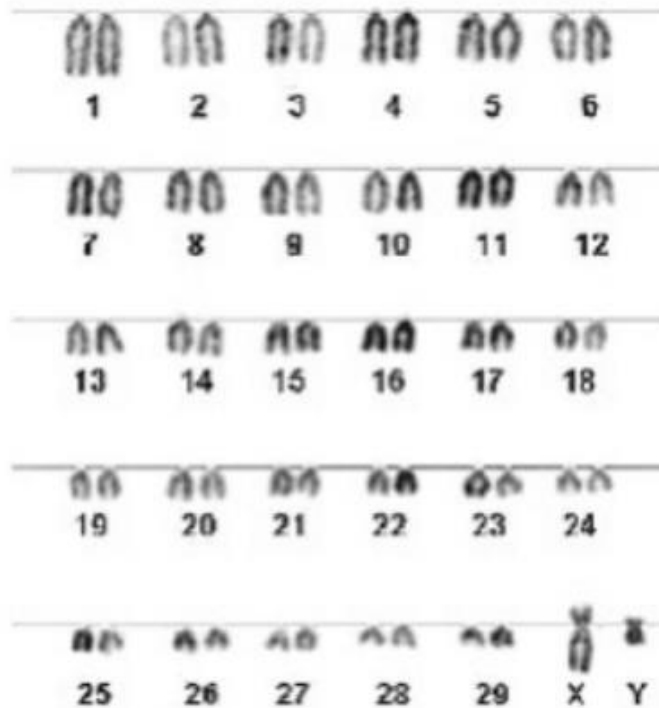


CARIOGRAMA HUMANO

- **Grupo A:** Se encuentran los pares cromosómicos 1, 2 y 3. Se caracterizan por ser cromosomas muy grandes, casi metacéntricos. En concreto, 1 y 3 metacéntricos; 2 submetacéntrico.
- **Grupo B:** Se encuentran los pares cromosómicos 4 y 5. Se trata de cromosomas grandes y submetacéntricos (con dos brazos muy diferentes en tamaño).
- **Grupo C:** Se encuentran los pares cromosómicos 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, X. Son cromosomas medianos submetacéntricos.
- **Grupo D:** Se encuentran los pares cromosómicos 13, 14 y 15. Se caracterizan por ser cromosomas medianos acrocéntricos con satélites.
- **Grupo E:** Se encuentran los pares cromosómicos 16, 17 y 18. Son cromosomas pequeños, metacéntrico el 16 y submetacéntricos 17 y 18.
- **Grupo F:** Se encuentran los pares cromosómicos 19 y 20. Se trata de cromosomas pequeños y metacéntricos.
- **Grupo G:** Se encuentran los pares cromosómicos 21, 22, Y. Se caracterizan por ser cromosomas pequeños y acrocéntricos (21 y 22 con satélites).



**Cariotipo de
ratón**



**Cariotipo de
toro**

Estos estudios han permitido determinar que los cariotipos tienen las características siguientes:

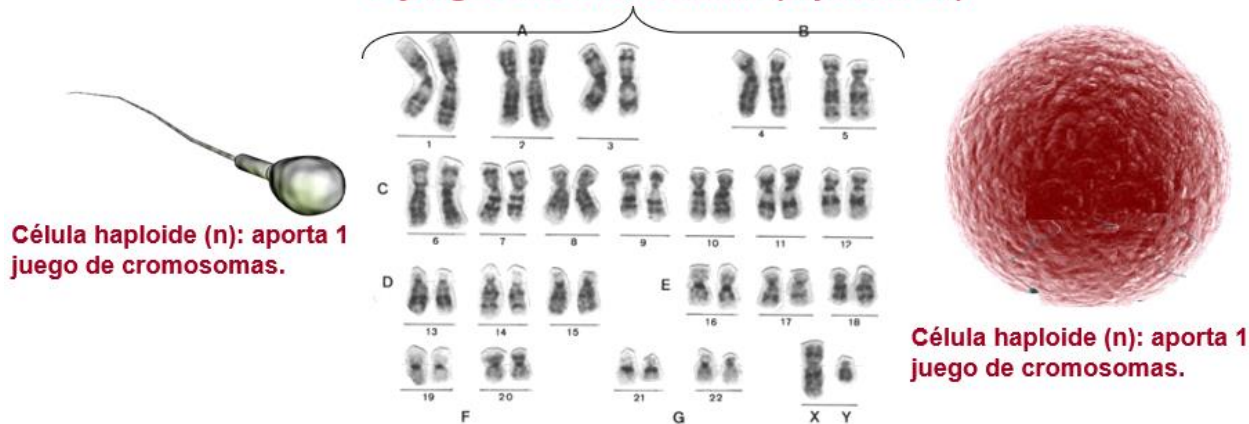
- **El número de cromosomas es constante y característico de cada especie;** es decir, que las células de todos los individuos de una especie tienen el mismo número de cromosomas. La especie humana, por ejemplo, tiene 46 cromosomas en cada célula.

Números de cromosomas en diferentes especies

Especie	Número de cromosomas
Hormiga <i>Myrmecia pilosula</i> , macho	1
Hormiga <i>Myrmecia pilosula</i> , hembra	2
Mosca de la fruta (<i>Drosophila melanogaster</i>)	8
Centeno (<i>Secale cereale</i>)	14
Caracol (<i>Helix</i>)	24
Gato (<i>Felis silvestris catus</i>)	38
Cerdo (<i>Sus scrofa</i>)	38
Ratón (<i>Mus musculus</i>)	40
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	42
Rata (<i>Rattus rattus</i>)	42
Conejo (<i>Oryctolagus cuniculus</i>)	44
Liebre (<i>Lepus europaeus</i>)	46
Humano (<i>Homo sapiens sapiens</i>)	46
Chimpancé (<i>Pan troglodytes</i>)	48
Patata, Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	48
Oveja (<i>Ovis aries</i>)	54
Vaca (<i>Bos taurus</i>)	60
Asno (<i>Equus asinus</i>)	62
Mula (<i>Equus mulus</i>)	63 (estéril)
Caballo (<i>Equus caballus</i>)	64
Camello (<i>Camelus bactrianus</i>)	74
Llama (<i>Lama glama</i>)	74
Perro (<i>Canis lupus familiaris</i>)	78
Gallina (<i>Gallus gallus</i>)	78
Paloma <i>Columbia livia</i>	80
Pez <i>Carassius auratus</i>	94
Mariposa	380
Helecho <i>Ophioglossum reticulatum</i>	1260
Protozoario <i>Aulacantha scolymantha</i>	1600

- **Los cromosomas están por parejas.** En las células de organismos **diploides** y con reproducción sexual, cada cromosoma tiene un **homólogo** idéntico a él en tamaño, forma y bandeo. Por tanto, la dotación cromosómica de estas células es siempre par ($2n$). Esto es porque uno de los cromosomas procede del gameto masculino y otro del gameto femenino. Los gametos, en cambio, son células **haploides**, es decir, solo cuentan con uno de los dos cromosomas homólogos de cada pareja y su dotación cromosómica es un número (n) que puede ser par o impar. Según esto, el ser humano tiene 23 parejas de cromosomas homólogos en cada célula.

2 juegos de cromosomas (diploide $2n$)



Cromosomas homólogos

Contienen los mismos genes, pero pueden estar en diferentes formas

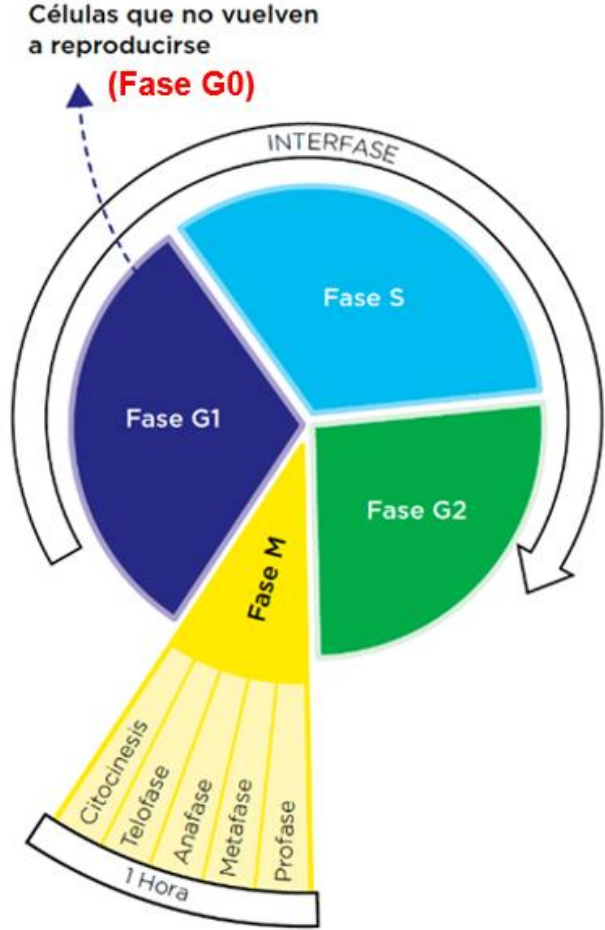
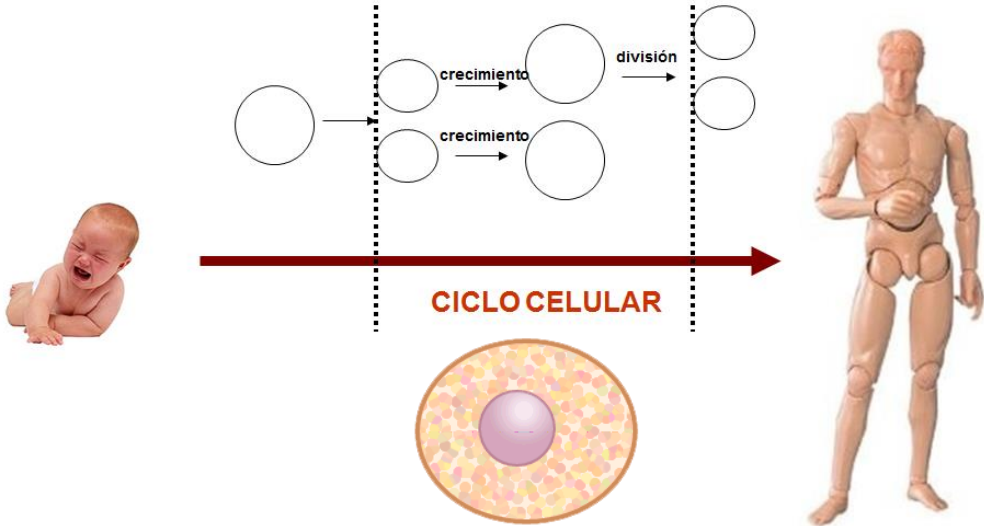


Las cromátidas hermanas son copias idénticas de un cromosoma

El ciclo celular

El **ciclo celular** es el conjunto ordenado de procesos y cambios que sufre una célula desde que surge por división de otra célula progenitora hasta que ella misma se divide generando dos células hijas.

A lo largo de su vida, las células experimentan una serie de procesos que se repiten de forma cíclica: la **interfase**, en la que la célula aumenta de tamaño, lleva a cabo toda su actividad metabólica y funcional y duplica en un momento dado su material genético, y la fase de **división celular**, en la que el material genético y el citoplasma se reparten en dos células hijas.



2.1. La interfase

La **interfase** es la fase más larga y variable del ciclo celular; en ella la célula crece y tienen lugar la mayor parte de las actividades celulares, entre ellas, la replicación del ADN y la síntesis proteica.

Se divide en tres subfases: la fase G1, la fase S y la fase G2.

La fase G1

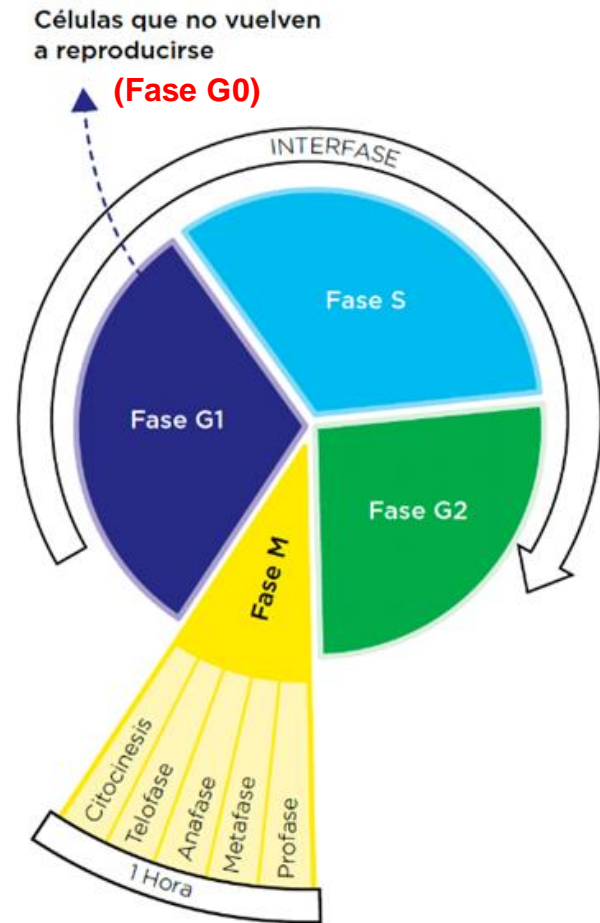
La **fase G1** comienza inmediatamente después de la división. Durante esta fase, la célula hija recién formada aumenta su tamaño y desarrolla toda su actividad metabólica.

En la fase G1, la célula lleva a cabo, sobre todo, estas acciones:

- Acumula energía en forma de ATP.
- Sintetiza proteínas y duplica orgánulos citoplasmáticos como los microtúbulos o los ribosomas.
- A partir del retículo endoplasmático, renueva y forma nuevas estructuras membranas.

En esta fase, las células que se especializan mucho, como las neuronas o las fibras del músculo estriado, pueden detener su ciclo en el llamado **punto R** o **punto de restricción**, que las hace permanecer en una especie de fase de reposo en la que nunca llegan a dividirse, denominada fase G0.

En cambio, las células que sobrepasan el punto R no tienen retorno posible y completan el ciclo pasando por las fases S, G2 y de división.



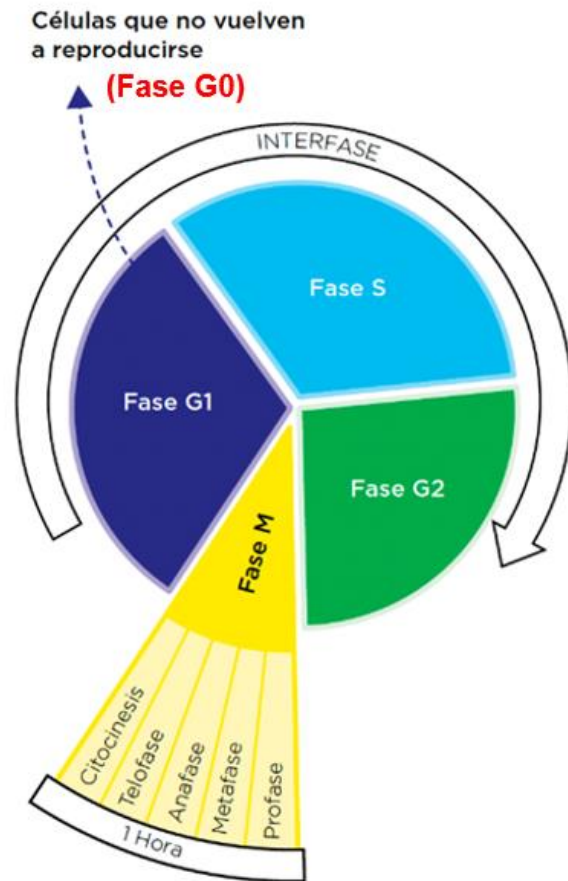
La fase S

En la **fase S** tiene lugar la replicación del ADN. En el núcleo de la célula, las enzimas sintetizan una copia fiel del ADN de la cromatina que constituye el genoma de la célula.

Al finalizar la fase S, la célula contiene en su núcleo dos copias de cada uno de sus cromosomas.

Además, durante esta fase se siguen transcribiendo los genes necesarios para la síntesis de las histonas y de otras proteínas útiles para la célula.

En las células animales, durante la fase S también comienza la duplicación de los centriolos, que después serán imprescindibles para la organización de los microtúbulos de la estructura del huso, que es la que guía la separación de los cromosomas durante la división celular.



La fase G2

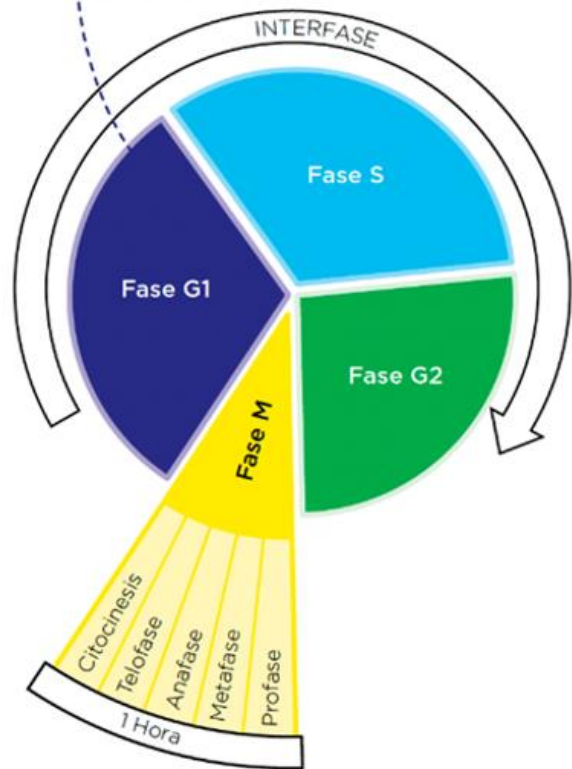
La **fase G2** es la etapa más corta del ciclo celular. En ella, la célula crece y realiza algunas acciones que la preparan para la división celular.

Los principales procesos de preparación que tienen lugar en la célula son:

- La generación de gran cantidad de ATP, que aportará energía.
- En las células animales concluye el proceso de duplicación de los centriolos. Cada uno de los dos centrosomas así formados comienza a migrar hacia uno de los polos celulares. Se sintetizan además proteínas como la tubulina, necesarias para la formación del huso y otras estructuras que intervienen en la división celular.
- Se inicia la condensación de la cromatina en cromosomas.

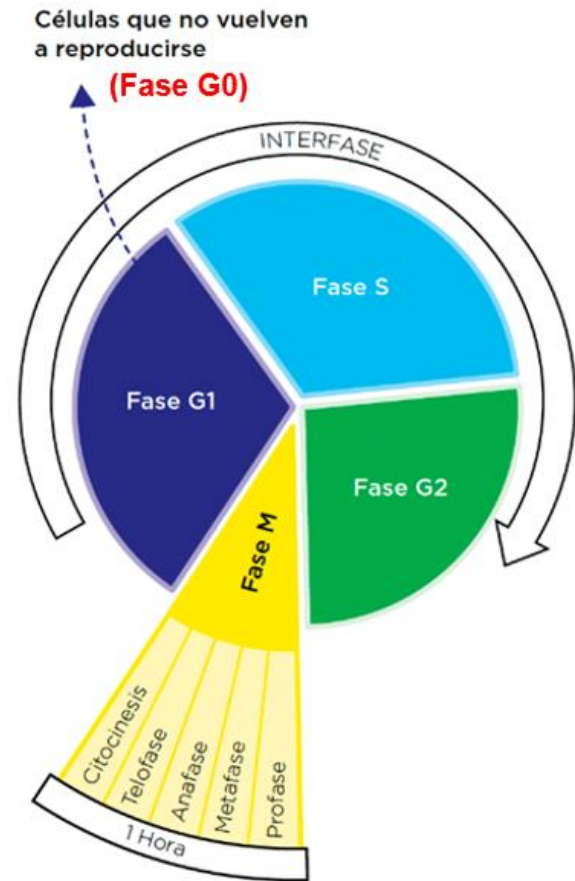
Células que no vuelven a reproducirse

(Fase G0)



2.2. La fase de división celular

La célula inicia su división, que implicará una **mitosis** para generar dos células hijas con la misma dotación cromosómica, o una **meiosis** en células que necesitan reducir su dotación cromosómica, como los gametos.



La mitosis

La **mitosis** o **cariocinesis** es un proceso que forma parte de la división celular, que es previo a la división del citoplasma, y que consiste en un **reparto equitativo de las dos copias idénticas del material genético de la célula**. Las células hijas resultantes tendrán idéntica dotación cromosómica que la célula madre y la misma información genética.

3.1. Significado biológico de la mitosis

Para los organismos unicelulares, la mitosis supone un mecanismo de reproducción asexual, que permite aumentar el número de individuos de una especie.

Para los organismos pluricelulares, la mitosis tiene como función la creación de nuevas células que les permitirán crecer o bien reponer sus estructuras envejecidas o dañadas.

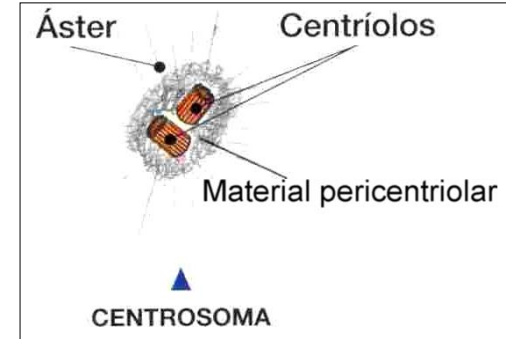
3.2. La mitosis, paso a paso

La mitosis es un proceso cuya duración varía entre veinte minutos y varias horas, según el tipo celular. Aunque se produce sin interrupción, para estudiarlo se pueden establecer en él cuatro fases: **profase**, **metafase**, **anafase** y **telofase**.

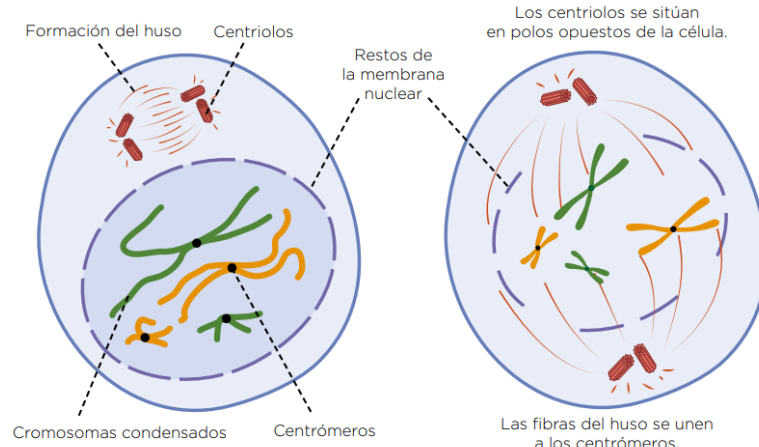
La profase

La profase es la fase con la que comienza la mitosis. Se caracteriza por que en la célula se producen los siguientes acontecimientos:

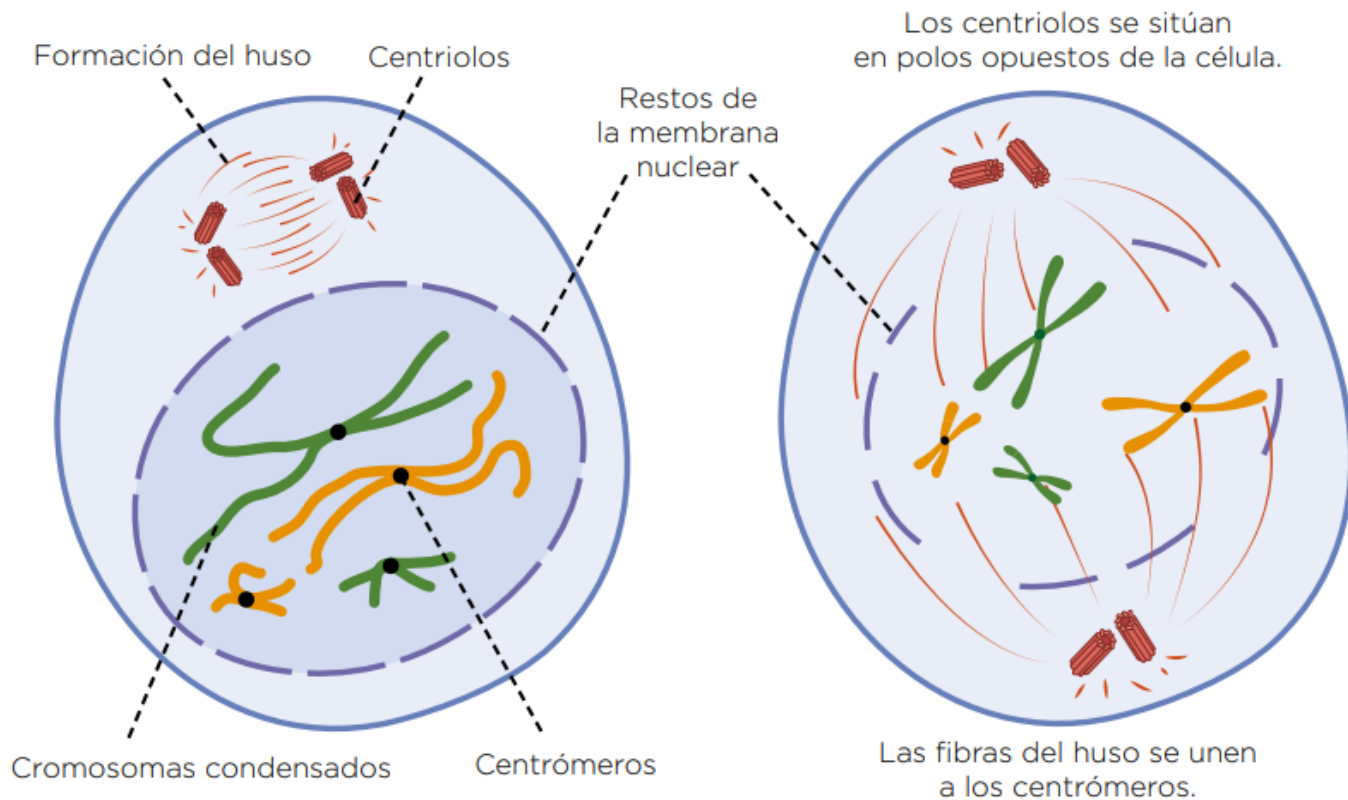
- **La cromatina se condensa.** Se forman los **cromosomas** y **comienzan a ser visibles.**
- **La membrana nuclear y el nucléolo se desintegran.** Los cromosomas quedan libres en el citoplasma celular. En esta fase, son visibles las **dos cromátidas hermanas** unidas por el **centrómero.**
- **Comienza a formarse el huso acromático.** En las células animales, los centriolos, ya duplicados, se dirigen a polos opuestos de la célula, al tiempo que empiezan a formar los filamentos a partir de las fibras del áster. Las células vegetales forman los filamentos del huso a partir de unos centros organizadores de microtúbulos, que no son centriolos sino unas regiones más densas del citoplasma.

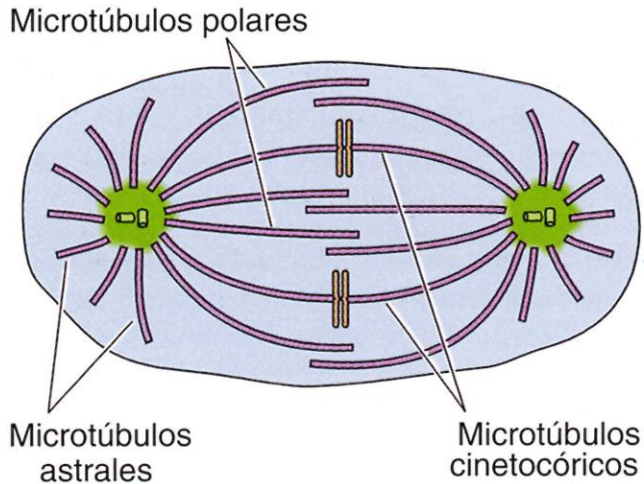


Profase

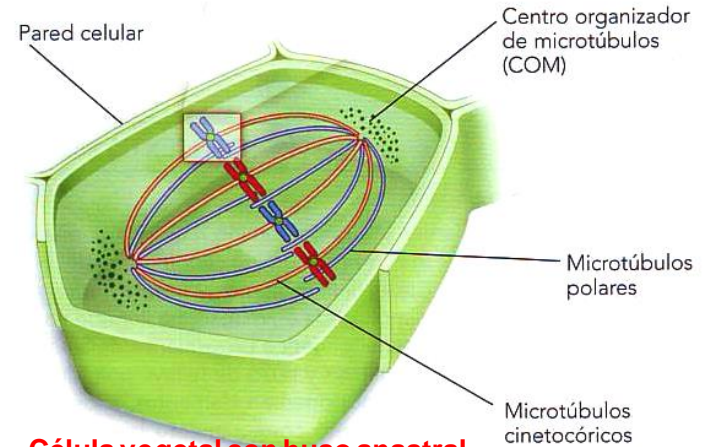


Profase





Célula animal con huso astral



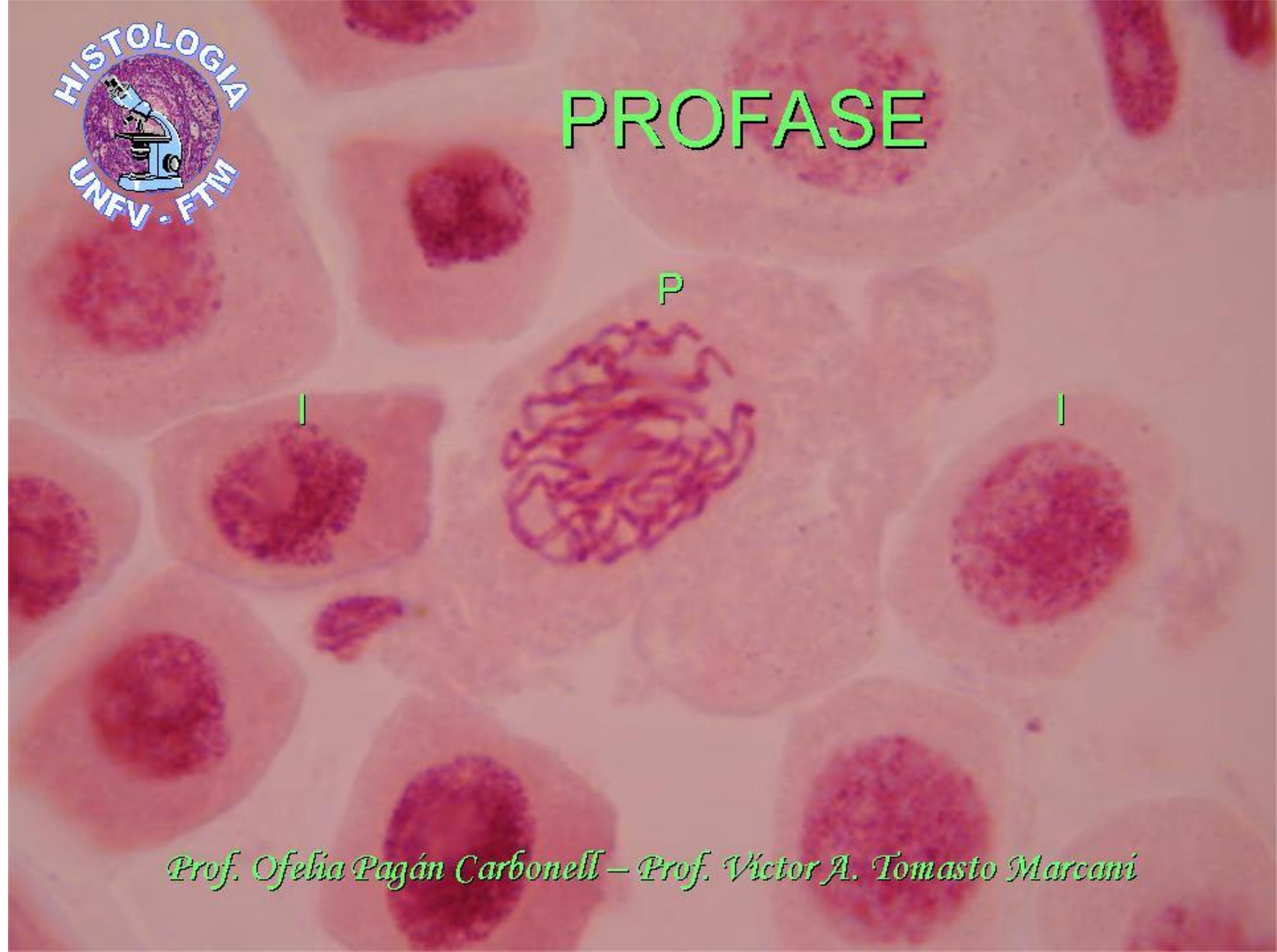
Célula vegetal con huso anastral

Metafase en células vegetales. En estas células, el huso se forma en ausencia de centriolos. Carece de microtúbulos astrales (áster) y está mucho menos centrado en los polos.

En esta fase las **células animales** presentan **dos centrosomas**, cada uno de los cuales tiene un diplosoma o pareja de centriolos dispuestos uno perpendicular al otro. Los dos centrosomas empiezan a separarse hasta que se sitúan en polos opuestos de la célula. A medida que se separan los centriolos, se forman entre ellos -por polimerización de **microtúbulos del áster**- los **microtúbulos polares**. En los centrómeros de cada cromosoma se forman los **cinetocoros**. Los microtúbulos polares que contactan con los cinetocoros se denominan **microtúbulos cinetocóricos**. Los tres tipos de microtúbulos mencionados forman el denominado **huso mitótico** o **acromático**.



PROFASE



Prof. Ofelia Pagán Carbonell – Prof. Víctor A. Tomasto Marcani



PROFASE TARDIA

Profase
tardia

M

Prof. Ofelia Pagán Carbonell – Prof. Víctor A. Tomasto Marcani

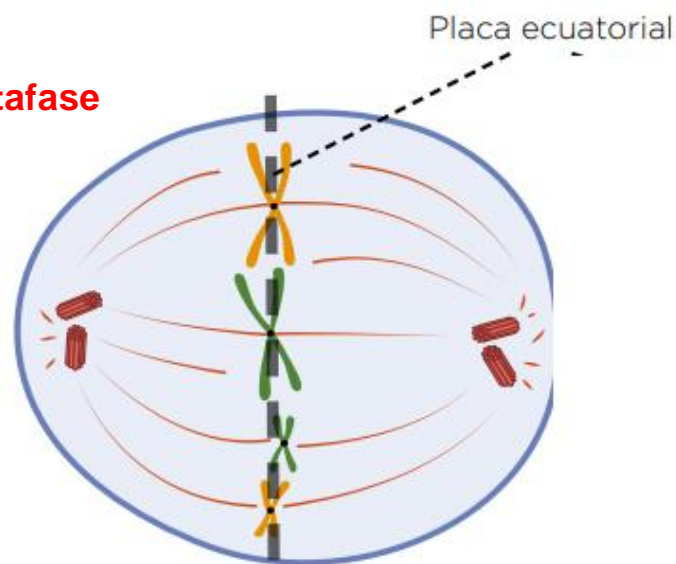
Metafase

En la metafase, **los cromosomas presentan su máximo grado de compactación** y se disponen en el ecuador de la célula formando la llamada **placa ecuatorial**. Lo hacen de manera que su eje longitudinal queda perpendicular a los filamentos del huso, y cada una de las cromátidas hermanas mira hacia un polo de la célula.

Anafase

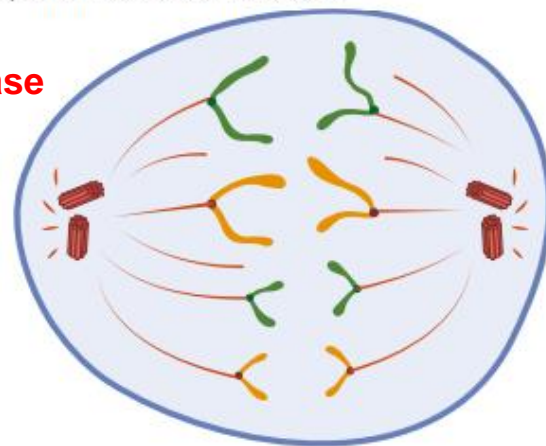
Durante la anafase, **los filamentos del huso mitótico comienzan a acortarse** y, como consecuencia, cada cromosoma se escinde por el centrómero, de modo que sus **cromátidas hermanas se separan y se dirigen cada una hacia un polo de la célula**. Las cromátidas individualizadas o **cromosomas anafásicos**, a diferencia de los de las fases anteriores, son cromosomas simples.

Metafase



Se separan las cromátidas.

Anafase





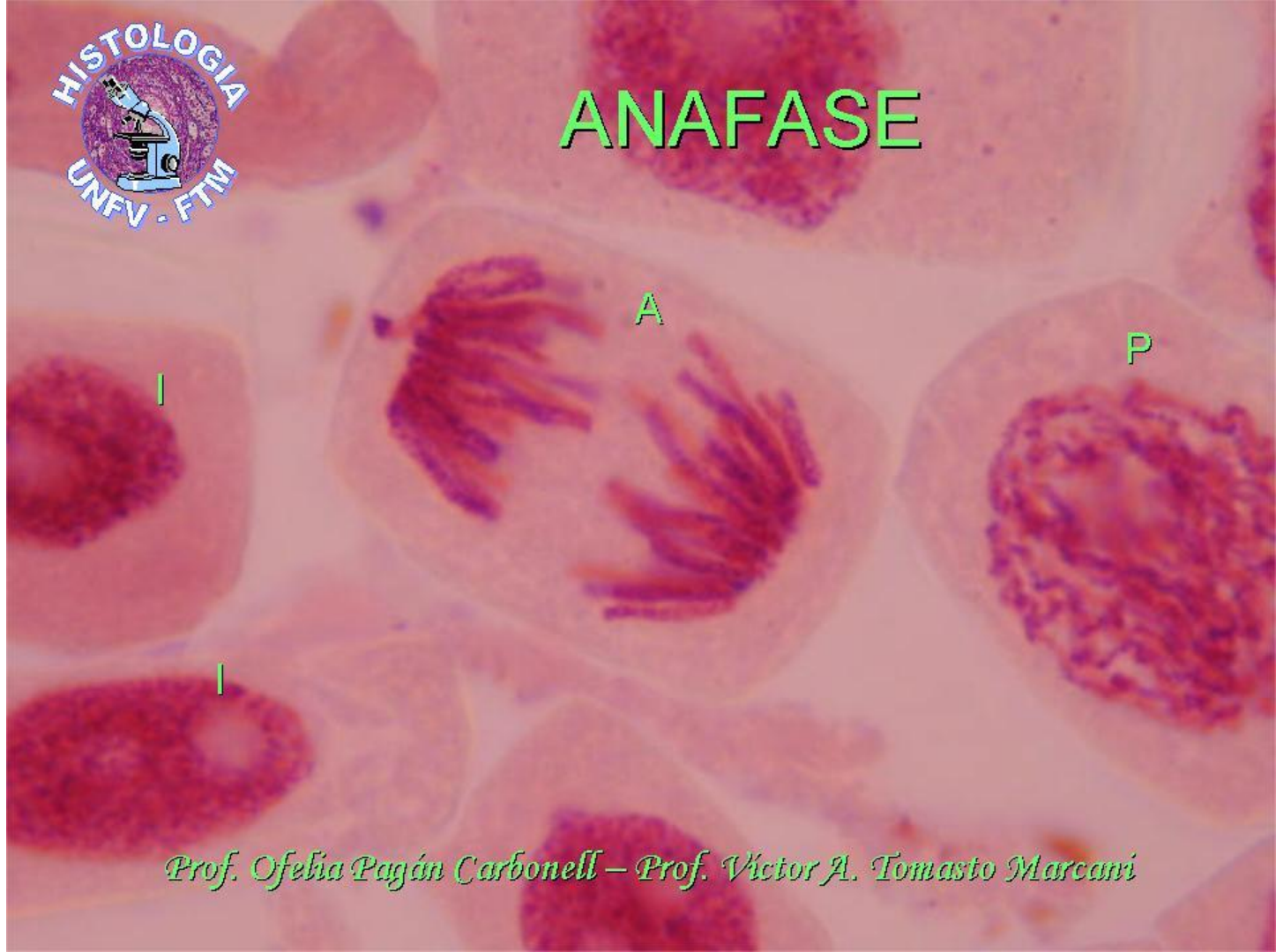
METAFASE



Prof. Ofelia Pagán Carbonell – Prof. Víctor A. Tomasto Marcani



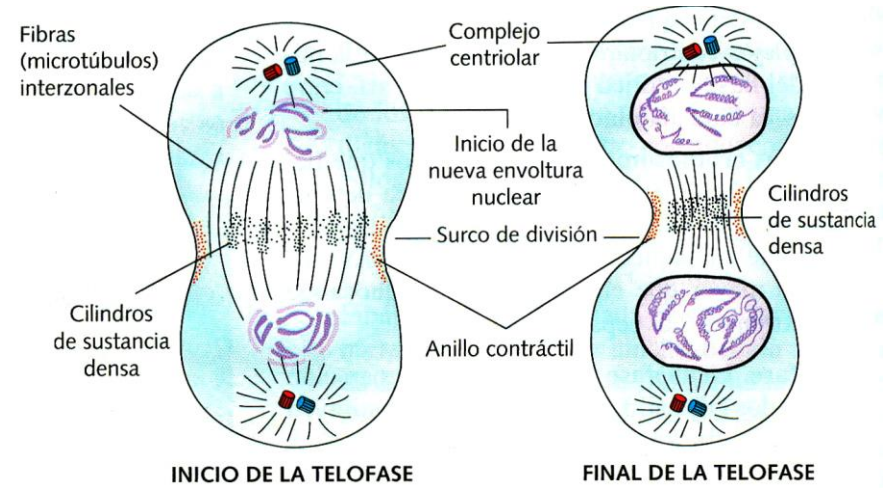
ANAFASE



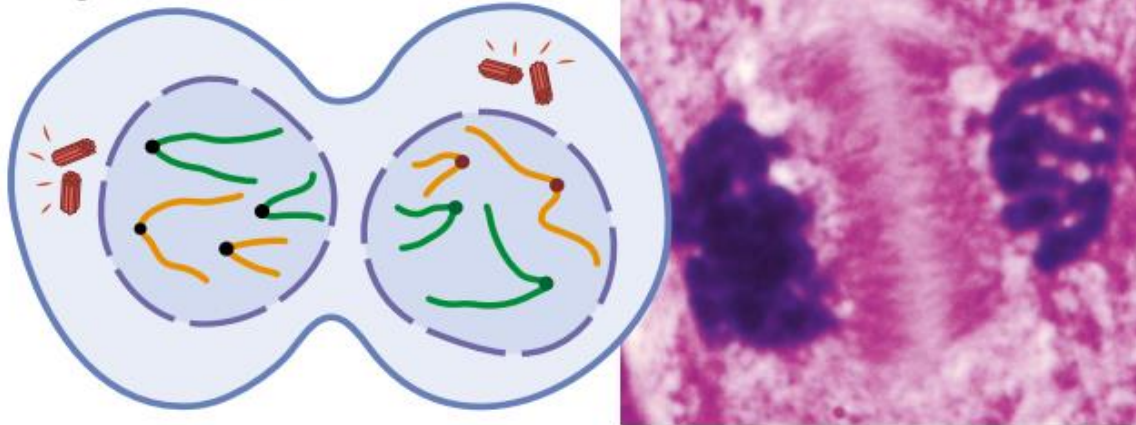
Prof. Ofelia Pagán Carbonell – Prof. Víctor A. Tomasto Marcani

Telofase

En la telofase, **cada grupo de cromosomas simples alcanza un polo de la célula**. A continuación, son rodeados de **nuevas envolturas nucleares**, formadas a partir de membranas del retículo endoplasmático. **Las fibras del huso desaparecen y los cromosomas comienzan a descondensarse**, dando lugar a la cromatina.



Reorganización del núcleo.

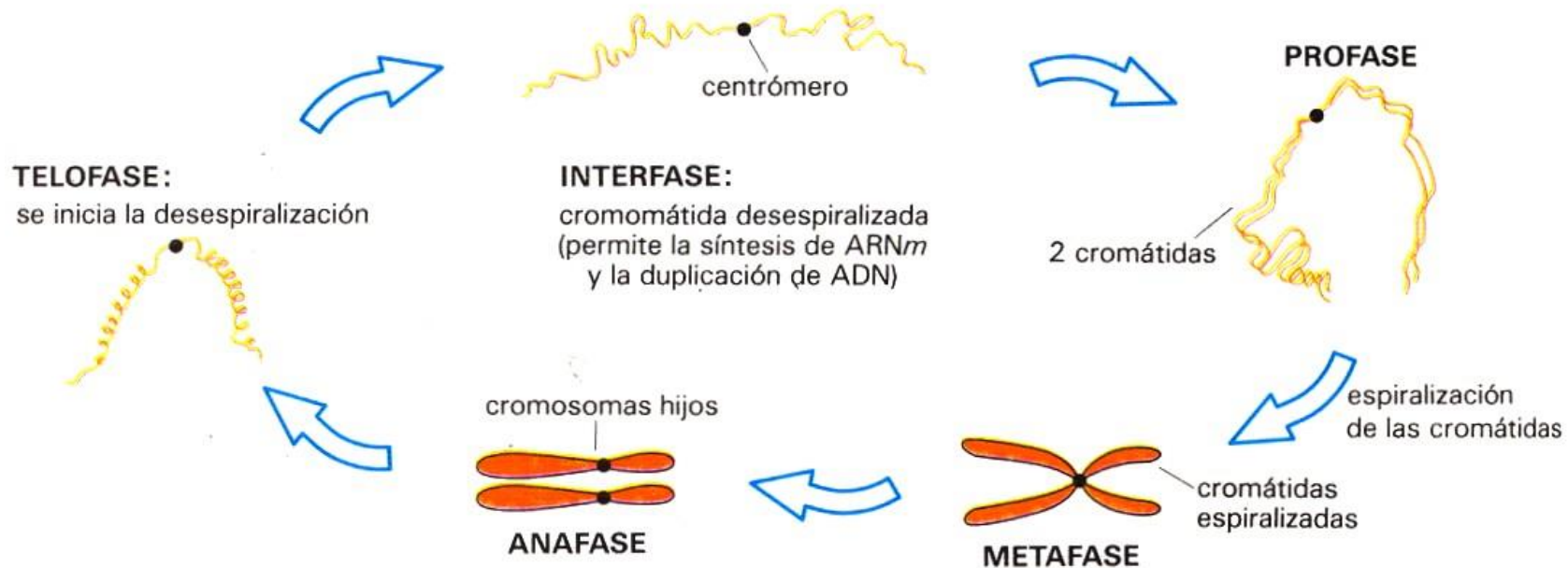




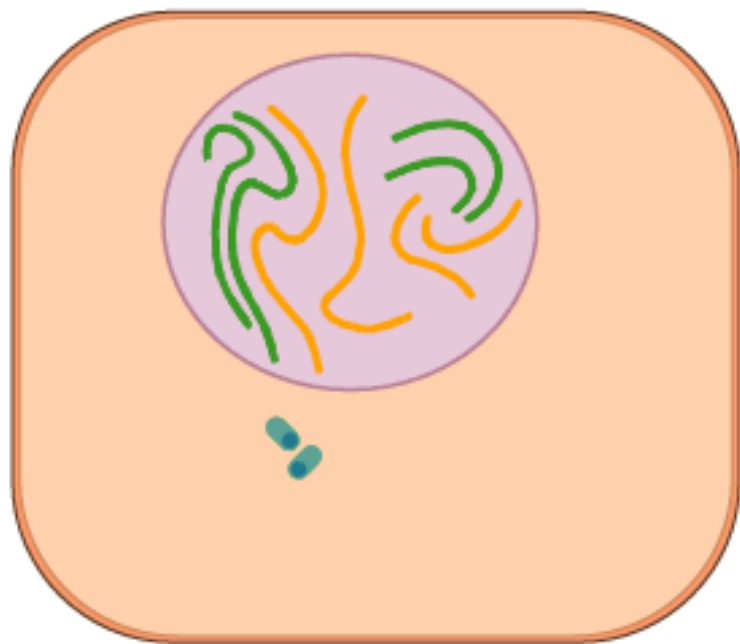
TELOFASE



Prof. Ofelia Pagán Carbonell – Prof. Víctor A. Tomasto Marcani



Ciclo del cromosoma durante la mitosis.



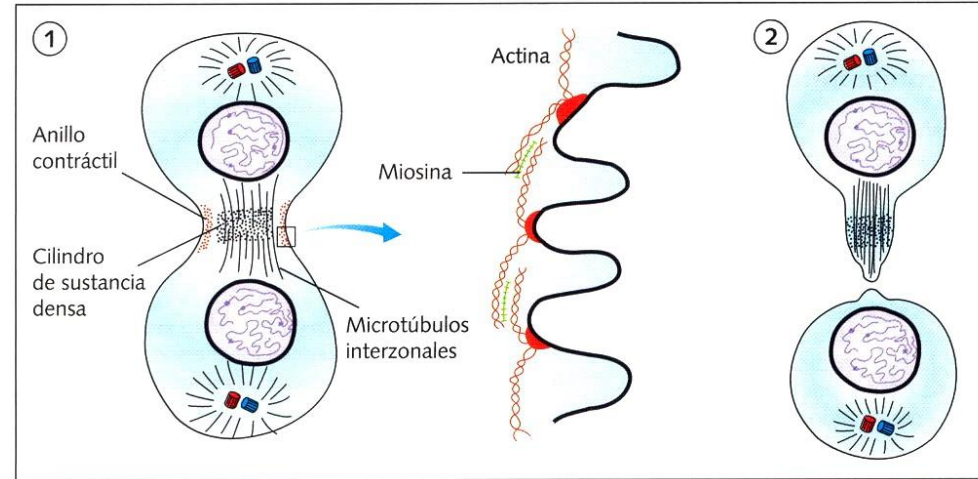
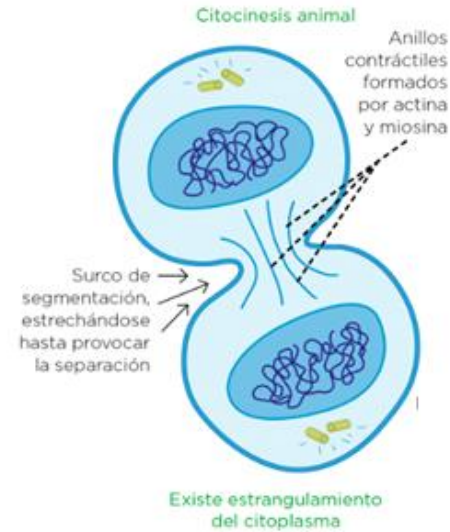
3.3. La citocinesis

Al final de la mitosis, más o menos durante la telofase, se produce la citocinesis o **división del citoplasma**, que dará lugar a dos células hijas independientes.

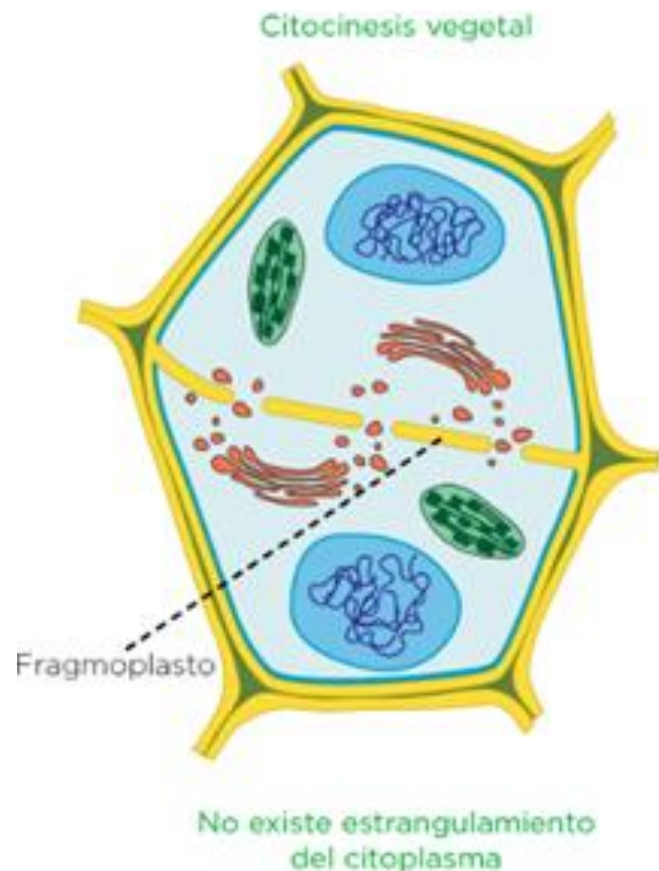
Este reparto del citosol y de los orgánulos citoplasmáticos se realiza al azar, pero cada célula hija debe recibir al menos una mitocondria, algunas vesículas del aparato de Golgi y del retículo endoplasmático y, en el caso de las células vegetales, algún cloroplasto.

La citocinesis se produce de forma diferente en las células animales y en las vegetales:

- **En las células animales** tiene lugar la formación de un **anillo contráctil de actina y miosina** junto a una invaginación de la membrana plasmática. Al producirse la contracción del anillo, la célula se estrangula por la zona de la placa ecuatorial, lo que separa el citoplasma y origina dos células hijas de menor tamaño.



- **En las células vegetales**, el aparato de Golgi genera unas **vesículas con hemicelulosa y pectinas** que se colocan en el ecuador celular y se fusionan para formar un tabique de separación llamado **fragmoplasto**, que dará origen a la pared celular. Las dos células hijas se comunican gracias a unos orificios en el fragmoplasto llamados **punteaduras** que, junto a los plasmodesmos, ponen en contacto sus citoplasmas.



División celular en procariontas

Los procariontas tienen una organización mucho más simple que la de los eucariontas. Su reproducción celular es una **división celular directa**, principalmente por **fisión binaria**, donde **no hay centríolos, huso mitótico ni microtúbulos**.

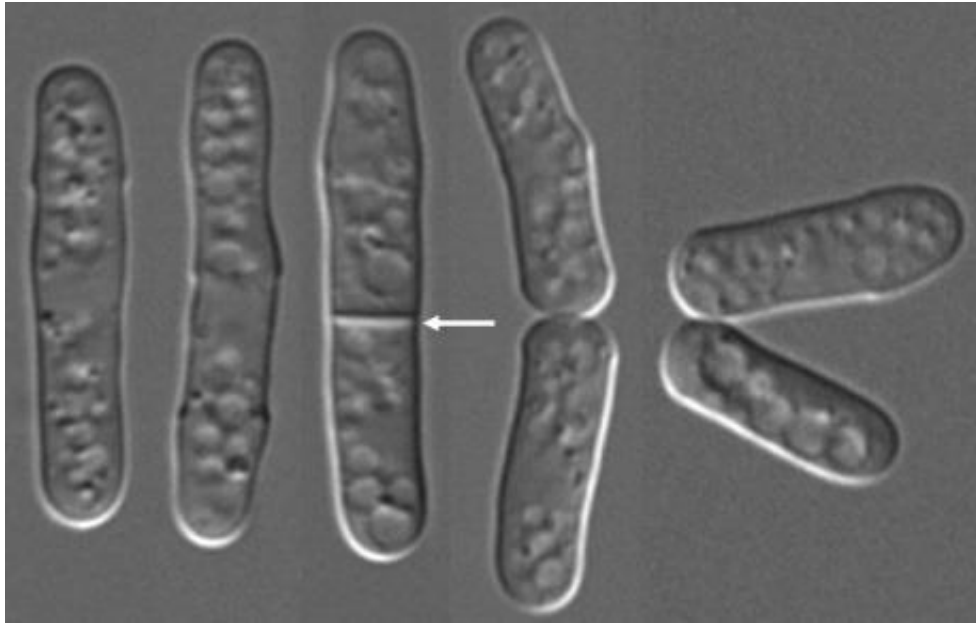
El **cromosoma procarionta** es una sola molécula circular de ADN contenida en una región definida del citoplasma, denominada **nucleoide**, sin estar separado del mismo por una membrana. Este cromosoma es el elemento obligatorio del genoma, aunque es frecuente encontrar unidades de replicación autónomas llamadas plásmidos, que si se pierden, la bacteria sigue siendo viable.



El método usual de duplicación de las células eucariotas se denomina **fisión binaria**. La duplicación de la célula va precedida por la replicación del cromosoma bacteriano. Primero se replica y luego pega cada copia a una parte diferente de la membrana celular. Cuando las células que se originan comienzan a separarse, también se separa el cromosoma original del replicado. Luego de la separación (citocinesis), queda como resultado dos células de idéntica composición genética (excepto por la posibilidad de una mutación espontánea).

Una consecuencia de este método asexual de reproducción es que todos los organismos de una colonia son genéticamente iguales.





<http://www.youtube.com/watch?v=N0-un6oQudI>

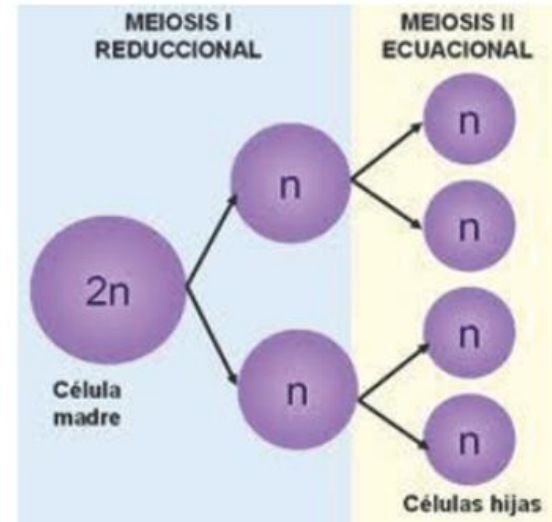
La meiosis

La **meiosis** es un proceso de división celular donde una célula progenitora diploide ($2n$) se divide en cuatro células hijas haploides (n); es decir, que **la dotación cromosómica de la célula progenitora se reduce a la mitad**. Además, durante la meiosis se produce la **recombinación homóloga**, un intercambio de fragmentos de cromátidas entre cromosomas homólogos, que aumenta la variabilidad genética de las células resultantes.

4.1. Significado biológico de la meiosis

La meiosis tiene una enorme importancia biológica en los organismos con reproducción sexual, por dos razones:

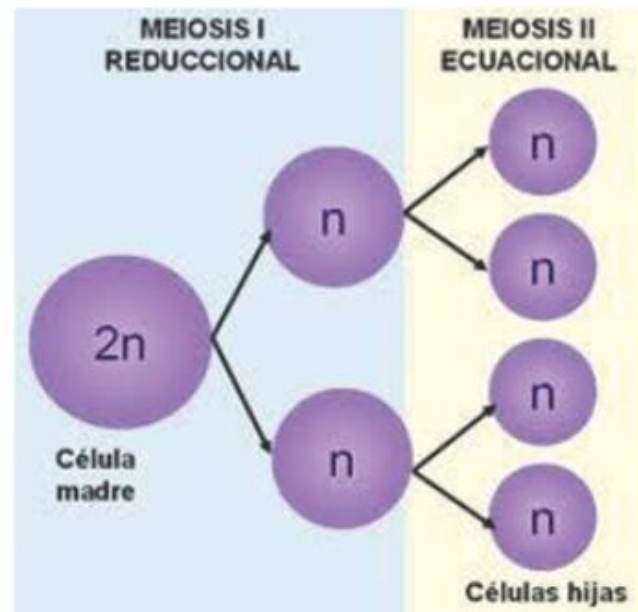
- **Porque permite mantener el número de cromosomas constante.** Las especies diploides utilizan la meiosis para producir gametos haploides (n). Así, cuando esos gametos se fusionen en la fecundación, formarán un cigoto diploide ($2n$). Si esto no se produjera y los gametos fueran diploides, el número de cromosomas de una especie aumentaría con cada reproducción sexual.
- **Porque genera diversidad genética.** Durante la meiosis se producen entrecruzamientos de las cromátidas de cromosomas homólogos y un intercambio de fragmentos homólogos de dichas cromátidas. Esto produce nuevas combinaciones en el material genético de las células hijas resultantes. Así, si se producen gametos durante la meiosis, todos ellos tendrán combinaciones genéticas diferentes. Por esa razón, los descendientes generados por reproducción sexual son genéticamente diferentes unos de otros.



4.2. La meiosis, paso a paso

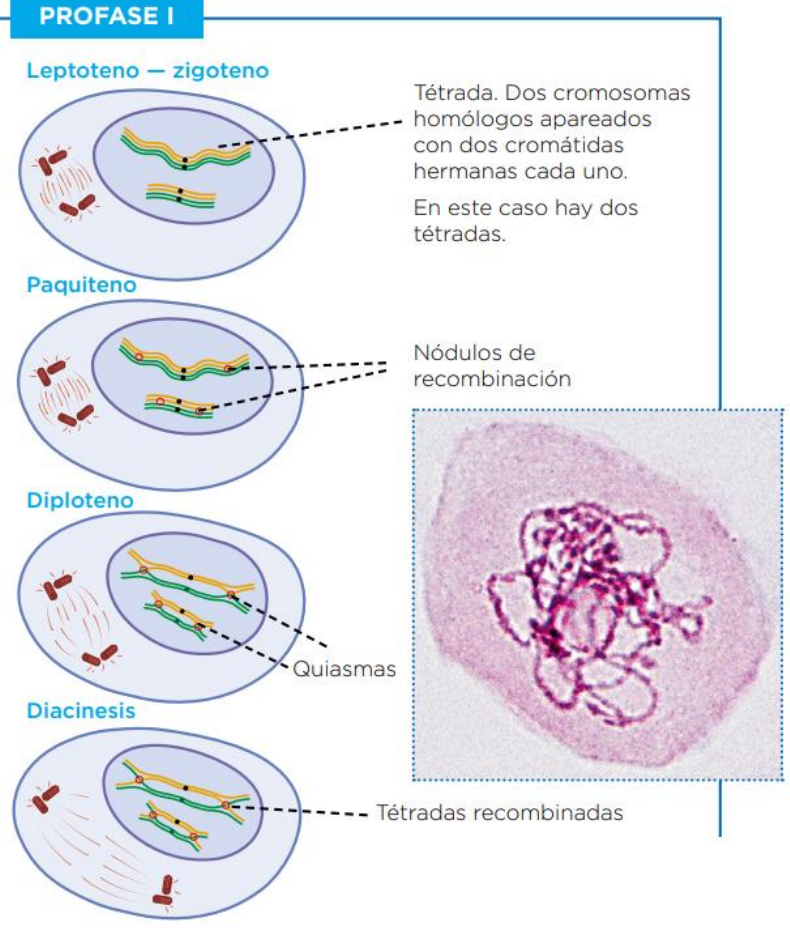
La meiosis consta de dos divisiones celulares consecutivas, pero con una única replicación de ADN.

- **Primera división meiótica o meiosis I.** En ella se producen la recombinación homóloga y la separación de cromosomas homólogos que reduce a la mitad la dotación cromosómica. Se divide en profase I, metafase I, anafase I y telofase I.
- **Segunda división meiótica o meiosis II.** Es semejante a una mitosis. En ella se separan las dos cromátidas hermanas de cada cromosoma. Se divide en profase II, metafase II, anafase II y telofase II.

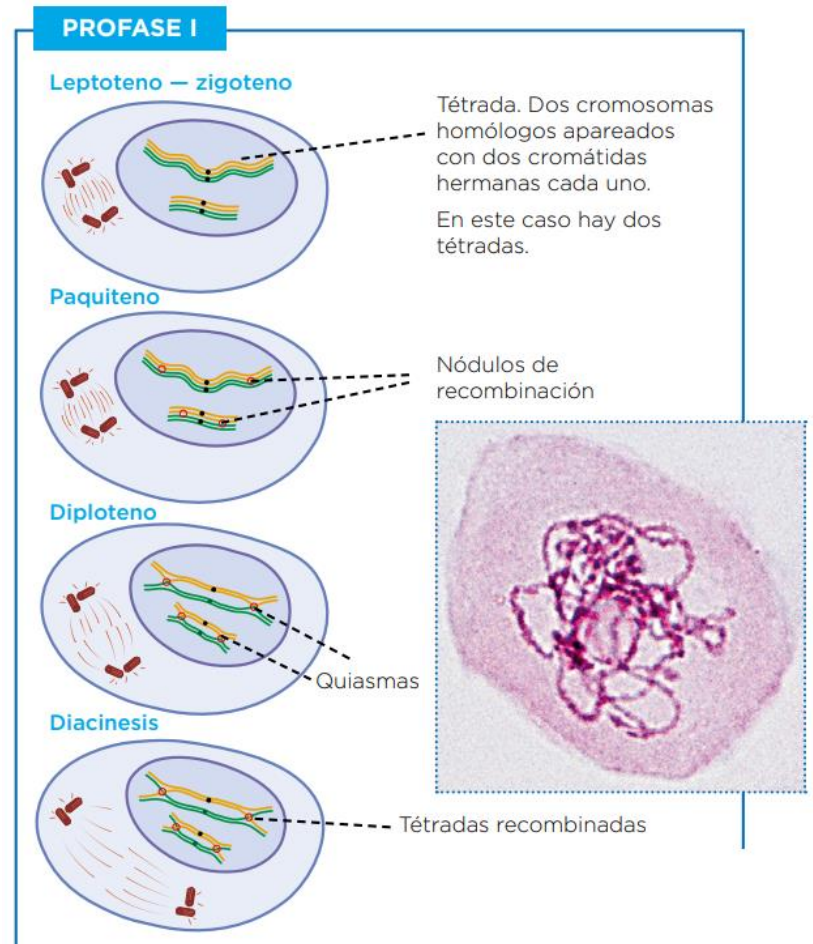


Meiosis I

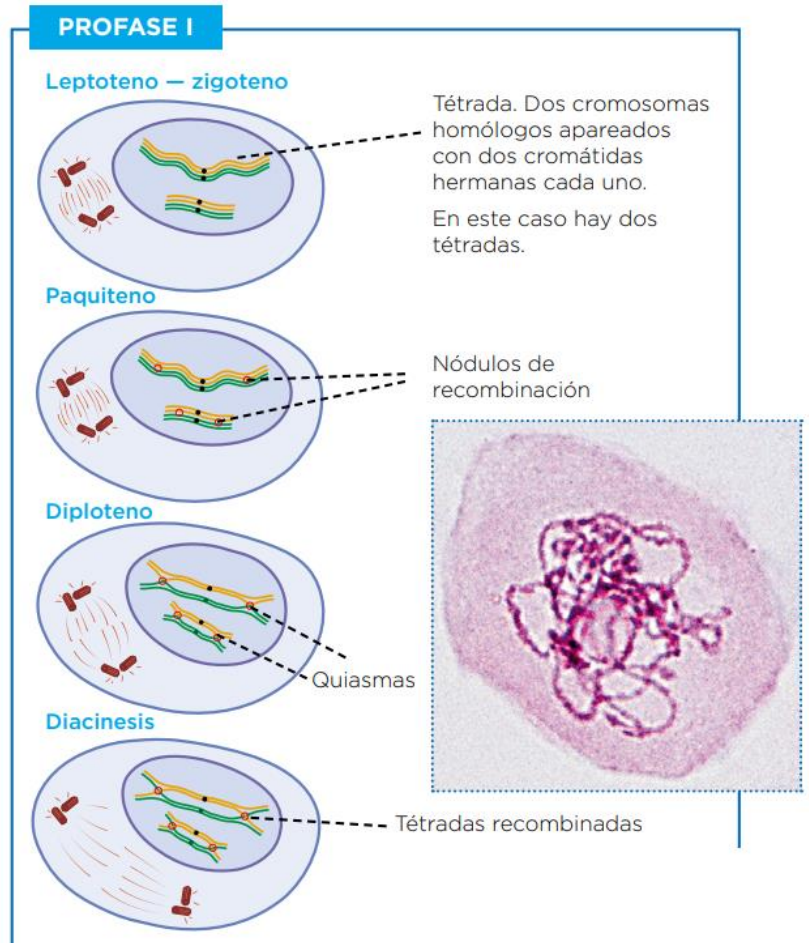
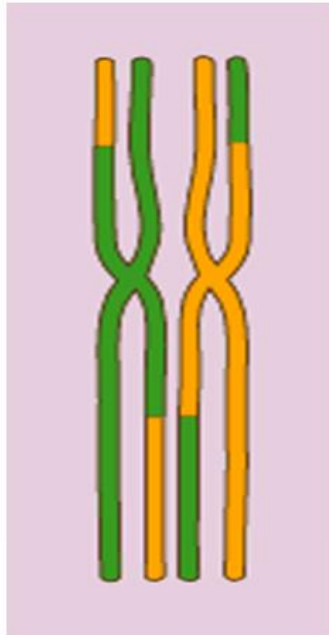
- **Profase I.** Es la fase más larga. Tiene cuatro etapas, que pueden observarse al microscopio:
 - **Leptoteno.** Los cromosomas se condensan, se hacen visibles y empiezan a aparearse por homólogos.



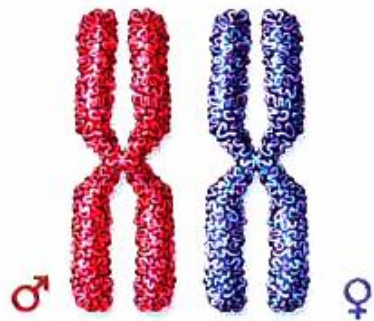
- **Zigoteno.** Los cromosomas se hacen más cortos y gruesos y comienza el proceso de apareamiento gen a gen, o **sinapsis**, entre cromosomas homólogos. Cada par cromosómico apareado se denomina **tétrada**, ya que cada cromosoma tiene dos cromátidas hermanas. Gracias a una estructura proteica, el **complejo sinaptonémico**, ambos cromosomas quedan unidos a lo largo de toda su longitud, de modo que los segmentos equivalentes coinciden.



- **Paquiteno.** Se produce el **sobrecruzamiento**, mediante el que **se intercambian fragmentos de ADN entre cromosomas homólogos**, es decir, entre las cromátidas no hermanas de una tétrada. Este proceso de **recombinación genética** produce una nueva combinación de genes en los cromosomas.



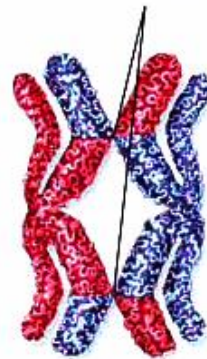
Apareamiento de cromosomas homólogos



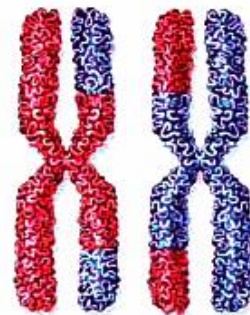
Entrecruzamiento



Quiasmas

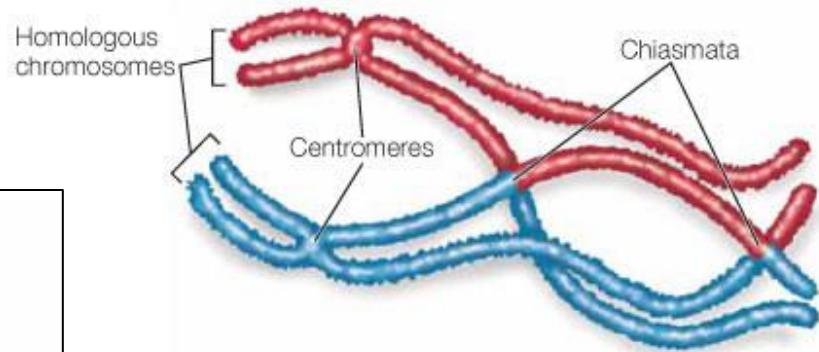
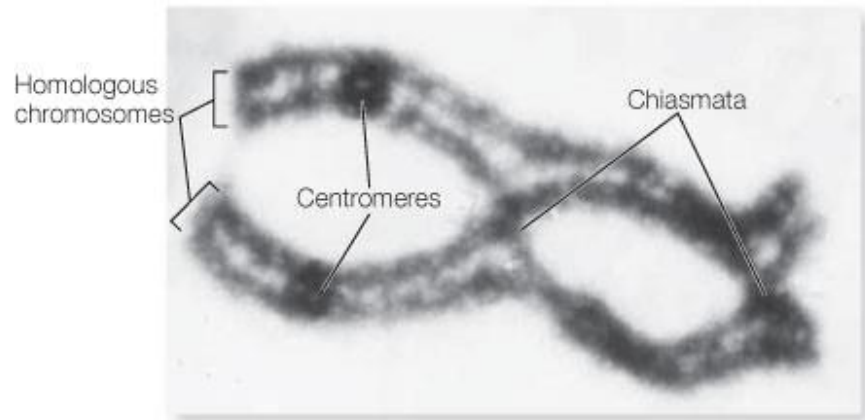
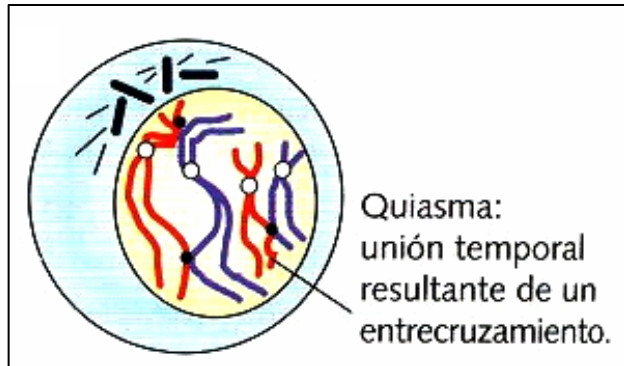


Recombinación génica



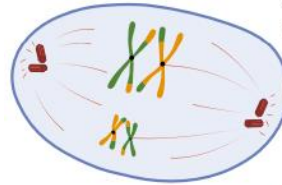
- **Diploteno.** Los cromosomas homólogos comienzan a separarse, pero permanecen unidos por las zonas donde ha existido recombinación, o **quiasmas**.
- **Diacinesis.** Los cromosomas alcanzan su máxima condensación y las tétradas se hacen evidentes al microscopio. Las cromátidas hermanas permanecen unidas por los centrómeros, y las cromátidas no hermanas u homólogas, por los quiasmas.

Al final de la profase empiezan a desintegrarse la membrana nuclear y el nucléolo y se forma el huso acromático entre los centriolos, que comienzan a migrar a polos opuestos de la célula.

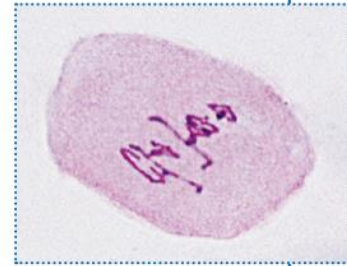


- **Metafase I.** Las **parejas de cromosomas homólogos**, unidos por los quiasmas y sujetos por los filamentos del huso, **se sitúan en el ecuador de la célula** y forman la **placa metafásica**.
- **Anafase I.** Las fibras del huso se acortan y **separan los cromosomas homólogos de cada pareja** hacia los polos opuestos de la célula. Los quiasmas se rompen y los cromosomas llevan sus fragmentos recombinados.
- **Telofase I.** Comienza cuando los dos grupos de cromosomas llegan a los polos. El huso acromático desaparece y se forma la membrana nuclear alrededor de cada núcleo hijo. Estos núcleos son haploides (n), ya que cada uno ha recibido la mitad de los cromosomas. Cada cromosoma tiene aún dos cromátidas hermanas.

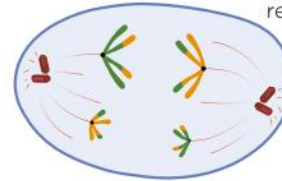
METAFASE I



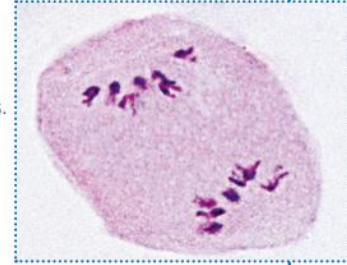
Las tétradas se disponen en la placa ecuatorial.



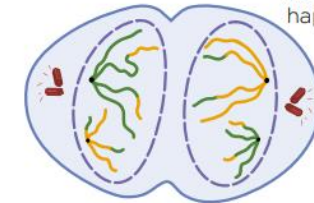
ANAFASE I



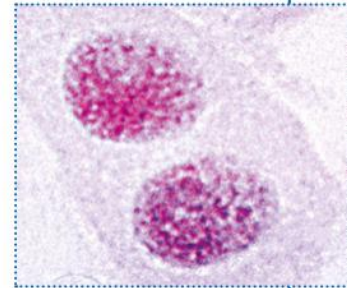
Se separan cromosomas homólogos recombinados.



TELOFASE I



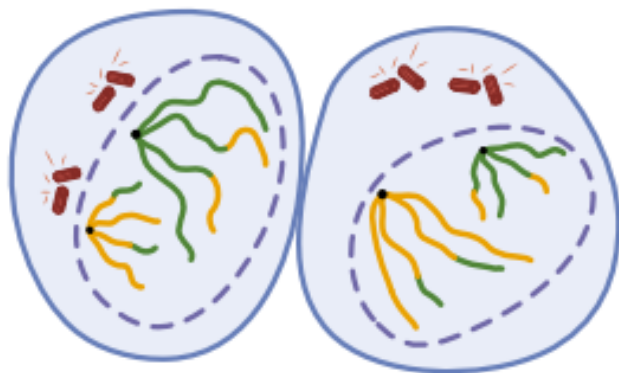
Se reorganizan los núcleos haploides.



Por último, tiene lugar una citocinesis o reparto del citoplasma. Las dos células resultantes, sin pasar por una interfase, comienzan a la vez la segunda división meiótica.

CITOCINESIS

Se prepara la segunda división meiótica.

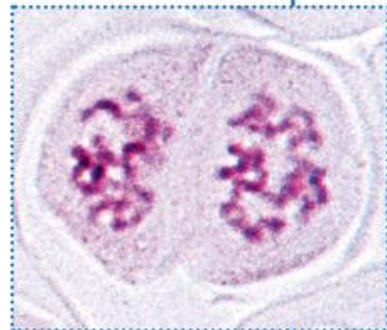
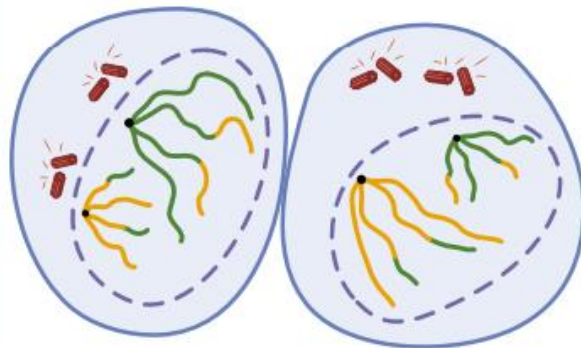


Meiosis II

- **Profase II.** Es una fase muy corta en la que, en cada una de las dos células resultantes de la meiosis I, **los cromosomas vuelven a condensarse, desaparece de nuevo la membrana nuclear y se forma un nuevo huso acromático.**
- **Metafase II.** En esta fase, los n cromosomas, cada uno de ellos formado por dos cromátidas hermanas, se disponen en el ecuador celular, con su eje longitudinal perpendicular a los filamentos del huso. Se constituye así la **placa ecuatorial.**

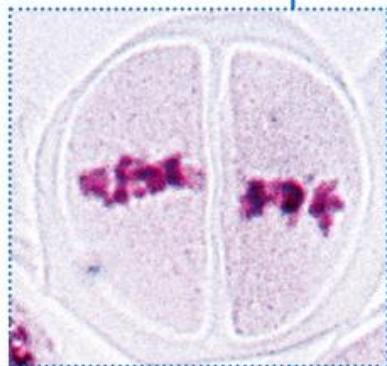
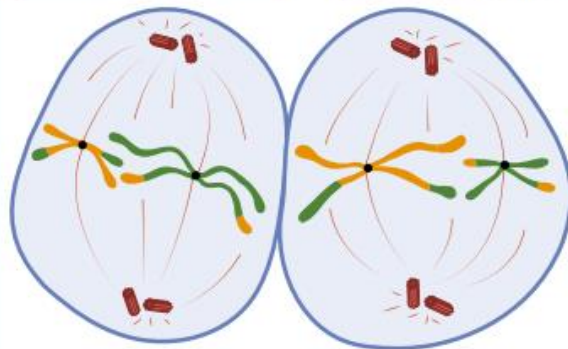
PROFASE II

Los cromosomas vuelven a condensarse.



METAFASE II

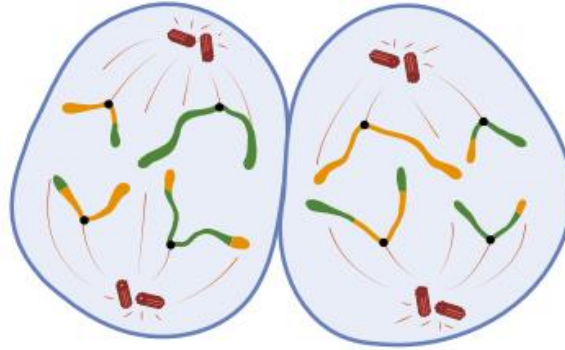
Los cromosomas se disponen en la placa ecuatorial.



- **Anafase II.** Las fibras del huso se acortan, se rompen los centrómeros y se separan las cromátidas hermanas como en una mitosis normal. Estas cromátidas, que serán diferentes en el caso de que haya existido recombinación, se separan y migran a polos opuestos de la célula; se las considera ya cromosomas anafásicos.
- **Telofase II.** Con los cromosomas ya en cada polo, se reconstruye la membrana nuclear. Esos cromosomas se descondensan, y se transforman en cromatina.

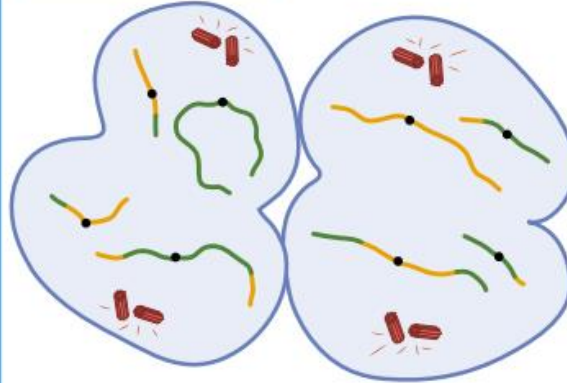
ANAFASE II

Se separan las cromátidas hermanas.



TELOFASE II

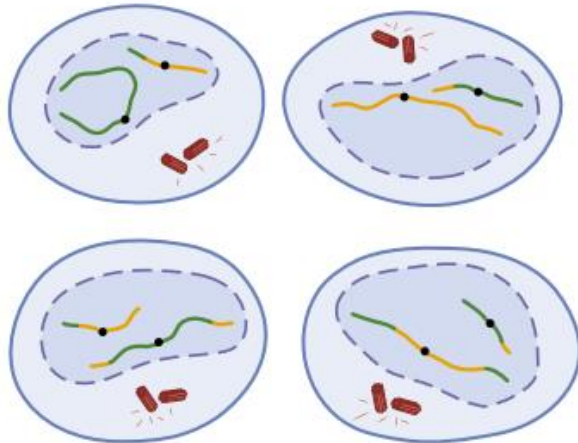
Se reorganizan los núcleos y se inicia la citocinesis.



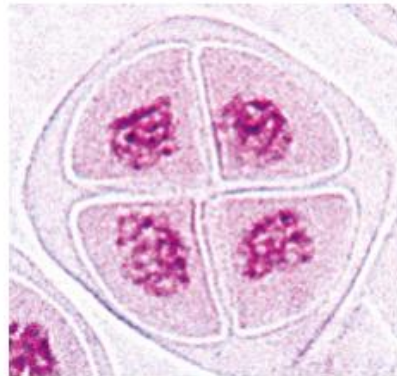
El final de la meiosis II es una citocinesis que reparte el citoplasma y los orgánulos entre las dos células hijas.

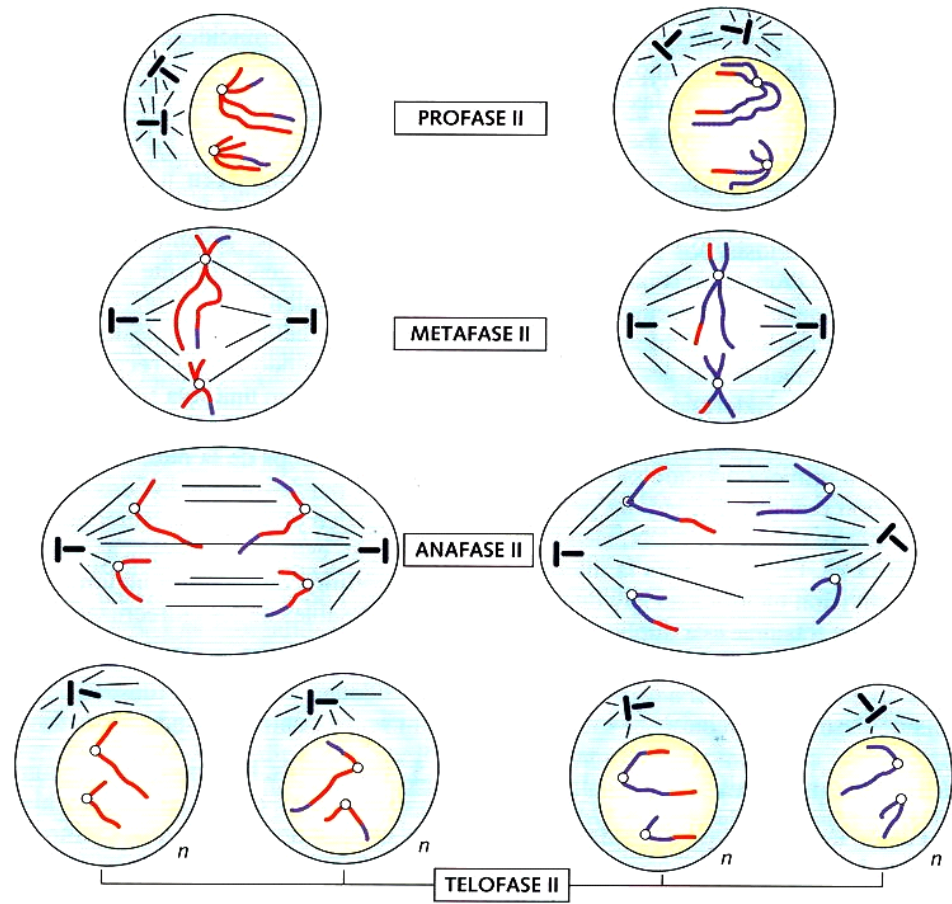
El resultado de todo este proceso, teniendo en cuenta que ha afectado a las dos células haploides que se formaron en la meiosis I, son cuatro células hijas haploides (n) diferentes entre sí y a la célula madre, pues llevan una combinación única de genes debido a la recombinación.

CITOCINESIS



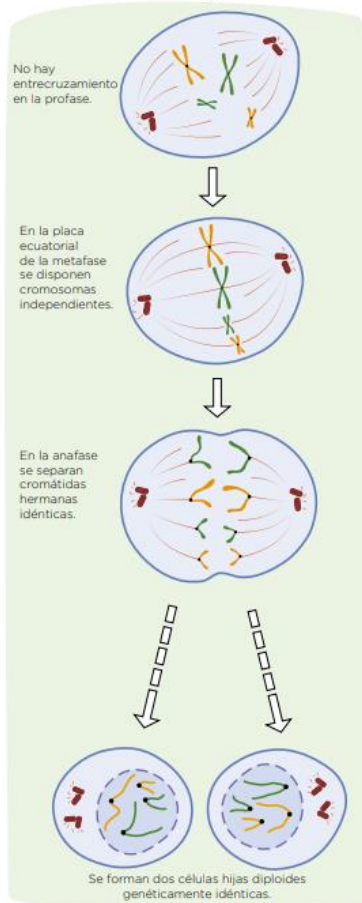
El resultado son cuatro células hijas haploides diferentes.



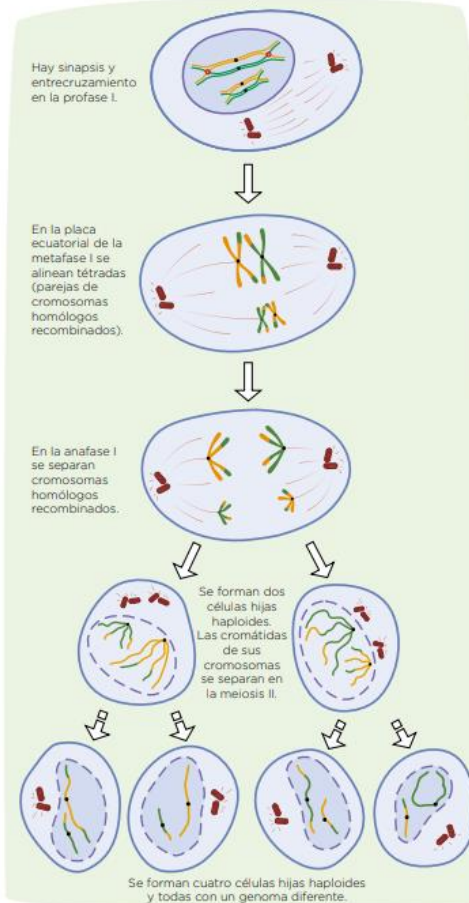


COMPARAMOS
LA MITOSIS
Y LA MEIOSIS

Mitosis



Meiosis

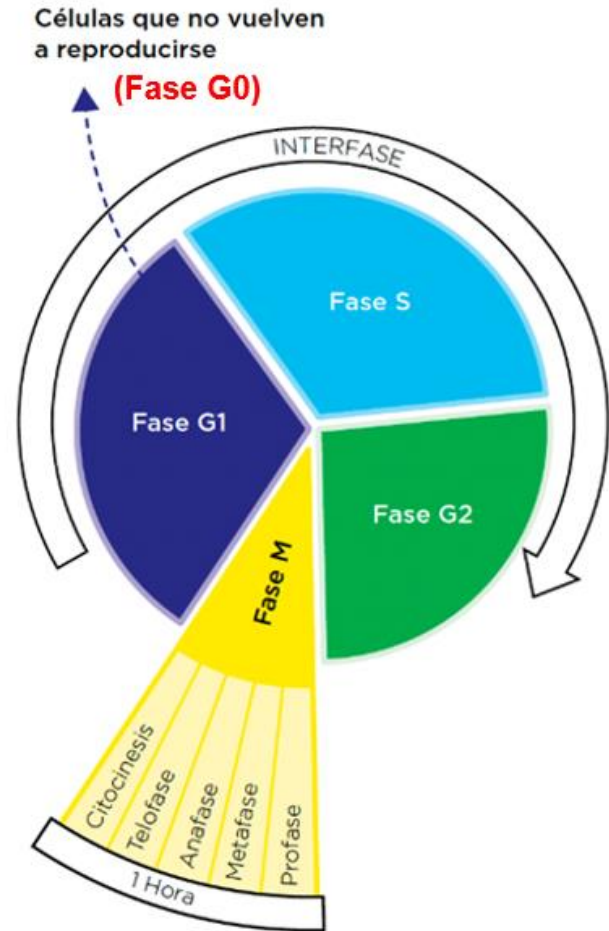


5

El control del ciclo celular

El ciclo celular es un proceso muy regulado por la célula. Este control es para evitar que se produzca una división en condiciones desfavorables o en el caso de que la célula tenga alteraciones genéticas.

Los fallos en ese control pueden tener consecuencias muy graves para el organismo, como la transformación de células funcionales en células tumorales que se dividen sin control, invaden el organismo y alteran su equilibrio. Por eso, las células disponen de dos mecanismos para regular el ciclo celular: la **regulación temporal de sus etapas** y los **puntos de control** para evaluar el estado de la célula y las condiciones del medio.



5.2. Los puntos de control del ciclo celular

Los **puntos de control** son mecanismos basados en interacciones macromoleculares que la célula emplea para evaluar las condiciones del medio o el estado de la célula en cada etapa del ciclo celular. Esto permite a la célula detener el ciclo si las condiciones son desfavorables, o corregir la anomalía detectada, reiniciarlo y completarlo.

Los puntos de control más importantes tienen lugar:

En la transición G1-S, donde ciertos complejos proteínicos, como p53, evalúan la integridad del ADN, el tamaño de la célula o la presencia de señales externas como factores de crecimiento. Este punto de control es el llamado **punto de restricción** o **punto R**.

~~**En la transición G2-M**, donde ciertas enzimas comprueban que la replicación del ADN se haya completado correctamente.~~

~~**En la entrada en anafase**, donde hay mecanismos capaces de detectar la correcta alineación de los cromosomas y la integridad del huso.~~

