



BLOQUE 2. BIOLOGÍA CELULAR

2.6 Meiosis

Germán Tenorio

Biología 12º

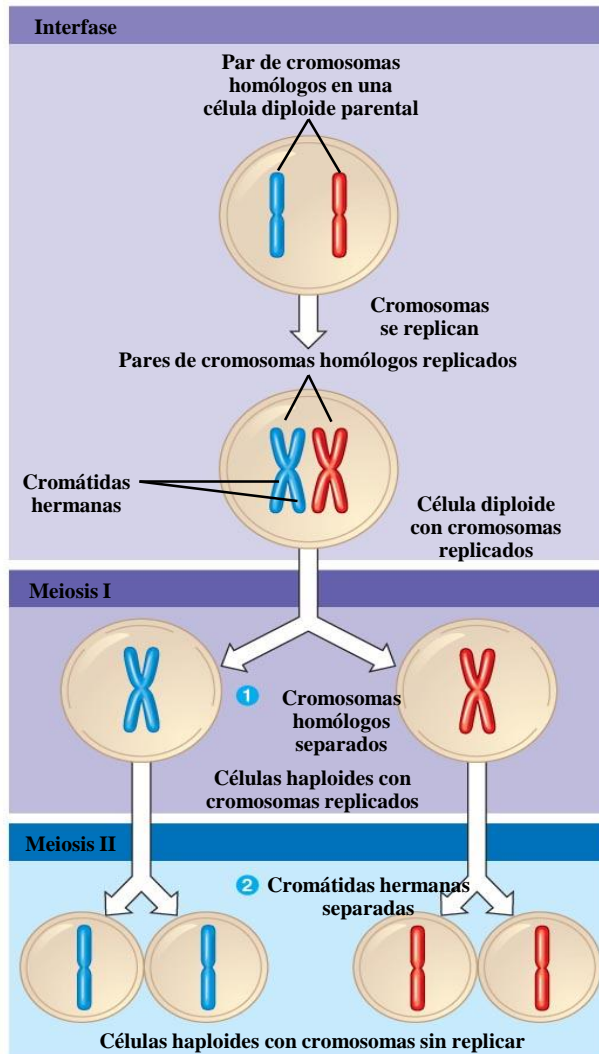


Idea Fundamental: Los alelos se segregan durante la meiosis, y permiten así que se formen nuevas combinaciones mediante la fusión de gametos.





La meiosis



- **Concepto:** La meiosis es un tipo especial de división celular (en realidad nuclear) donde el nº de cromosomas se reduce a la mitad y tras **dos divisiones celulares sucesivas**, se obtienen finalmente **cuatro células haploides distintas genéticamente** entre sí y distintas a la célula progenitora.
- Es decir, **división de un núcleo diploide para producir cuatro núcleos haploides.**
- **Ventaja:** Mecanismo mediante el cual, los organismos con reproducción sexual consiguen **variabilidad genética**, ya que la **mutación**, el otro mecanismo para conseguir variabilidad, está presente tanto en organismos con reproducción sexual como asexual.

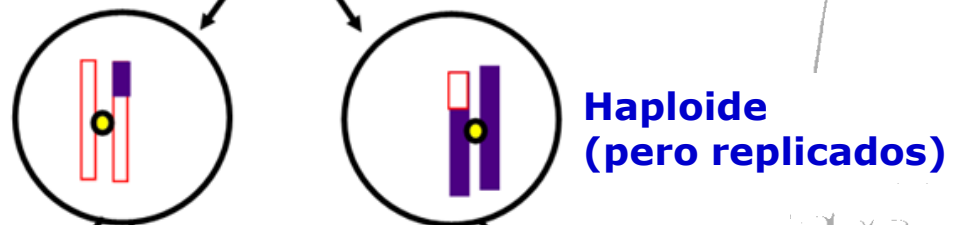
Handwritten notes:
n = 2n
2n → 2n



1ª División meiótica (Meiosis I)

- La meiosis consta de dos fases consecutivas (meiosis I y II) cada una de las cuales con cuatro etapas (profase, metafase, anafase y telofase).
- En esta 1ª división, los cromosomas homólogos se emparejan e intercambian fragmentos de ADN, proceso denominado **recombinación génica** y que constituye la **primera fuente de variabilidad**.
- Posteriormente, cada uno de los cromosomas del par de homólogos se orientan y separan aleatoriamente, proceso denominado **segregación cromosómica** y que constituye la **segunda fuente de variabilidad**, para dar lugar a dos células, cada una con un sólo cromosoma pero formado por dos cromátidas hermanas. **Meiosis I**

La replicación tiene lugar antes de que comience la meiosis



- Los estadios tempranos de la meiosis implican el apareamiento de los cromosomas homólogos y el sobrecruzamiento, con la posterior condensación.

Paula





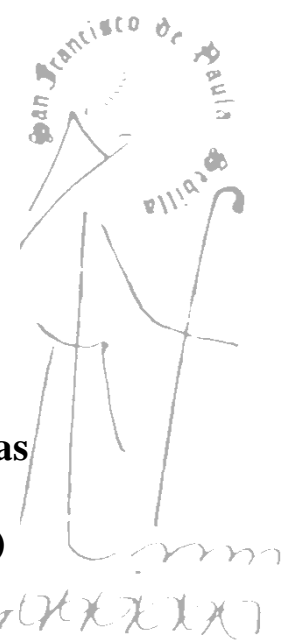
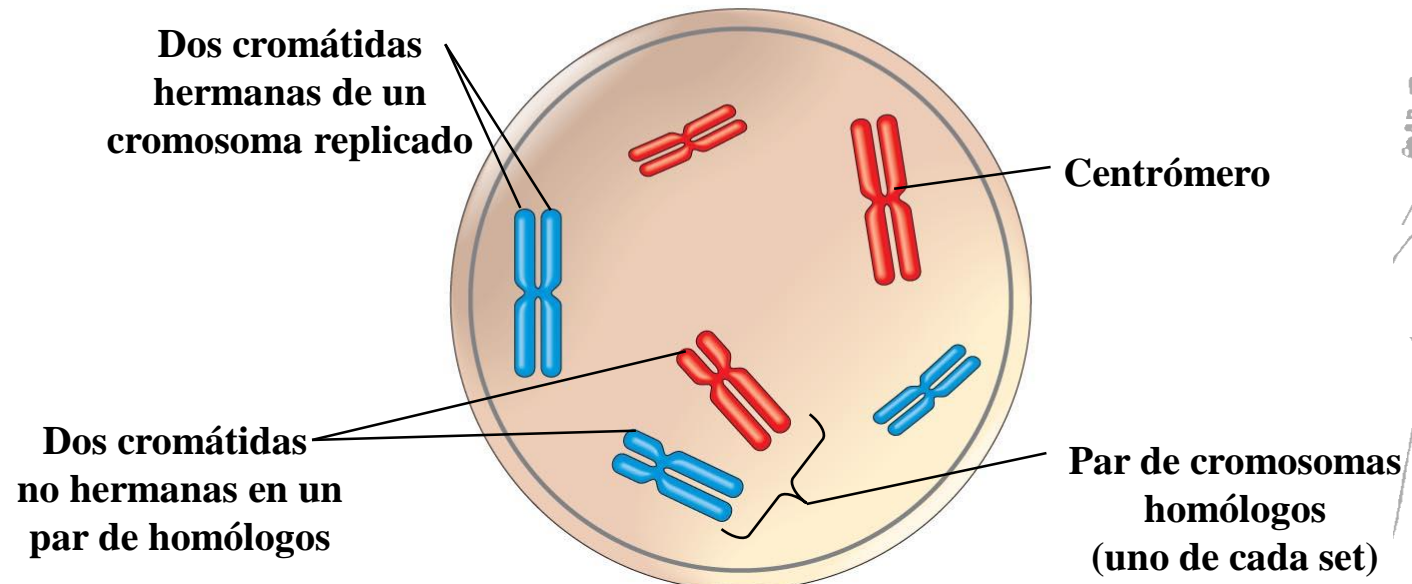
x r r r r x x x x x



1ª División meiótica (Meiosis I)

Clave

$2n = 6$ {  Set de cromosomas maternos ($n = 3$)
 Set de cromosomas paternos ($n = 3$)



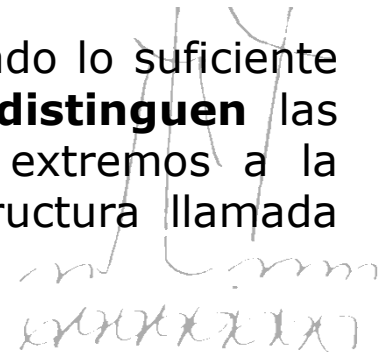


1ª División meiótica: Profase I

- La Profase I ocupa más del 90% del tiempo requerido para la meiosis.
- Los cromosomas comienzan a condensarse, al igual que la formación de los microtúbulos del huso. Al final de esta fase la membrana nuclear y el nucleolo han desaparecido. Se divide en **varias fases**.



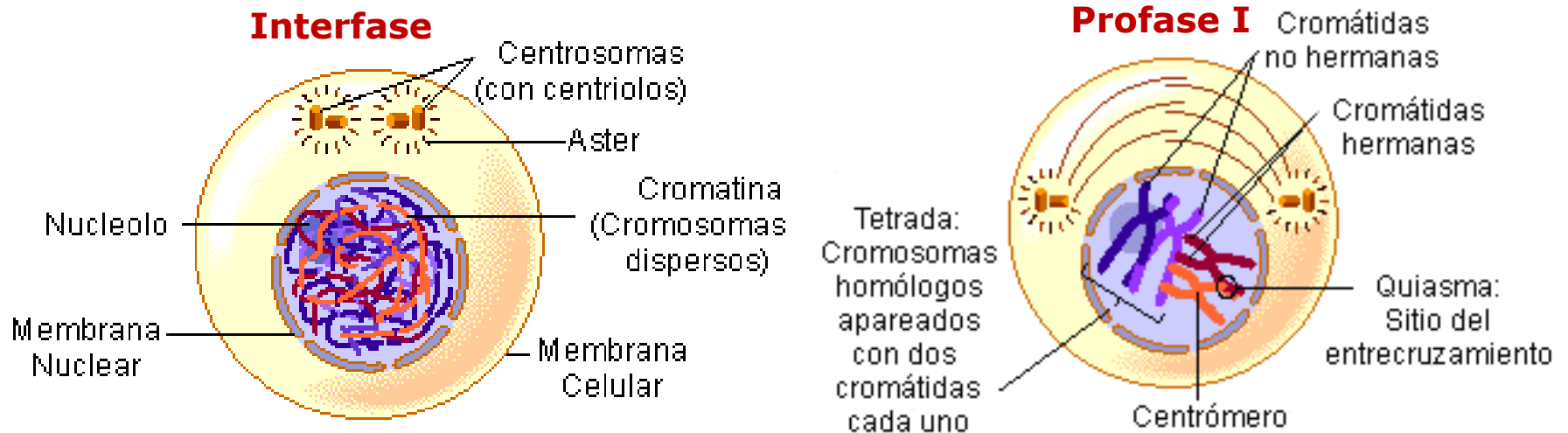
- **Leptoteno:** los cromosomas se han acortado y ensanchado lo suficiente como para hacerse visibles (aunque en ellos **no se distinguen** las cromátidas hermanas) y permanecen unidos por sus extremos a la **lámina fibrosa** o **lámina nuclear** mediante una estructura llamada **placa de unión**.





1ª División meiótica: Profase I

- **Zigoteno:** Comienza cuando los cromosomas homólogos se aparean hasta alinearse gen por gen. Este proceso denominado **sinapsis**, y tiene lugar mediante la formación de una estructura proteica entre ambos cromosomas homólogos llamada **complejo sinaptonémico**. Permite la yuxtaposición de cada gen con su homólogo, resultando en la formación de **tetradas** (grupo de cuatro cromátidas) o **cromosomas bivalentes**.

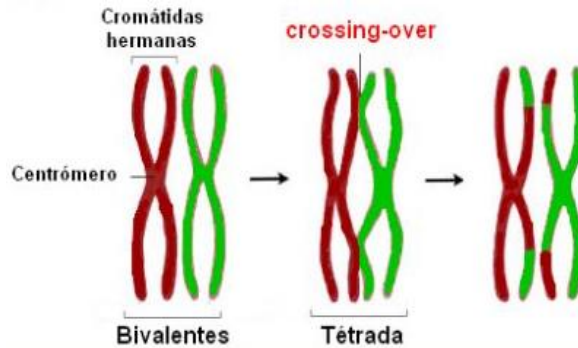


Handwritten signature and scribbles.

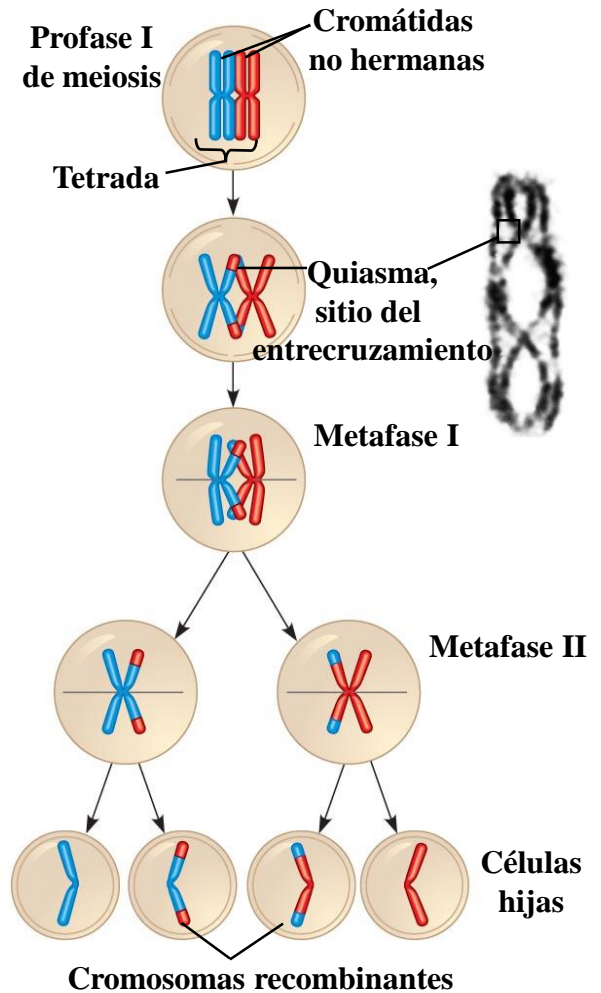


La recominación génica tiene lugar en Profase I

- **Paquiteno:** Una vez terminada la sinapsis, en determinados puntos al azar de las tétradas tiene lugar el intercambio de fragmentos de ADN entre cromosomas homólogos, es decir, se realiza el **sobrecruzamiento** o **crossing-over** entre cromátidas homólogas no hermanas.



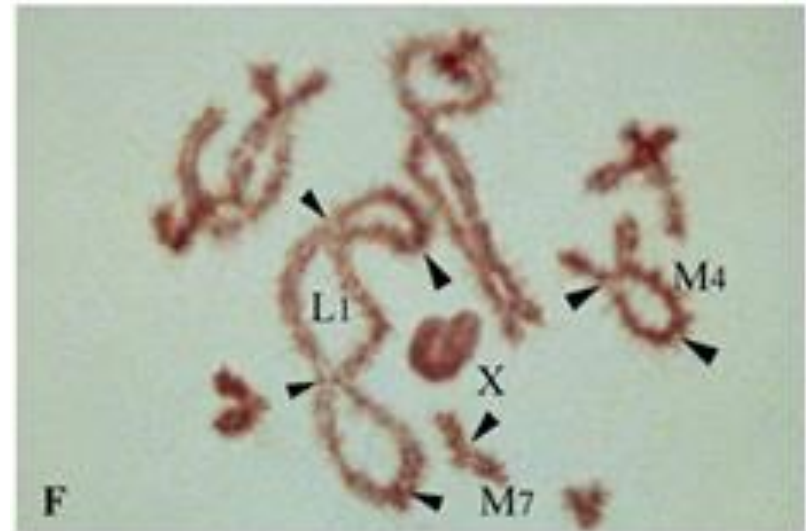
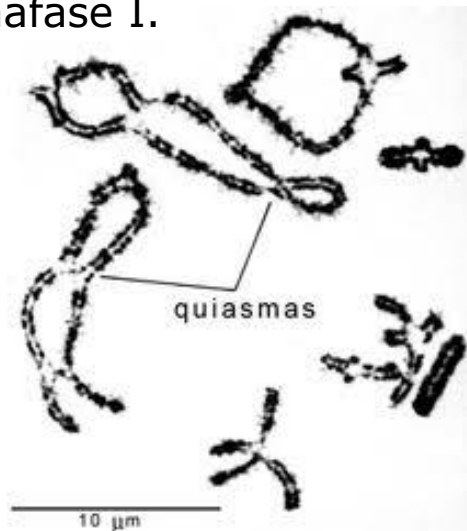
- Los puntos de sobrecruzamiento corresponden a los **nódulos de recombinación**, que contienen los enzimas necesarios para el intercambio de genes entre las cromátidas (endonucleasas, ADN ligasas, etc). Como consecuencia se produce la **recombinación génica** o intercambio de genes y, por tanto, una de las dos cromátidas de cada cromosoma será **mixta**, es decir, estará formada por segmentos paternos y maternos alternados.





La recombinación génica tiene lugar en Profase I

- **Diploteno:** Una vez que el sobrecruzamiento ha tenido lugar, las cromátidas no hermanas continúan adheridas por el sitio donde el sobrecruzamiento ha tenido lugar. Estos puntos de conexión entre homólogos en un bivalente que presentan forma de X, se denominan **quiasmas**.
- Se forman en aquellos puntos donde tiene lugar el sobrecruzamiento, llegando a ser visibles cuando los cromosomas homólogos empiezan a separarse. Los quiasmas mantienen a los cromosomas homólogos unidos hasta la anafase I.



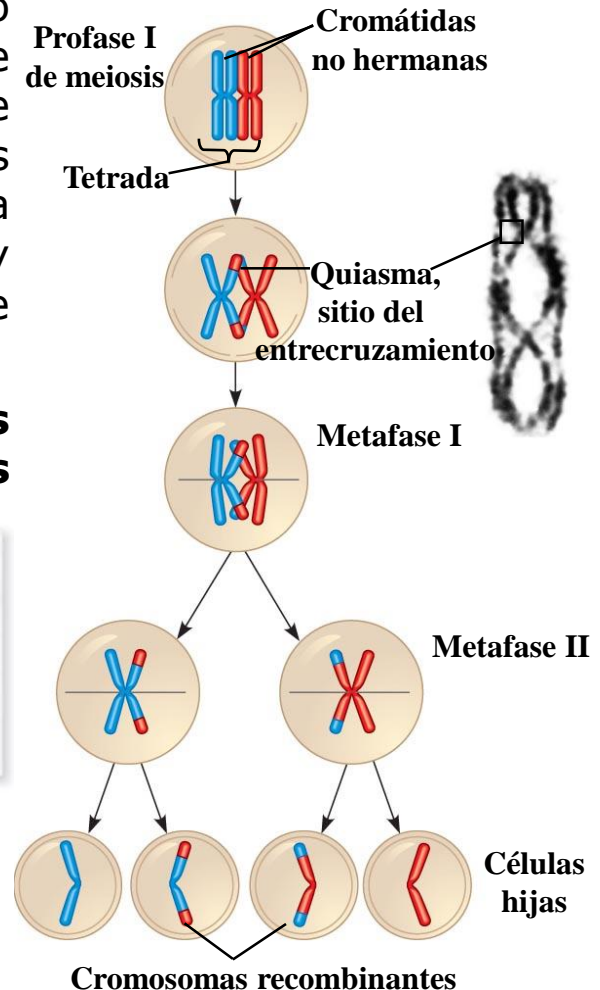
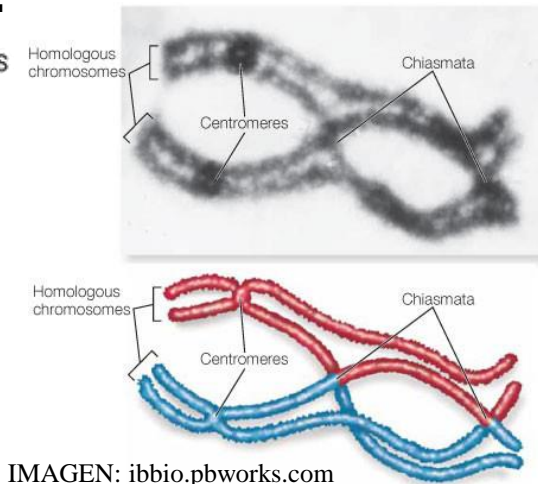
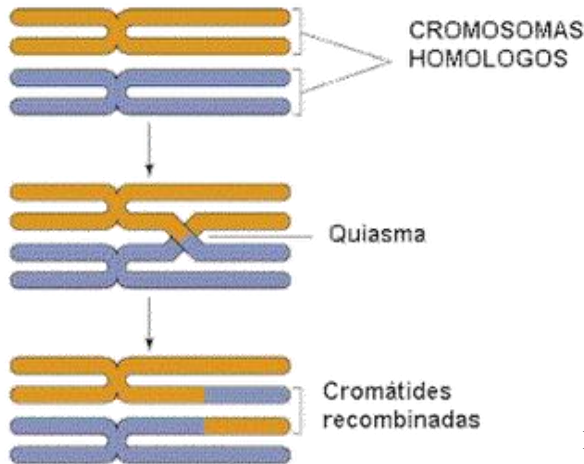
- **La formación de quiasmas entre cromátidas no hermanas puede causar un intercambio de alelos.**

Handwritten notes:
no hermanas
XXXXXX



La recombinación génica tiene lugar en Profase I

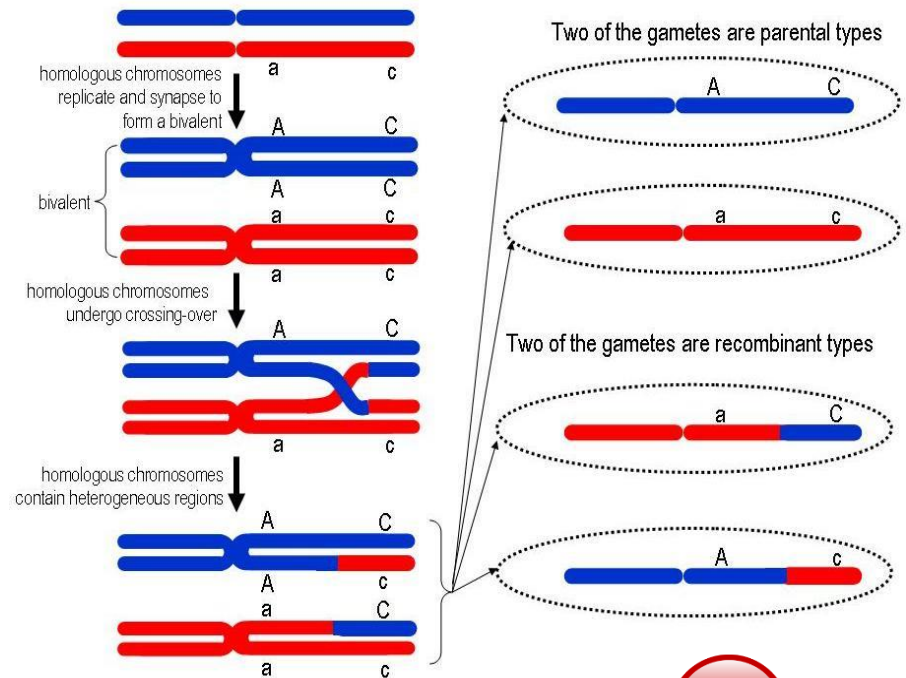
- Como consecuencia del sobrecruzamiento mediante la formación de quiasmas, se produce la **recombinación génica** o intercambio de alelos, pasando una de las dos cromátidas hermanas a ser **mixta**, es decir, estará formada por una laternancia de segmentos paternos y maternos, portando nuevas combinaciones de alelos.
- **El sobrecruzamiento produce nuevas combinaciones de alelos en los cromosomas de células haploides.**





La recombinación génica tiene lugar en Profase I

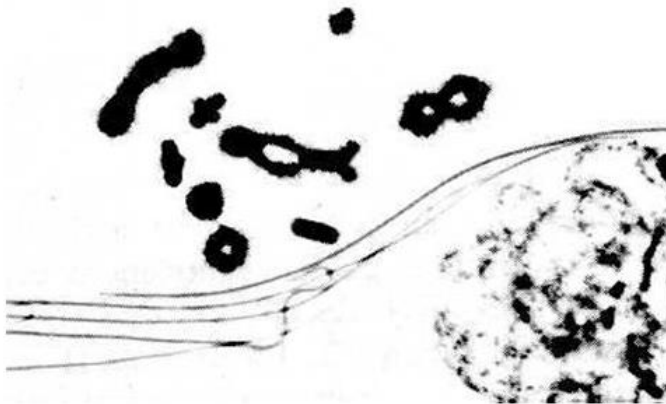
- A la descendencia con características nuevas y diferentes a la de sus progenitores se denominan **recombinantes**.
- En genética, se denomina recombinación al reordenamiento de los alelos o caracteres en combinaciones diferentes a la de los parentales.
- Los **recombinantes** se forman a partir de genes localizados en el mismo cromosoma (genes ligados) mediante la formación de quiasmas y el sobrecruzamiento durante meiosis.
- En el ejemplo para los genes A/C, solo pueden producirse gametos AC y ac, al estar localizados en el mismo cromosoma. Sin embargo, por recombinación, pueden obtenerse los gametos recombinantes Ac y aC.
- **El sobrecruzamiento produce nuevas combinaciones de alelos en los cromosomas de células haploides.**





1ª División meiótica: Profase I

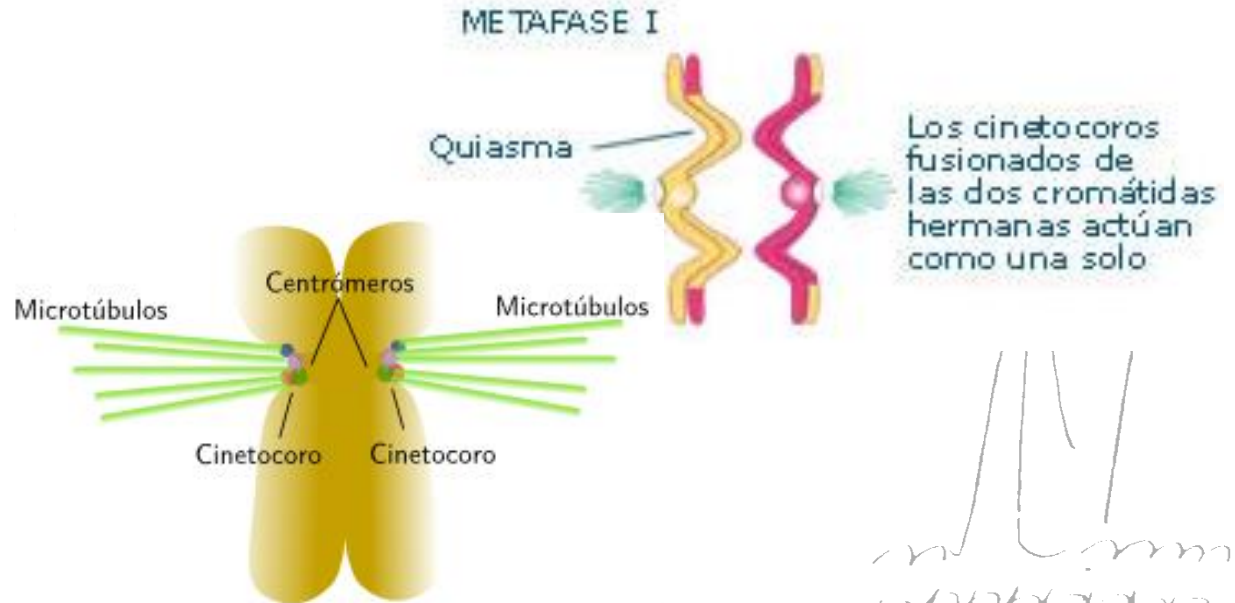
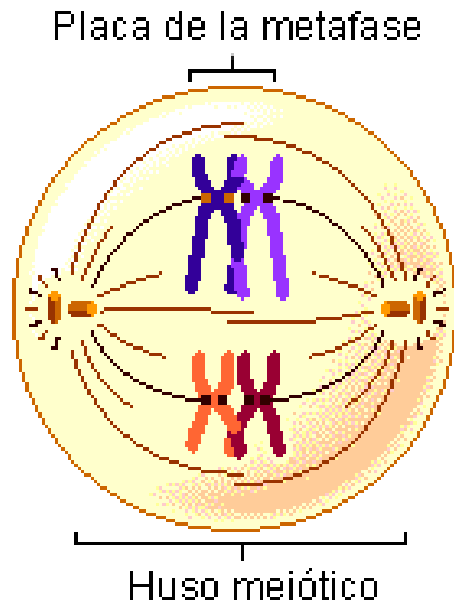
- **Diacinesis:** los cromosomas logran el máximo grado de empaquetamiento, con lo que se pueden ver, por primera vez, las dos cromátidas de cada cromosoma. Al final de esta fase desaparecen la **membrana nuclear** y el **nucleolo**, se forma el **huso** entre los diplosomas y empiezan a formarse los **microtúbulos cinetocóricos**.





1ª División meiótica: Metafase I

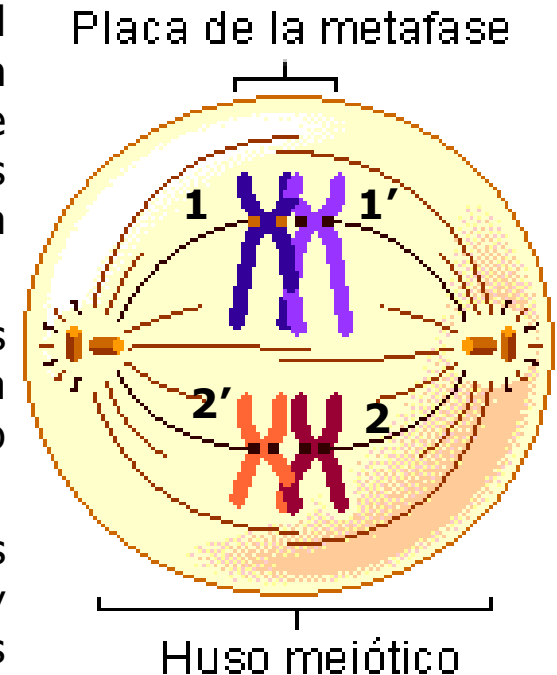
- Las tetradas se alinean en la placa ecuatorial, con cada cromosoma del par de homólogos encarando uno de los polos, **siendo aleatoria esta orientación de los pares de cromosomas homólogos previa a la separación.**
- Los dos cinetócoros que componen cada cromosoma (uno por cromátida) están fusionados y los microtúbulos de un polo interaccionan con el de uno de los homólogos, mientras que los microtúbulos del otro polo se unen al cinetócoro de su homólogo de la tetrada.





La orientación aleatoria de los homólogos tiene lugar en Metafase I

- Los pares de cromosomas homólogos (bivalentes) se orientan al azar en la placa ecuatorial, teniendo cada cromosoma igual probabilidad de orientarse a cada polo. Es decir, en la pareja 1 y 1' puede haber caído el 1 hacia la derecha y el 1' hacia la izquierda, pero en el par 2 y 2' puede haber sido al contrario, y así para los 23 pares de cromosomas.
- Así se consigue la 2ª fuente de variabilidad genética, la **orientación y segregación cromosómica independiente**, donde cada par de cromosomas se separa independientemente de las otras parejas de homólogos, dado que la orientación de un bivalente no afecta a la de otros.
- El número de combinaciones posibles cuando los cromosomas se separan independientemente para formar los gametos es 2^n , donde n es el número haploide.
- Para los humanos ($n=23$), hay más de 8 millones (2^{23}) de combinaciones posibles de cromosomas, y la probabilidad de que uno de los gametos formados lleve todos los paternos o maternos es de $(\frac{1}{2})^{23}$.



Handwritten notes:
n = 23
2^n = 2^23



La orientación aleatoria de los homólogos tiene lugar en Metafase I

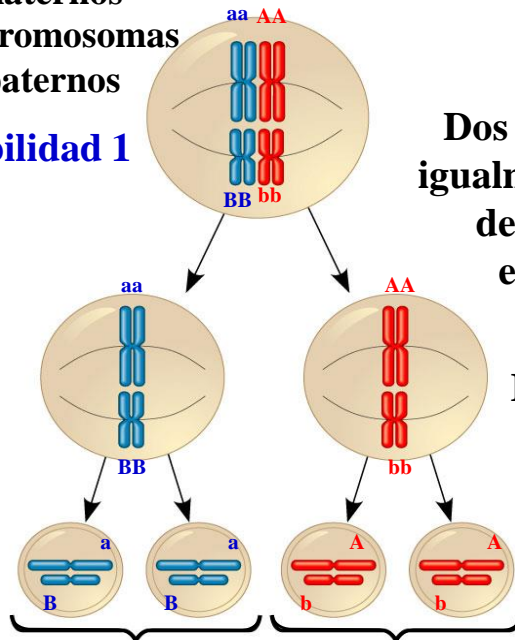
- Si un organismo es heterocigótico para un gen, la orientación del par de homólogos en meiosis determinará qué alelo se mueve para cada polo, que al ser aleatoria, hace que cada alelo tenga un 50% de probabilidad de moverse hacia un determinado alelo.

Clave

- Set cromosomas maternos
- Set cromosomas paternos

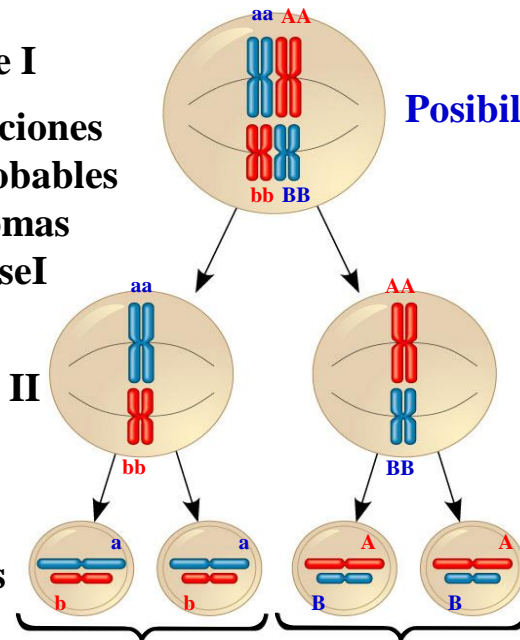
- Por tanto, si consideramos 2 genes en cromosomas distintos, existe un 25% de probabilidad de que dos alelos vayan al mismo polo.

Posibilidad 1



Combinación 1 **Combinación 2**

Posibilidad 2



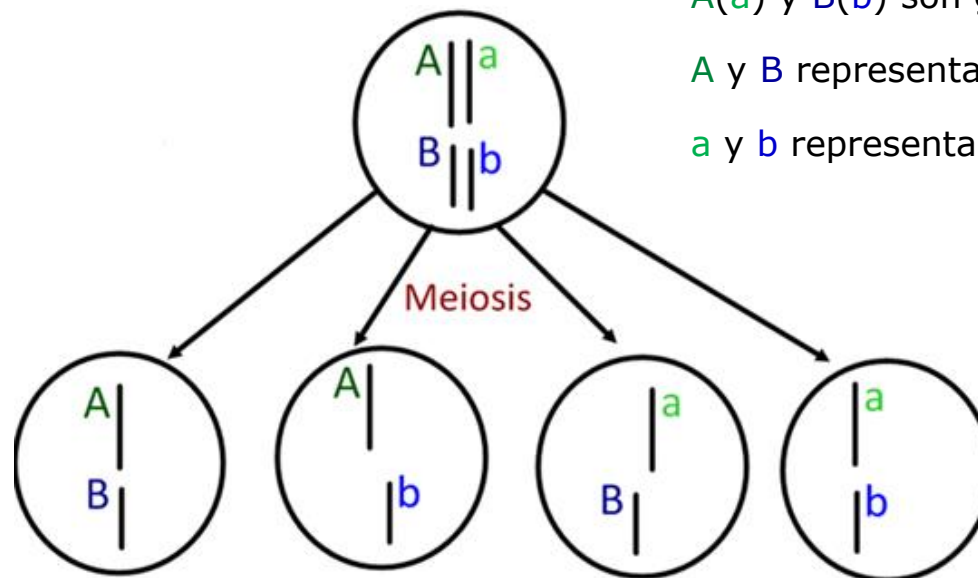
Combinación 3 **Combinación 4**





Transmisión independiente de los caracteres

- Mendel postuló que **los caracteres (genes/alelos) se heredan independientemente** unos de otros, no existiendo relación entre ellos, por lo que el patrón de herencia de un carácter no afectará al patrón de herencia de otro.
- En dicha tercera ley de Mendel o **ley de la transmisión independiente de los caracteres**, se asumía que los genes no están ligados, sino que se encuentran en cromosomas diferentes, y por tanto, la presencia de un alelo no influye en la presencia de otro alelo en los gametos, siendo posibles todas las combinaciones de alelos.



A(a) y B(b) son genes diferentes.

A y B representan alelos dominantes.

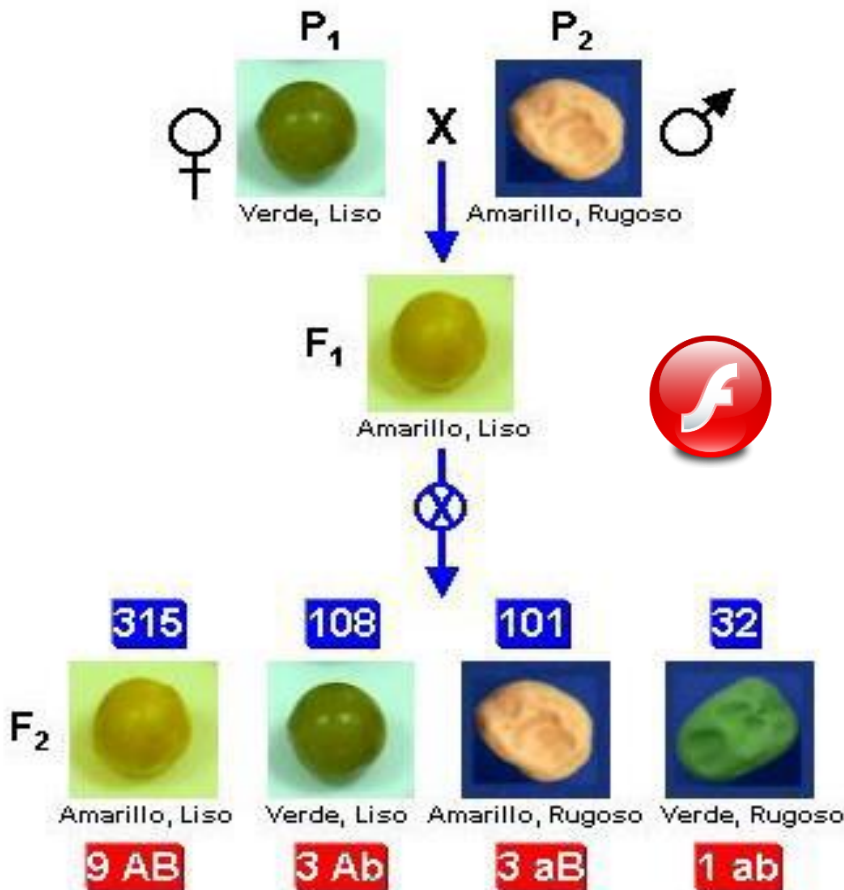
a y b representan alelos recesivos.





Ley de Mendel de la transmisión independiente de los caracteres

- Las cruces dihíbridos proporcionan evidencias de que en los gametos se pueden obtener cualquier combinación de alelos.



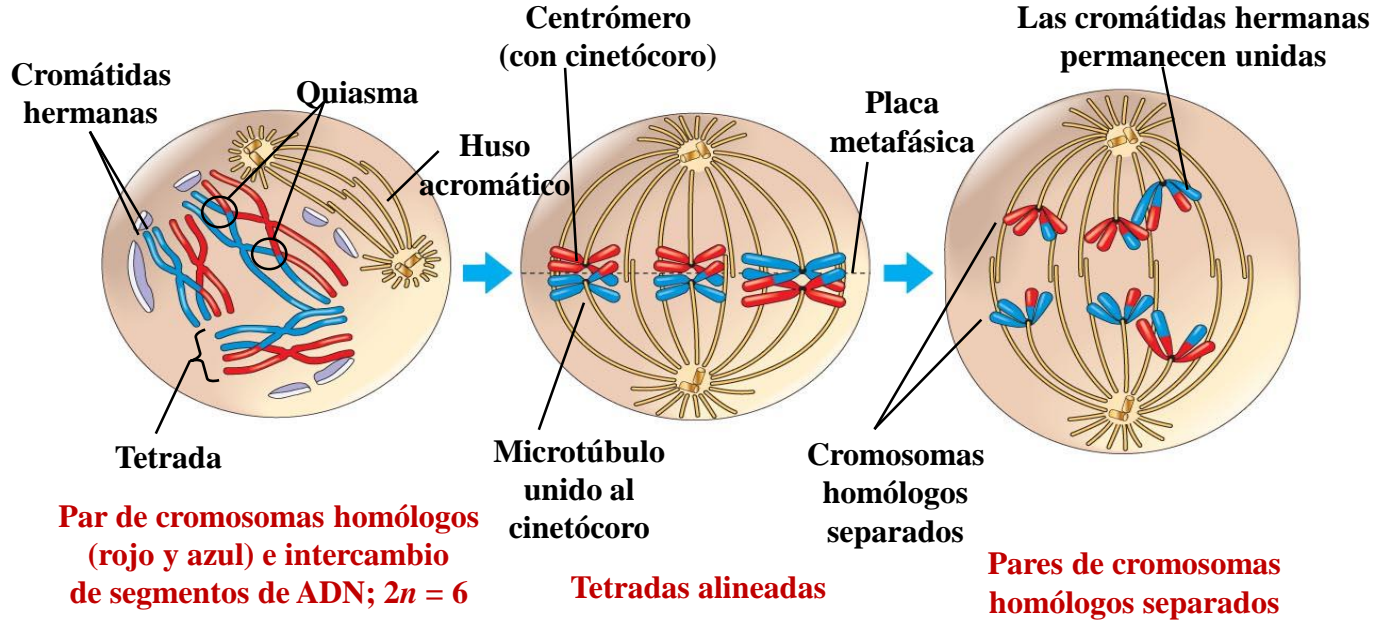
- La proporción 9:3:3:1 de fenotipos en un cruce entre dos dihíbridos muestra que todos los gametos son igualmente probables.
- Esto se debe a la **segregación aleatoria de los cromosomas homólogos en la metafase I**, donde la orientación de un bivalente no afecta a la orientación de los otros.
- En conclusión, **la transmisión independiente de genes se debe a la orientación aleatoria de los pares de cromosomas homólogos en la meiosis I.**

Handwritten notes:
 n l m m
 x x x x x x x x x x



HABILIDAD: Dibujo de diagramas que representen las etapas de la meiosis: Metafase I

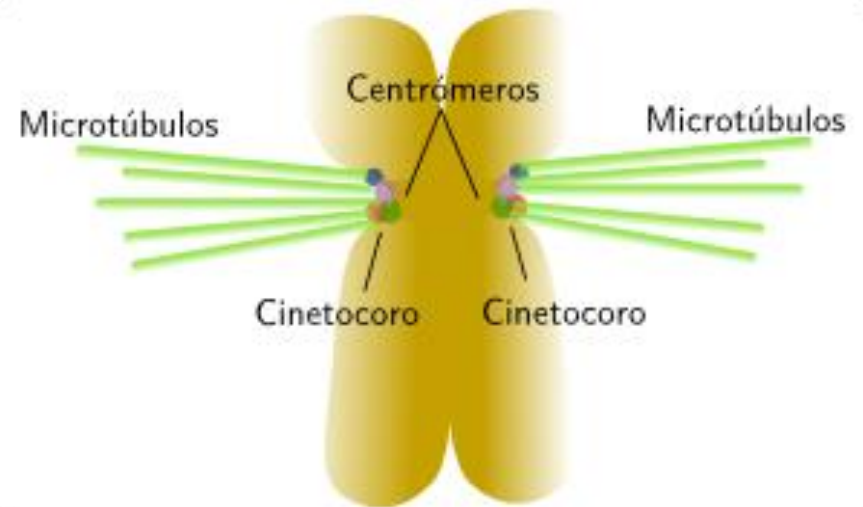
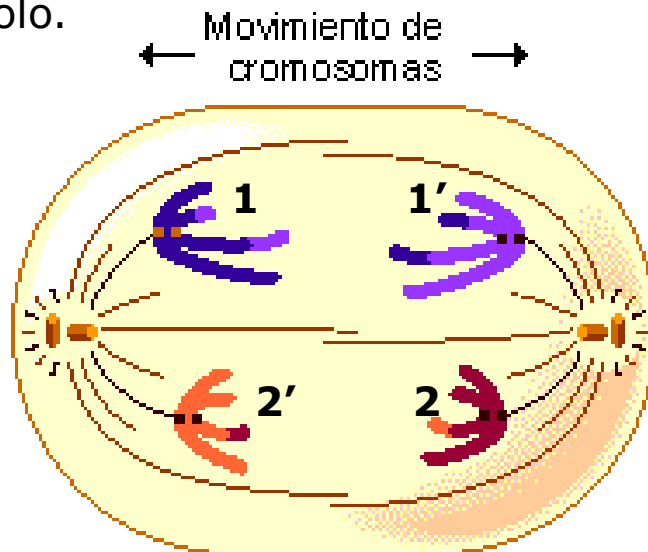
MEIOSIS I: Separación de los cromosomas homólogos		
PROFASE I	METAFASE I	ANAFASE I





1ª División meiótica: Anafase I

- Los pares de cromosomas homólogos que forman los bivalentes se separan al romperse los quiasmas. Esta separación de los cromosomas homólogos se denomina **disyunción**.
- Cada homólogo, formado por dos cromátidas hermanas unidas por el centrómero, se desplaza a un polo opuesto de la célula.
- Esto ocurre porque los dos cinetócoros que componen cada cromosoma (uno por cromátida) están fusionados y orientados hacia el mismo polo. Así, los dos cinetócoros de un homólogo están orientados hacia un mismo polo, mientras que los dos cinetócoros de su homólogo lo están hacia el otro polo.

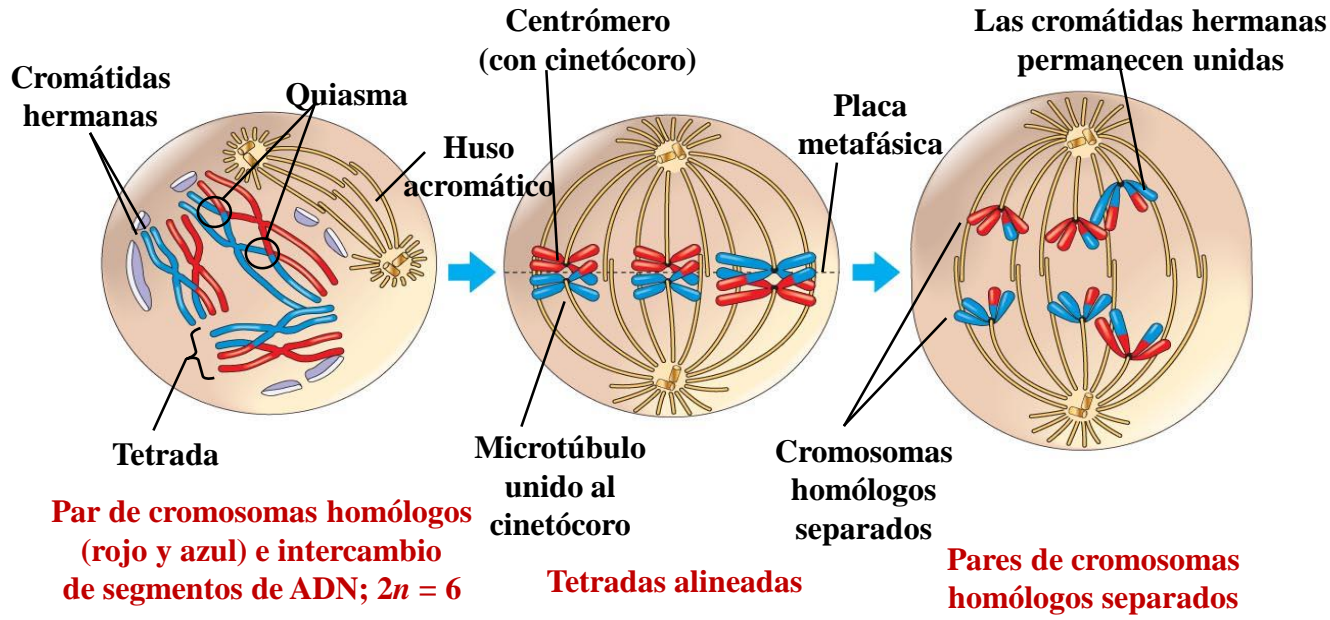




HABILIDAD: Dibujo de diagramas que representen las etapas de la meiosis: Anafase I

MEIOSIS I: Separación de los cromosomas homólogos

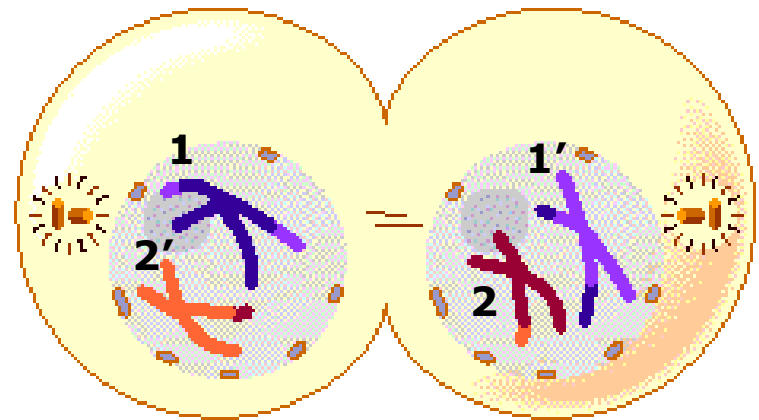
PROFASE I	METAFASE I	ANAFASE I
------------------	-------------------	------------------





1ª División meiótica: Telofase I y citocinesis

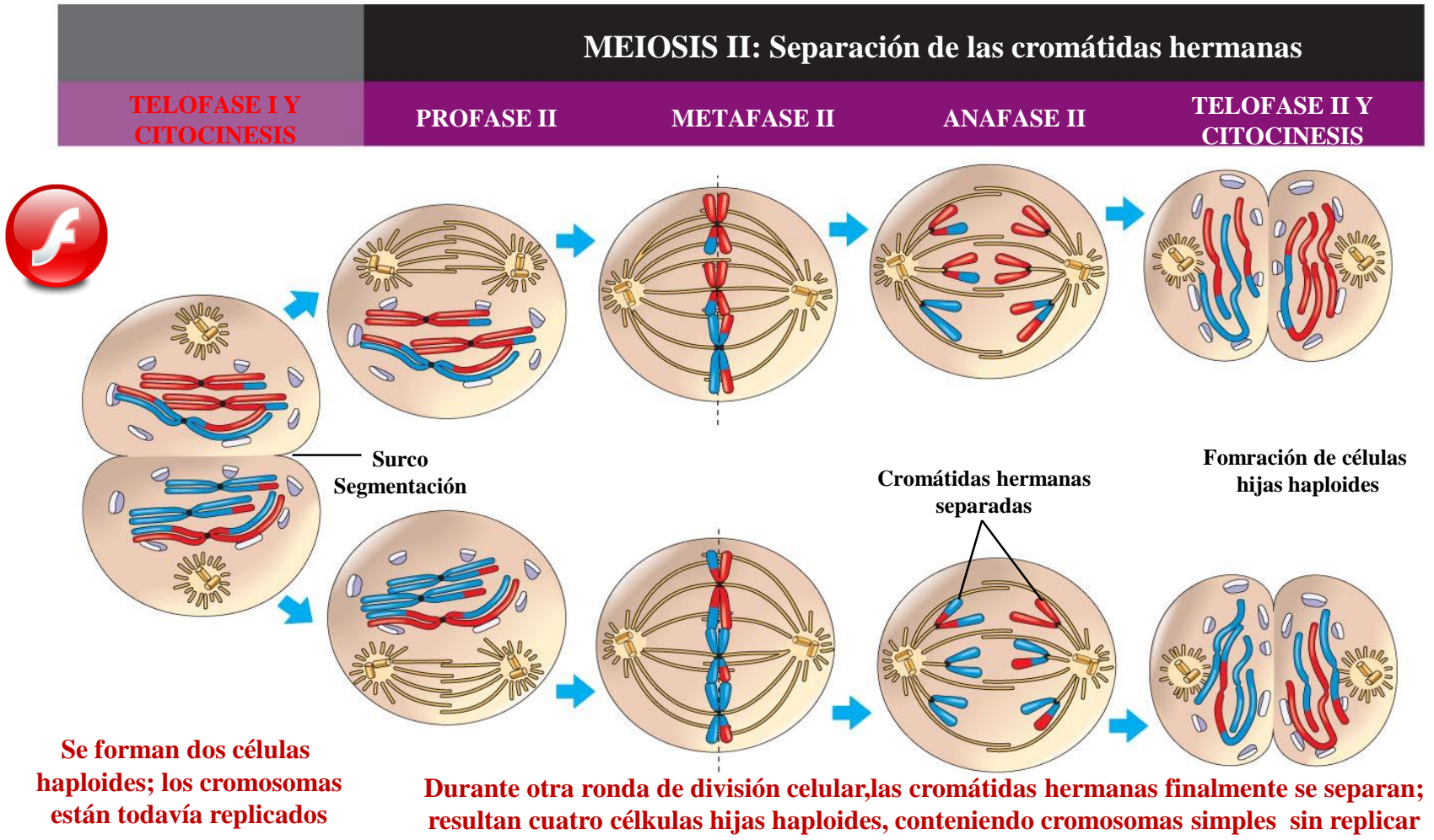
- **La separación de pares de cromosomas homólogos en la primera división de la meiosis divide por dos el número de cromosomas**, por lo que al comienzo de la telofase I, cada mitad de la célula contiene un set haploide de cromosomas, cada uno de los cuales con dos cromátidas hermanas.
- Al final de la telofase I el nucleolo y la membrana nuclear se han regenerado, desaparecen las fibras del huso y los cromosomas comienzan a decondensarse.
- La **citocinesis (citoquinesis)** ocurre simultáneamente, formando dos células hijas haploides. En células animales se forma un **surco de segmentación**, mientras que en las vegetales se forma el **fragmoplasto**.
- Tras la separación de las dos células hijas, se entra en una **breve interfase** caracterizada porque no hay fase S (replicación del ADN).



Handwritten signature and scribbles.



HABILIDAD: Diagrama etapa Telofase I y citocinesis



Se forman dos células haploides; los cromosomas están todavía replicados

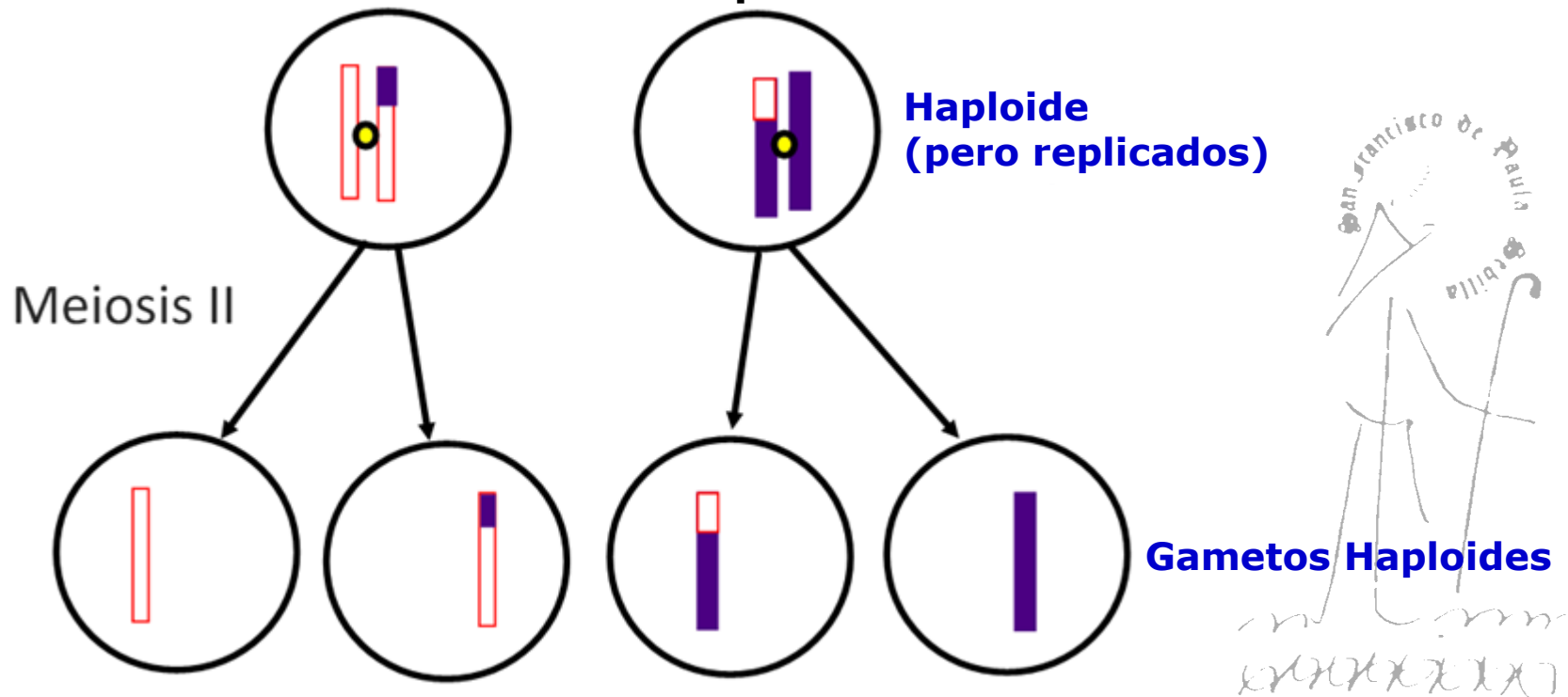
Durante otra ronda de división celular, las cromátidas hermanas finalmente se separan; resultan cuatro células hijas haploides, conteniendo cromosomas simples sin replicar

x x x x x x x x x x x x x x



2ª División meiótica (Meiosis II)

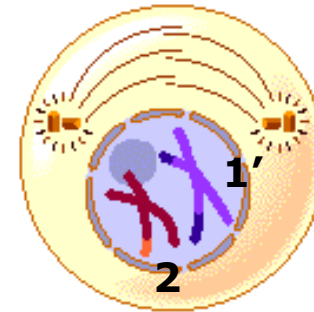
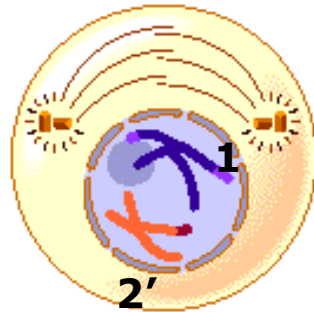
- Se puede considerar un proceso similar a una mitosis, y consta también de cuatro fases (profase II, metafase II, anafase II y telofase II).
- En ella tiene lugar la separación de las cromátidas hermanas y un nuevo proceso de división celular, por lo que se obtienen 4 células haploides.
- Por tanto, **los cromosomas homologos se separan en la meiosis I y las cromátidas hermanas se separan en la meiosis II.**



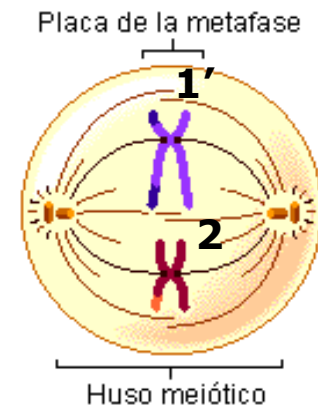
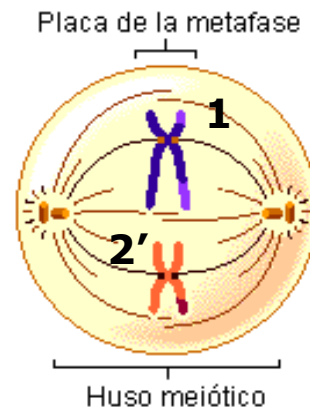


2ª División meiótica: Profase II y Metafase II

- En la **Profase II** desaparecen las membranas nucleares y se forman dos nuevos husos, uno para cada célula hija resultante de la primera división.

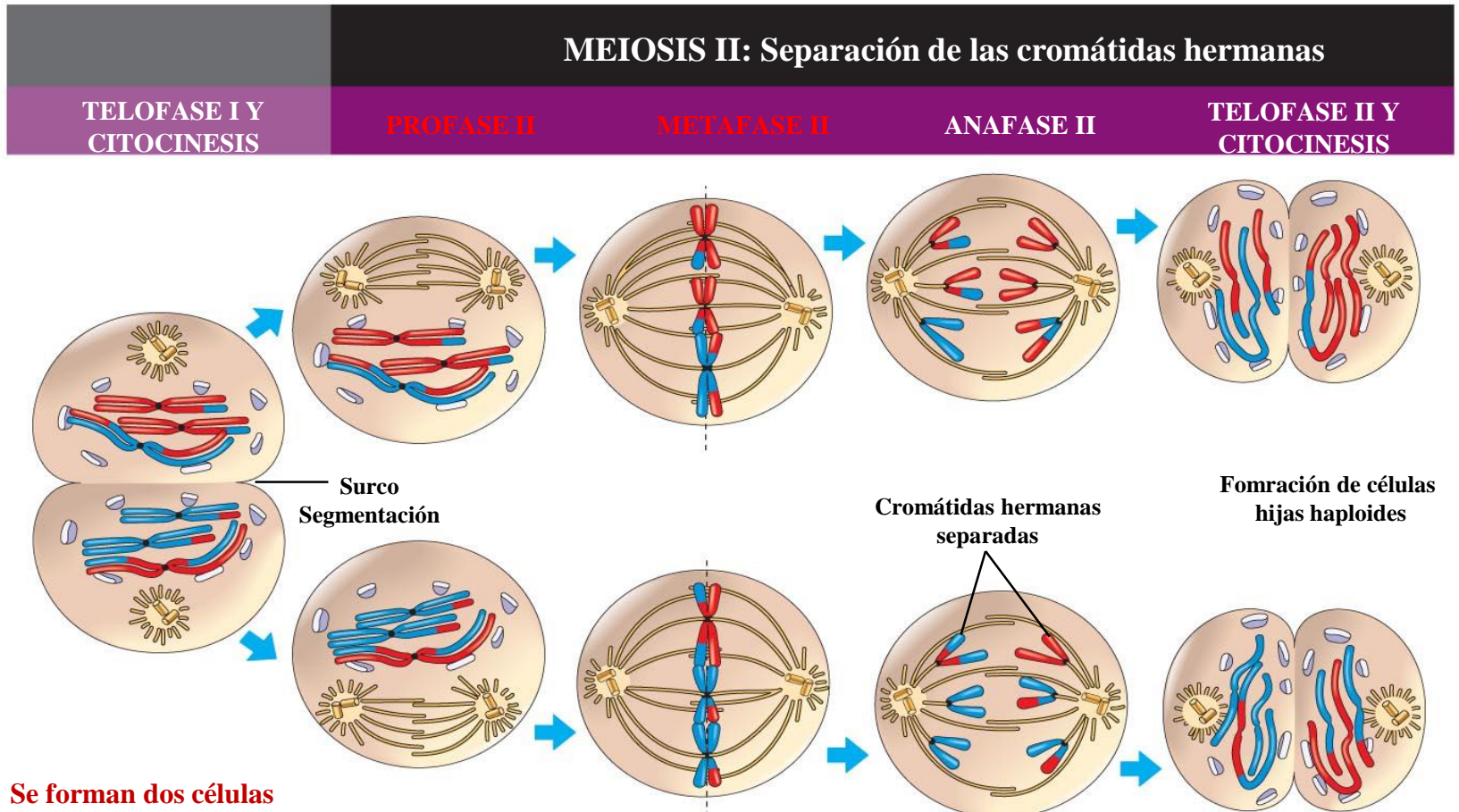


- En la **Metafase II** los cromosomas se alinean en el ecuador de la célula, uniéndose el cinetócoro de cada cromátida hermana a los microtúbulos de polos opuestos. Esta orientación también es aleatoria, pudiendo quedar ambas cromátidas recombinadas hacia un mismo polo o no.





HABILIDAD: Diagrama etapas Profase II y Anafase II



Se forman dos células haploides; los cromosomas están todavía replicados

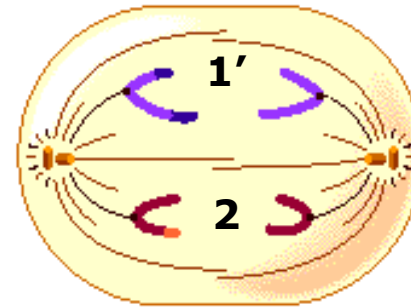
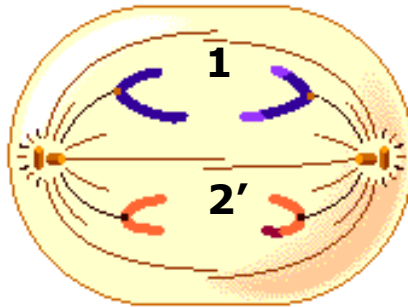
Durante otra ronda de división celular, las cromátidas hermanas finalmente se separan; resultan cuatro células hijas haploides, conteniendo cromosomas simples sin replicar

Handwritten notes and scribbles at the bottom right of the page.

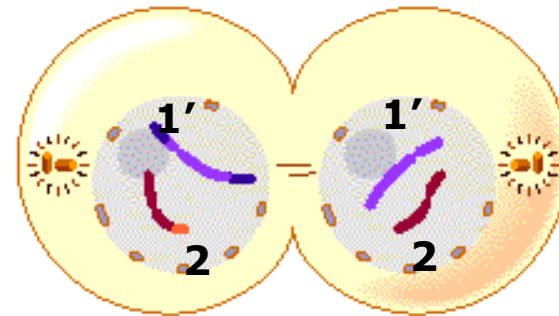
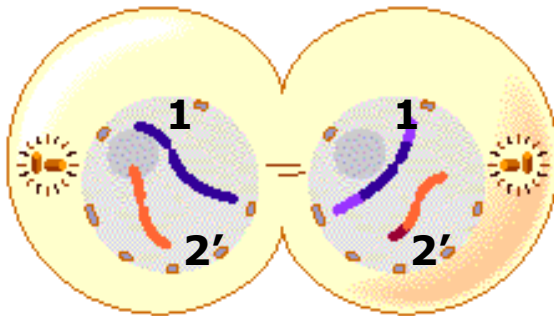


2ª División meiótica: Anafase II y Telofase II

- En la **Anafase II** se rompen los centrómeros y las cromátidas hermanas se separan atraídas por los microtúbulos cinetocóricos.



- En la **Telofase II** los cromosomas llegan a los polos opuestos, se forma el núcleo y los cromosomas comienzan a descondensarse. La **citocinesis** es simultánea, originando cuatro células hijas genéticamente distintas, cada una con un juego o set de cromosomas sin replicar.



Cuatro células hijas haploídes





Variación del contenido de ADN en meiosis

(A) Interfase: 1 célula diploide ($2n$)

(B) Fase S

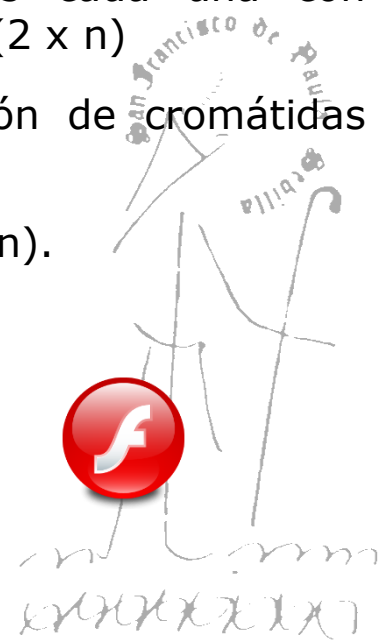
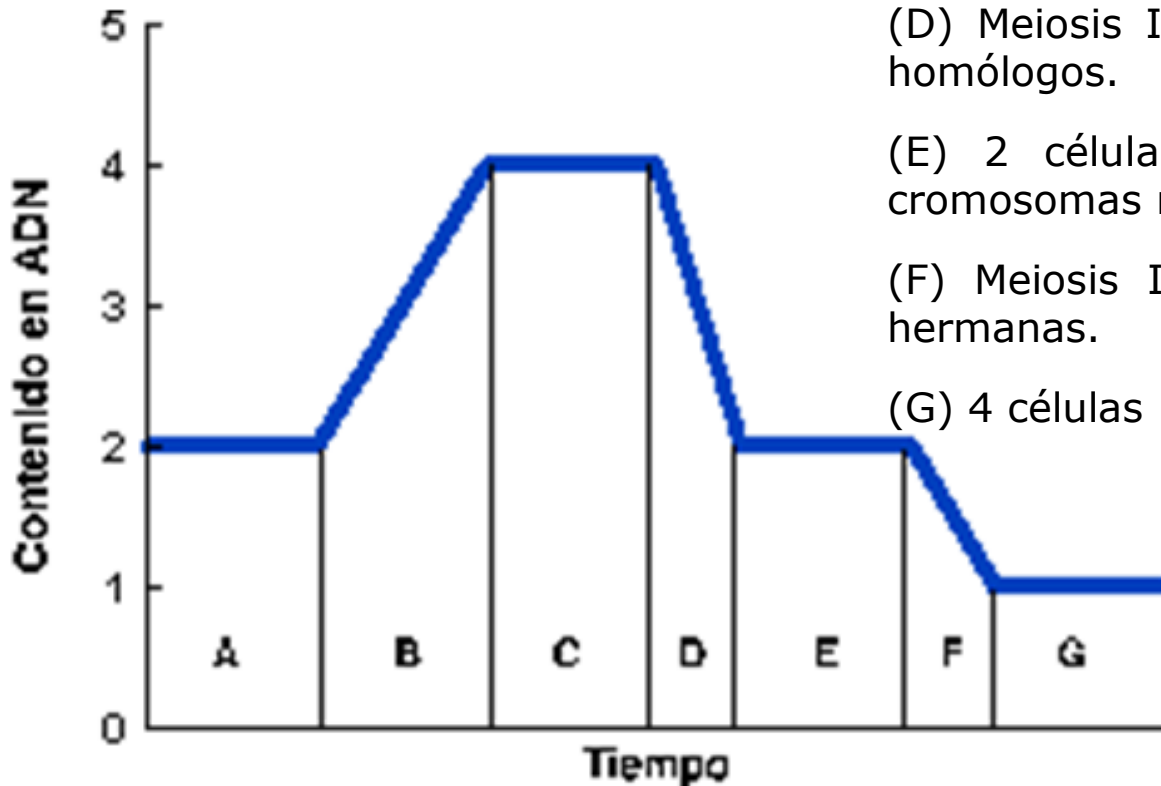
(C) 1 célula diploide con cromosomas replicados ($2 \times 2n$) = tetraploide ($4n$)

(D) Meiosis I separación de cromosomas homólogos.

(E) 2 células haploides cada una con cromosomas replicados ($2 \times n$)

(F) Meiosis II separación de cromátidas hermanas.

(G) 4 células haploides (n).

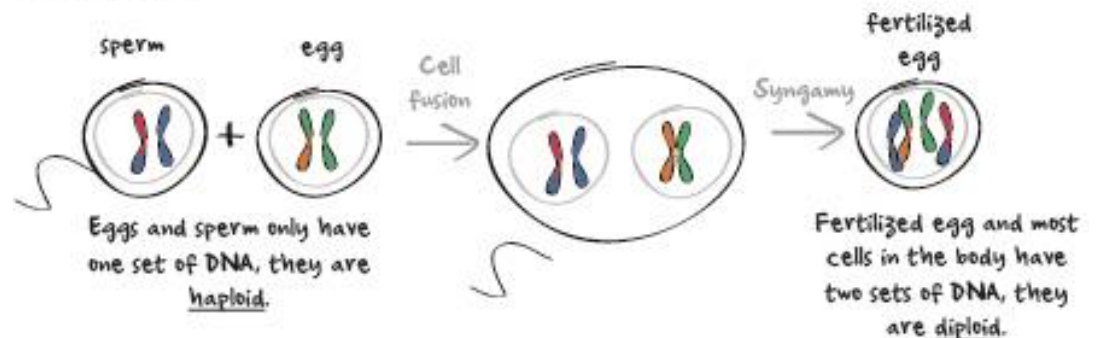




Variación genética

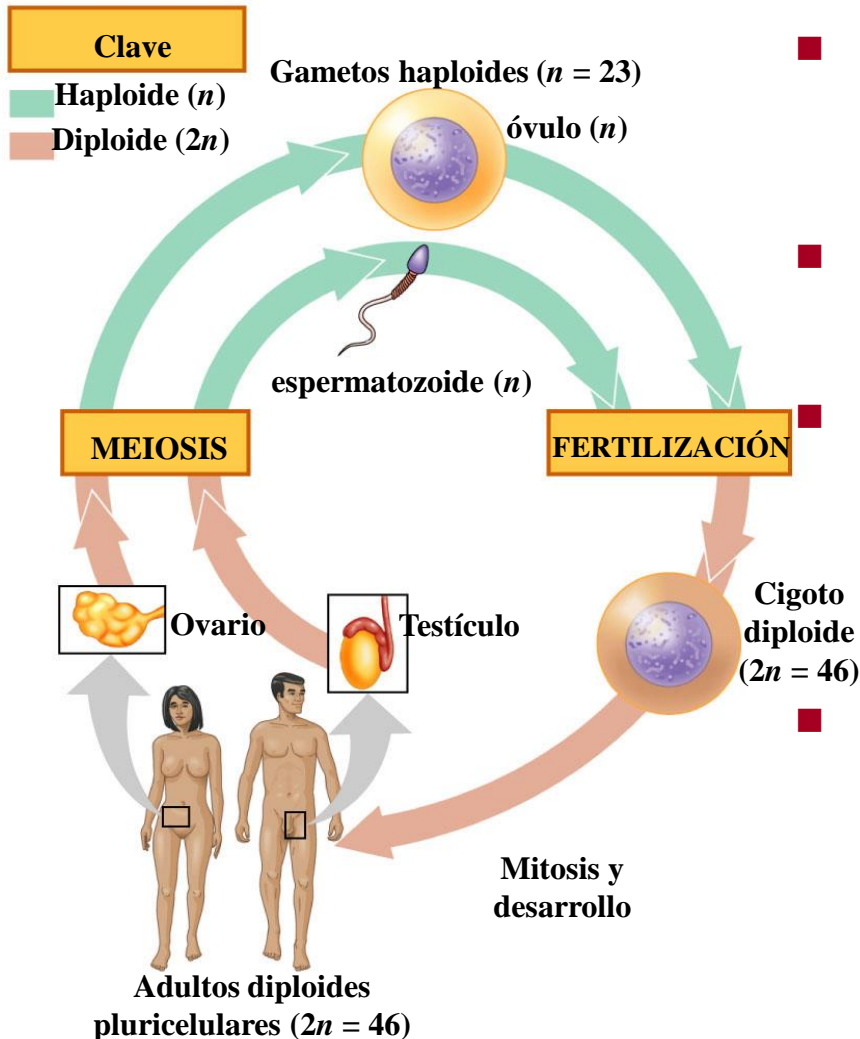
- Tal como se ha comentado, **el sobrecruzamiento de los cromosomas homólogos en profase I y la orientación aleatoria de los bivalentes en metafase I promueven la variación genética.**
- Pero además, **la fusión de gametos de diferentes progenitores también promueve la variación genética.** La fusión de los gametos para producir un cigoto es un evento importante por varias razones:
 - 1) Es el comienzo de la vida de un nuevo individuo.
 - 2) Permite que los alelos de dos individuos diferentes se combinen en un nuevo individuo.
 - 3) La combinación de alelos generada es improbable que haya existido anteriormente.
 - 4) La fusión de gametos promueve por tanto la variación genética de una especie, esencial para que evolucione.

FERTILIZATION





Necesidad de la meiosis

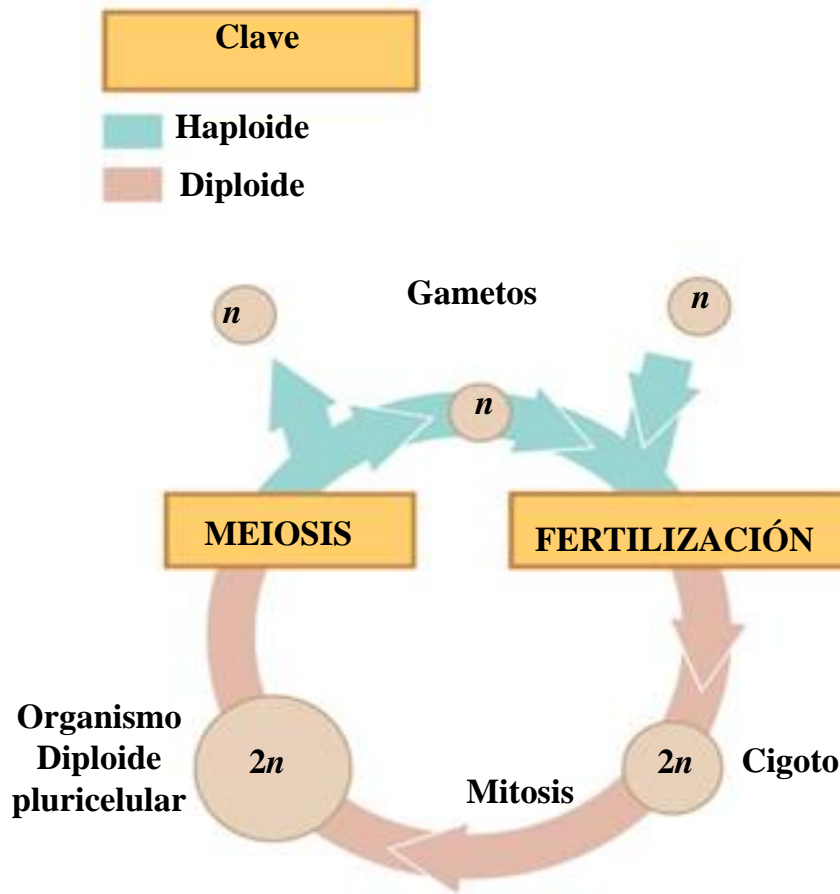


- En los organismos con ciclo de vida sexual, en algún momento de su vida tendrá lugar la fusión (fertilización) de los gametos para formar el cigoto.
- Los núcleos de los gametos se fusionan por lo que el cigoto presenta el doble de cromosomas que cada gameto.
- Si no existiese la meiosis, cada cigoto originaría individuos diploides que al llegar a la madurez produciría gametos con igual n° de cromosomas, y que al fecundarse multiplicaría nuevamente la dotación cromosómica.
- Por tanto, se hace necesario un mecanismo como **la meiosis, que reduce a la mitad el n° de cromosomas, permitiendo un ciclo de vida sexual con una fusión de gametos para mantener la dotación cromosómica de la especie.**



Aspectos evolutivos: Ventajas de la reproducción sexual

- La reproducción sexual, a diferencia de la asexual, requiere dos gametos que se unen en la fecundación y sus núcleos se fusionan en un sólo núcleo que contiene la suma de los cromosomas transportados por ambas células.



- Por tanto, hay una mezcla de genomas procedentes de dos células diferentes, que producen descendientes genéticamente distintos entre sí y de sus progenitores.

- Por ello, la reproducción sexual genera **diversidad genética** en las poblaciones, lo que presenta grandes ventajas respecto a la asexual. **El origen de esta diversidad se encuentra en la meiosis**, que produce una **variedad genética efectiva infinita de gametos** como resultado del sobrecruzamiento que tiene lugar en la profase I y en la orientación aleatoria en la metafase I.

Handwritten notes:
mitosis
XXXXXX

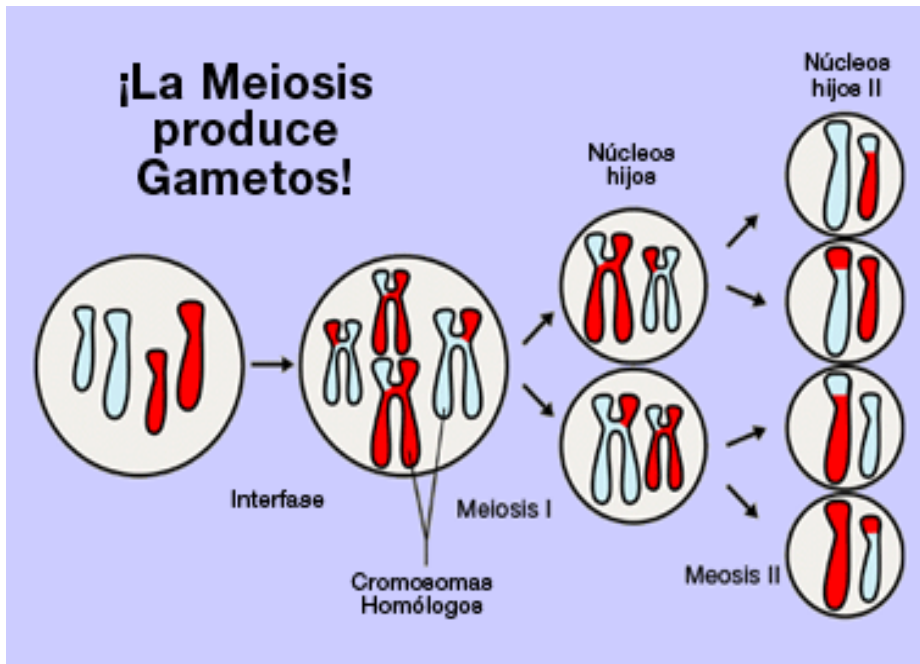


Aspectos evolutivos: Ventajas de la reproducción sexual

- Las **mutaciones** también originan variabilidad genética, pero no es suficiente, sino que es necesaria la variabilidad genética creada en la meiosis como verdadero motor que posibilita la **evolución de las poblaciones por selección natural**. Este es el verdadero **significado biológico** de la reproducción sexual.

- Por tanto, la **variabilidad genética** se obtiene mediante:

- Las **mutaciones**, que generan nuevos alelos.
- La **recombinación** en profase I, que produce nuevas combinaciones de alelos.
- La **segregación cromosómica** en metafase I, que combinan al azar los cromosomas de origen materno y paterno.



Handwritten signature or scribble.