

## Capítulo 51. La continuidad de la vida I: Desarrollo

Cada vida humana comienza con la fusión de un espermatozoide y un óvulo . Si el óvulo recién fecundado de un animal -de cualquier animal- se examina bajo el microscopio electrónico, no puede encontrarse ningún indicio del enorme potencial con que está dotada esta célula única. ¿De qué manera las estructuras complejas del embrión , y posteriormente del animal adulto, se desarrollan a partir de esta célula única, aparentemente simple? Esta pregunta es una de las más fundamentales de la biología y aunque ha concitado la atención de los científicos durante más de 100 años, aún no se cuenta con una respuesta completa y definitiva.

En el proceso del desarrollo , el óvulo fecundado se transforma en un organismo completo, que consiste en centenares o miles de millones de células y que se asemeja, en gran medida, a sus progenitores. Este proceso implica crecimiento, diferenciación y morfogénesis .

El desarrollo en la mayoría de las especies animales comienza con la fecundación -la fusión del ovocito y del espermatozoide-. El erizo de mar presenta muchas similitudes en el proceso de fertilización comparado con los vertebrados y otros cordados. Los erizos de mar son, desde hace mucho tiempo, los favoritos de los embriólogos. Una vez formado, el huevo comienza a dividirse por mitosis . De esta manera, se pone en movimiento la cadena de los fenómenos del desarrollo.

El desarrollo ocurre en tres etapas: segmentación , gastrulación y organogénesis . Cuando la segmentación se completa, el embrión consiste en un cúmulo de células, la blástula, con una cavidad central, el blastocele. La segmentación implica una serie de divisiones mitóticas en las que el volumen citoplasmático del huevo es dividido en numerosas células nucleadas y más pequeñas, llamadas blastómeras .

La gastrulación da como resultado el establecimiento de tres capas de tejidos: el endodermo, el mesodermo y el ectodermo. Cada una de estas capas de tejido primario establecidas origina tejidos y órganos particulares.

Hacia el final de la gastrulación, comienzan a aparecer los primeros signos visibles de diferenciación. En los huevos amniotas , como los de los reptiles, aves y mamíferos, el embrión, a medida que se desarrolla, forma cuatro membranas extraembrionarias: el saco vitelino , la alantoides , el corion y el amnios .

Los patrones básicos de desarrollo son notablemente semejantes en todo el reino animal, incluido el hombre. Los estudios experimentales sobre invertebrados, anfibios, aves y mamíferos han provisto de un fundamento sólido a nuestra comprensión del desarrollo humano.

### Fertilización del ovocito y formación del cigoto

Las primeras etapas del desarrollo embrionario de un equinodermo son, en varios aspectos importantes, similares a los que se observan en los vertebrados y otros cordados, lo que indica una relación evolutiva más íntima que la que se esperaría sobre la base de la comparación de las formas adultas.

El desarrollo comienza con la fertilización del óvulo por el espermatozoide. La célula huevo es de mucho mayor tamaño que el espermatozoide ya que todo el material necesario para las primeras etapas del desarrollo embrionario está almacenado en ella. Una vez formado, el huevo comienza a dividirse por mitosis. De esta manera, se pone en movimiento la cadena de los fenómenos del desarrollo.

En muchas especies, aunque la activación del óvulo y la mitosis siguen a la fertilización, también pueden sucederse sin ésta y el embrión puede desarrollarse por partenogénesis. Los óvulos de muchos invertebrados, y de algunos vertebrados, son capaces de desarrollarse normalmente en ausencia de espermatozoides si éstos son activados artificialmente. Los mamíferos, en cambio, no presentan partenogénesis. Por el contrario, la presencia del pronúcleo femenino y del masculino son indispensables para el desarrollo normal del embrión.

## Segmentación y formación de la blástula

El embrión comienza a formar un organismo multicelular mediante un proceso llamado clivaje o segmentación, proceso que implica una serie de divisiones mitóticas en las que el volumen citoplasmático del huevo es dividido en numerosas células nucleadas y más pequeñas. El genoma embrionario transmitido por mitosis a todas las células no se expresa en los primeros estadios del desarrollo. Otra característica del clivaje es que, en la mayoría de las especies, no existe un incremento en el volumen total del embrión durante este período.

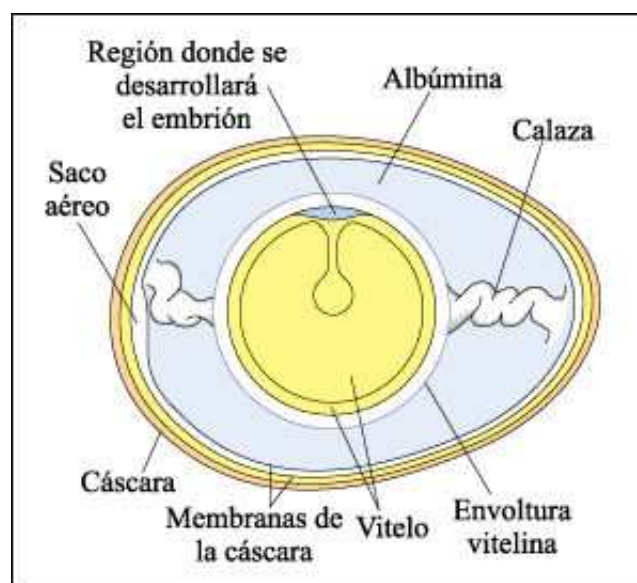
El patrón de clivaje varía según las especies y está determinado, principalmente, por la cantidad y la distribución del vitelo en el citoplasma. Cuando un hemisferio del huevo está relativamente libre de vitelo, las divisiones celulares ocurren de forma más rápida que en el hemisferio opuesto, que tiene más vitelo. El hemisferio rico en vitelo se denomina hemisferio vegetal y el hemisferio opuesto, pobre en vitelo, hemisferio animal. El núcleo del embrión generalmente se desplaza hacia el hemisferio animal donde ocurre, en general, el clivaje.

En los embriones con relativamente poco vitelo -como en el erizo de mar- la segmentación es uniforme, abarca el embrión entero y forma células de tamaño similar.

El embrión luego pasa por una etapa de mórula. Luego se crea una cavidad llena de fluido en el centro del embrión, conocida como blastocele. Cuando el blastocele está completamente formado, el embrión se llama blástula y sus células son las blastómeras. La blástula del erizo de mar tiene, aproximadamente, el mismo tamaño que la célula huevo a partir de la cual se desarrolló.

En los anfibios, la segmentación del huevo de los anfibios es diferente de la del erizo de mar principalmente en el contenido de vitelo. Como los anfibios presentan mayores cantidades de vitelo, el huevo se divide en forma desigual y se forman células de mayor tamaño en el hemisferio vegetal. Como ocurre con el huevo del erizo, la segmentación del huevo de anfibio da como resultado la formación de una blástula, pero el blastocele del anfibio es pequeño y habitualmente excéntrico. El blastoporo aparece como una hendidura con forma de media luna; siempre se forma en el límite entre la media luna gris y el hemisferio vegetal.

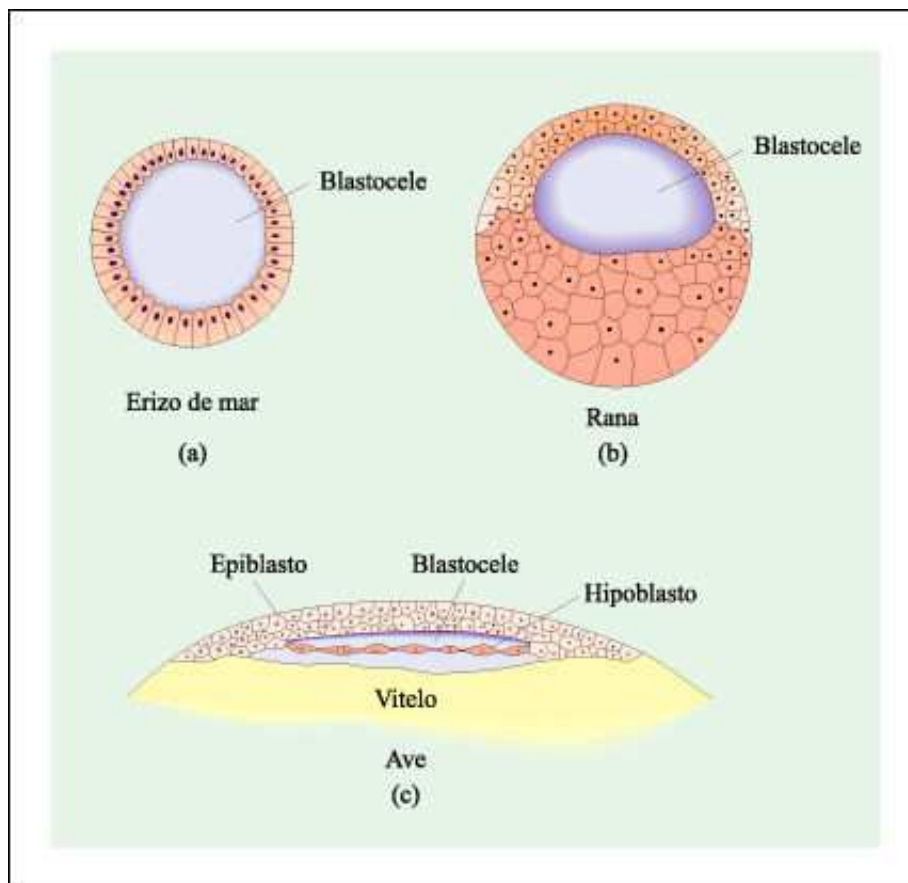
Con respecto a las aves, el huevo de gallina, familiar para todos nosotros, es diferente en muchos aspectos de los huevos mencionados. En primer lugar, está rodeado por una cáscara, que evita la desecación y permite que se desarrolle fuera del agua. En segundo lugar, en relación con su desarrollo terrestre, está rodeado por un sistema de membranas (es un huevo amniota). En tercer lugar, contiene una gran cantidad de vitelo. Esta gran cantidad de alimento almacenado posibilita un período de desarrollo más largo antes de que emerja el animal inmaduro. Como resultado, el pollo, aunque es aún pequeño en el momento del nacimiento, está mucho más adelantado en el desarrollo que la larva plútea de los erizos o el renacuajo.



Anatomía del huevo de pollo

En el momento de su liberación del ovario en la ovulación, el huevo consiste en la envoltura vitelina y sus contenidos. La fecundación, si ocurre, tiene lugar en la parte superior del oviducto. A medida que el huevo se mueve a través del oviducto se suman las capas de albúmina (la clara de huevo) sintetizadas por las células del oviducto y liberadas desde ellas. La primera de éstas, la calaza, es la estructura con forma de cuerda que se observa frecuentemente cuando se abre un huevo. La calaza mantiene suspendida a la célula huevo y asegura que el embrión, que se desarrolla a un costado del huevo, esté siempre hacia arriba, próximo al calor de la madre. Dos membranas de la cáscara y la propia cáscara se añaden antes de la puesta del huevo.

El vitelo del huevo de gallina, al igual que el de los huevos de otras aves y también de los reptiles, es tan grande y tan denso que la segmentación no abarca la mayor parte de la masa del huevo. La única parte que se segmenta es una delgada capa de citoplasma, que se sitúa como un casquete en la parte superior del vitelo y contiene al núcleo. La segmentación de esta delgada capa produce una blástula con forma de rombo, conocida como un blastodisco. Las aves, los reptiles y los mamíferos monotremas se desarrollan a partir de un blastodisco.



Blástulas de a) un erizo de mar, b) una rana y c) un ave.

En el erizo de mar y en la rana, la blástula es una esfera de células hueca. En el ave tiene la forma de un blastodisco -una esfera aplastada de células- que se constituye en la superficie del vitelo. El blastocele se ubica entre el epiblasto y el hipoblasto.

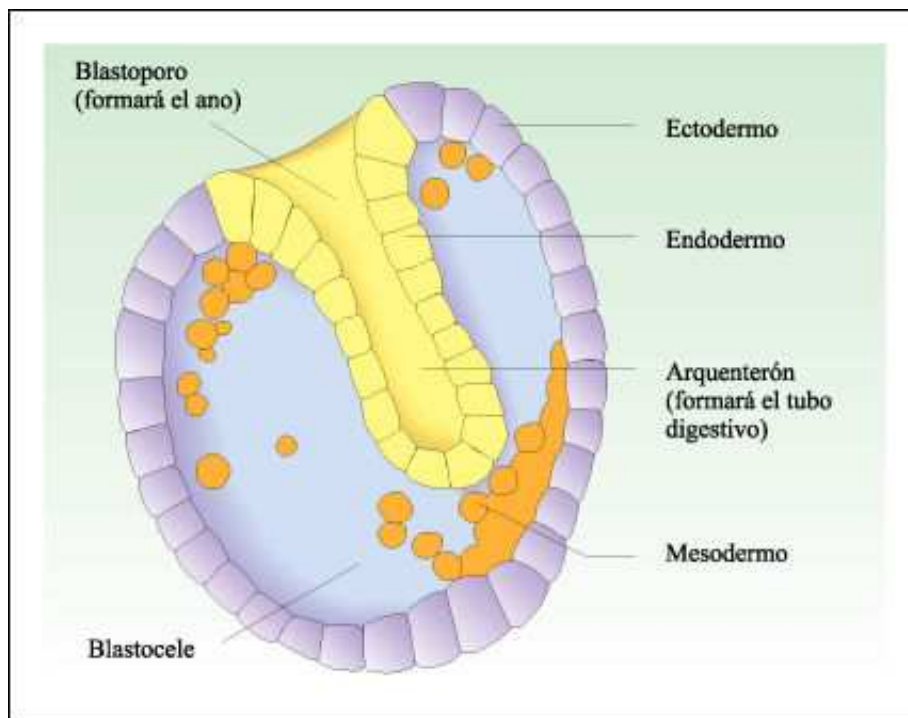
## Gastrulación y establecimiento del plan corporal

La formación de la blástula es seguida por un proceso denominado gastrulación a través del cual se origina el intestino primitivo y se desarrollan las tres capas de tejido embrionario: una capa interna, el endodermo, una capa media, el mesodermo y una capa externa, el ectodermo. Cada una de estas tres capas de tejido primario origina tejidos y órganos particulares.

En el erizo de mar, la gastrulación propiamente dicha comienza con la formación del blastoporo, una abertura en la blástula. Luego, la capa entera de células más próxima al blastoporo se invagina, moviéndose a través del blastocele hacia el polo opuesto y formando el arquenterón que finalmente desarrollará el tubo digestivo. El blastoporo se transformará en el ano. La formación del ano en el blastoporo -o cerca de él- es la característica que define a los deuteróstomos, que

incluyen a los equinodermos y a los cordados.

Como resultado de los movimientos que ocurren durante la gastrulación, se forman las tres capas de tejido embrionario mencionadas y se establece el eje anteroposterior del embrión.

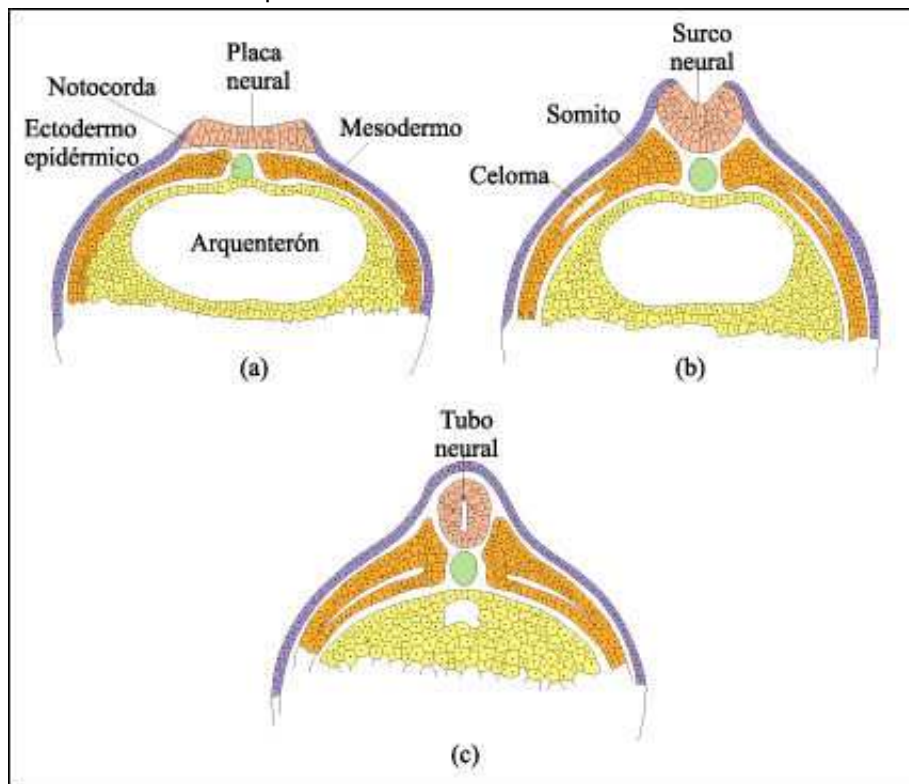


Gástrula de erizo de mar.

La gastrulación produce un embrión de tres capas. El arquenterón se transformará en el tubo digestivo, y el blastoporo, en el ano. Finalmente, el blastocele queda casi completamente obliterado. En ésta y en otras ilustraciones posteriores, el ectodermo es azul, el endodermo es amarillo y el mesodermo es rojo.

Una vez completada la gastrulación, se hace evidente que ha ocurrido un proceso de diferenciación celular. La célula huevo se ha transformado en un número de células diferenciadas, especializadas, que desempeñan funciones específicas.

La gastrulación en los anfibios sólo difiere de la del erizo de mar en algunos detalles. En *Xenopus* las células de la blástula tienen diferentes destinos según si estaban en la capa superficial o profunda del embrión. Durante la gastrulación, los tejidos embrionarios primarios -endodermo, mesodermo y ectodermo- se disponen en un patrón de tres capas. Hacia el final de la gastrulación, comienzan a aparecer los primeros signos visibles de diferenciación. El cordamesodermo, una lámina de células mesodérmicas, ha formado la notocorda y el ectodermo neural ha comenzado a engrosarse, formando la placa neural.

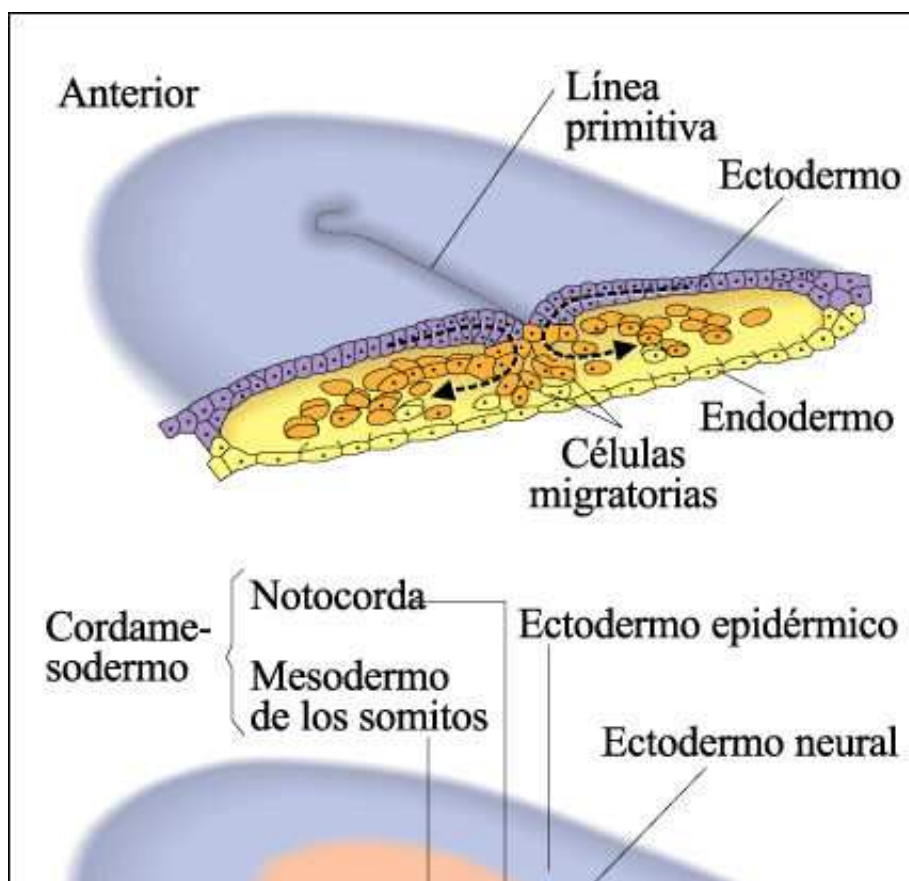


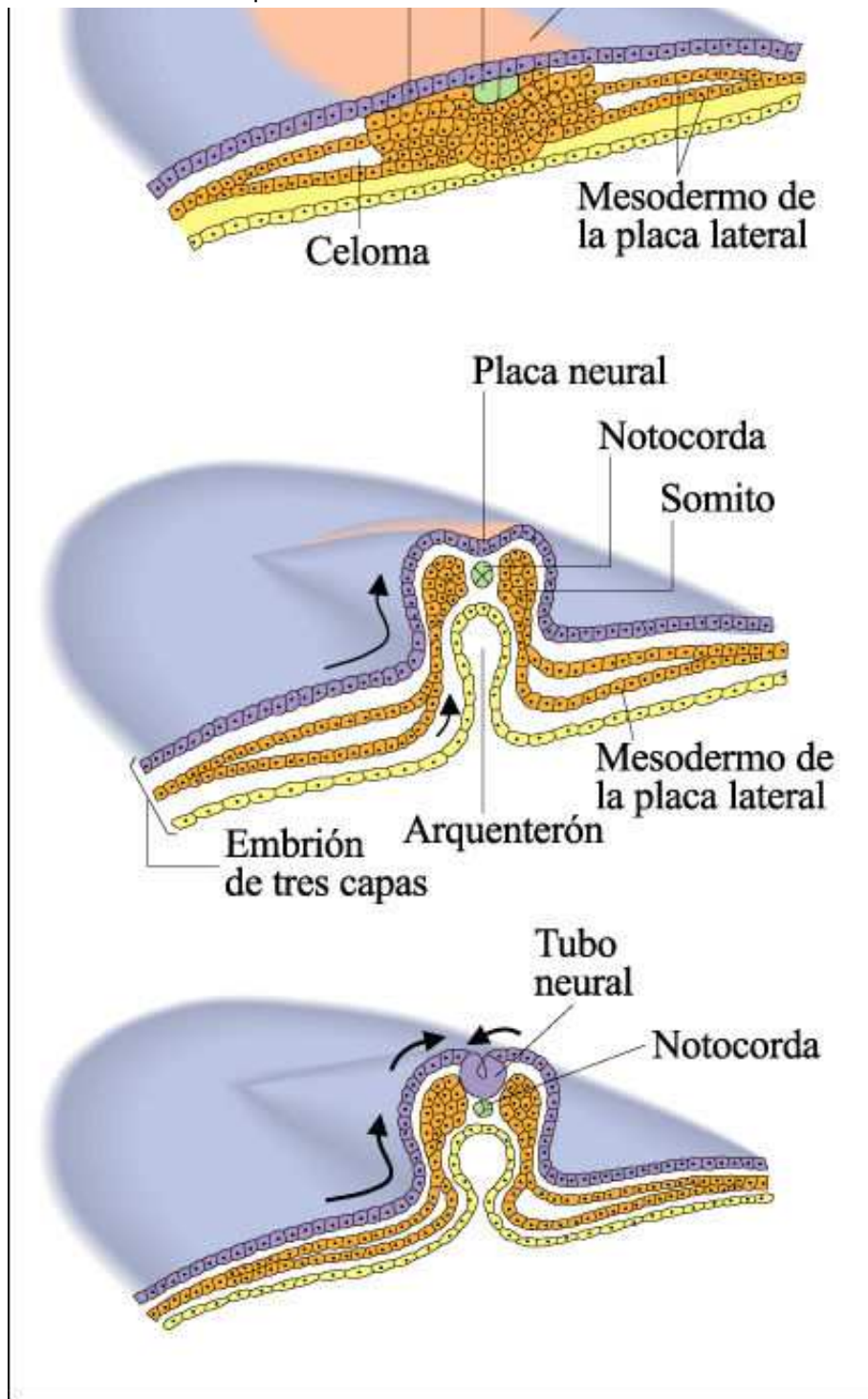
La formación del tubo neural a partir de la placa neural de la rana.

a), b). Las elevaciones engrosadas del ectodermo neural a derecha e izquierda de la placa neural se curvan formando el surco neural. Los rebordes del surco neural después se encuentran y se fusionan. c) Finalmente, el tubo neural resultante se separa del ectodermo epidérmico.

Simultáneamente, se van formando los somitos. El celoma se forma entre dos capas de tejido en el mesodermo de la placa lateral. Quedan así establecidas las principales características del vertebrado.

En las aves y en los mamíferos, el homólogo del blastoporo es la línea primitiva.

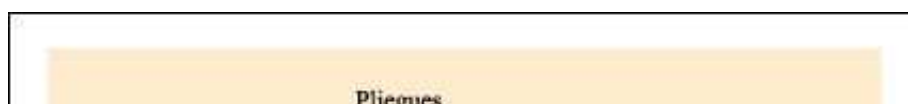




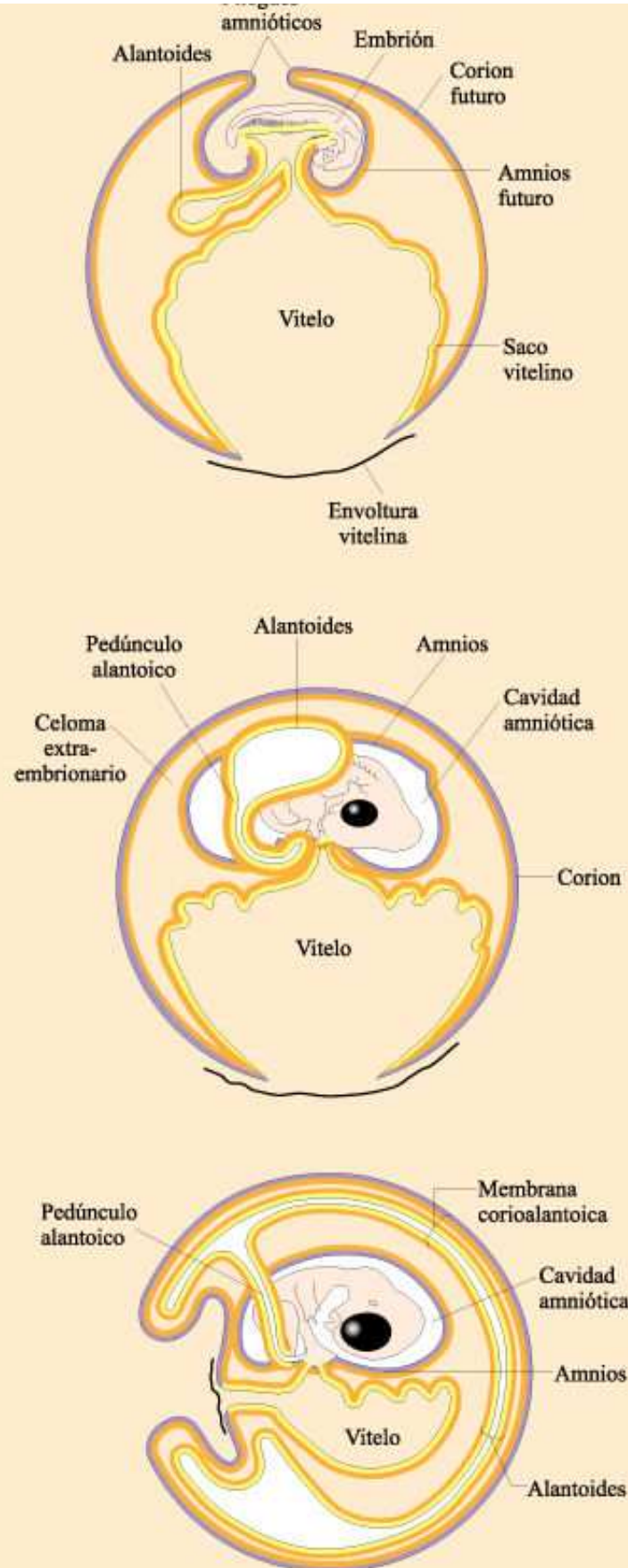
Gastrulación y formación del tubo neural en el pollo.

Uno de los pasos evolutivos más importantes entre los vertebrados fue el desarrollo del huevo amniota, que contiene su propia reserva de agua y, por lo tanto, puede ser depositado en tierra. El agua está contenida dentro de las membranas extraembrionarias. Estas membranas comienzan como extensiones del blastodisco y cada una está formada por una combinación de dos de los tipos primarios de tejido.

En los reptiles y en las aves, estas membranas desempeñan papeles esenciales en suministrar al embrión en desarrollo moléculas de alimento y oxígeno, en eliminar productos de desecho nitrogenados y proteger al embrión de la abrasión. En los mamíferos, el saco vitelino es el sitio en el cual las células germinales son retenidas antes de su migración a las gónadas en desarrollo, la alantoides se desarrolla en cordón umbilical, el corion forma estructuras del lado fetal de la placenta, y el amnios, como en aves y reptiles, encierra el embrión en una cavidad llena de fluido.



Pliegues



Las cuatro membranas extraordinarias:  
 Saco vitelino (endodermo y mesodermo)  
 Alantoides (endodermo y mesodermo)  
 Amnios (mesodermo y ectodermo)  
 Corion (mesodermo y ectodermo)

A medida que el embrión se hace tubular y se separa del vitelo, comienzan a formarse las membranas extraembrionarias. Una membrana, el saco vitelino, crece alrededor del vitelo y lo rodea casi por completo. Una segunda membrana, la alantoides, surge como una excrecencia de la parte posterior del intestino. La tercera y la cuarta se elevan por encima del embrión, se fusionan y se forman dos membranas separadas. La interna es el amnios y la externa es el corion. El corion finalmente se fusiona con la alantoides (membrana corioalantoica), que en etapas posteriores del desarrollo encierra al embrión, al vitelo y a todas las otras estructuras.

La diferenciación es el resultado de la expresión diferencial de genes específicos en el núcleo de una célula. Una variedad de experimentos han demostrado que, para ciertos tipos celulares, la diferenciación no resulta irreversible hasta bastante tarde en el proceso del desarrollo. Sin embargo, para muchos tipos celulares, la potencialidad de desarrollo se ve gradualmente limitada a medida que la gastrulación avanza y ciertas capas de células se ubican adecuadamente en el embrión. Este proceso, en el cual queda fijado el destino de una célula, depende de una serie progresiva de interacciones entre diferentes tipos de tejidos.

Las últimas etapas del desarrollo después de la segmentación y de la gastrulación generalmente se conocen como organogénesis. La organogénesis comienza con la interacción inductiva entre el ectodermo y el cordamesodermo subyacente. Cada uno de los tres tejidos primarios formados durante la gastrulación experimenta luego crecimiento, diferenciación y morfogénesis. Este proceso es esencialmente el mismo en todos los vertebrados.

Por otra parte, cada sección del cuerpo tiene una conformación y estructura características. Sólo unos pocos procesos celulares, repetidos una y otra vez en diversas permutaciones y combinaciones, parecen ser responsables de la configuración de las distintas estructuras del cuerpo. Este proceso incluye: 1) incrementos o decrementos en las tasas de crecimiento y división celular, 2) cambios en la adhesión de las células a células vecinas; 3) deposición de materiales extracelulares y 4) cambios en la configuración celular producidos por extensión o contracción.

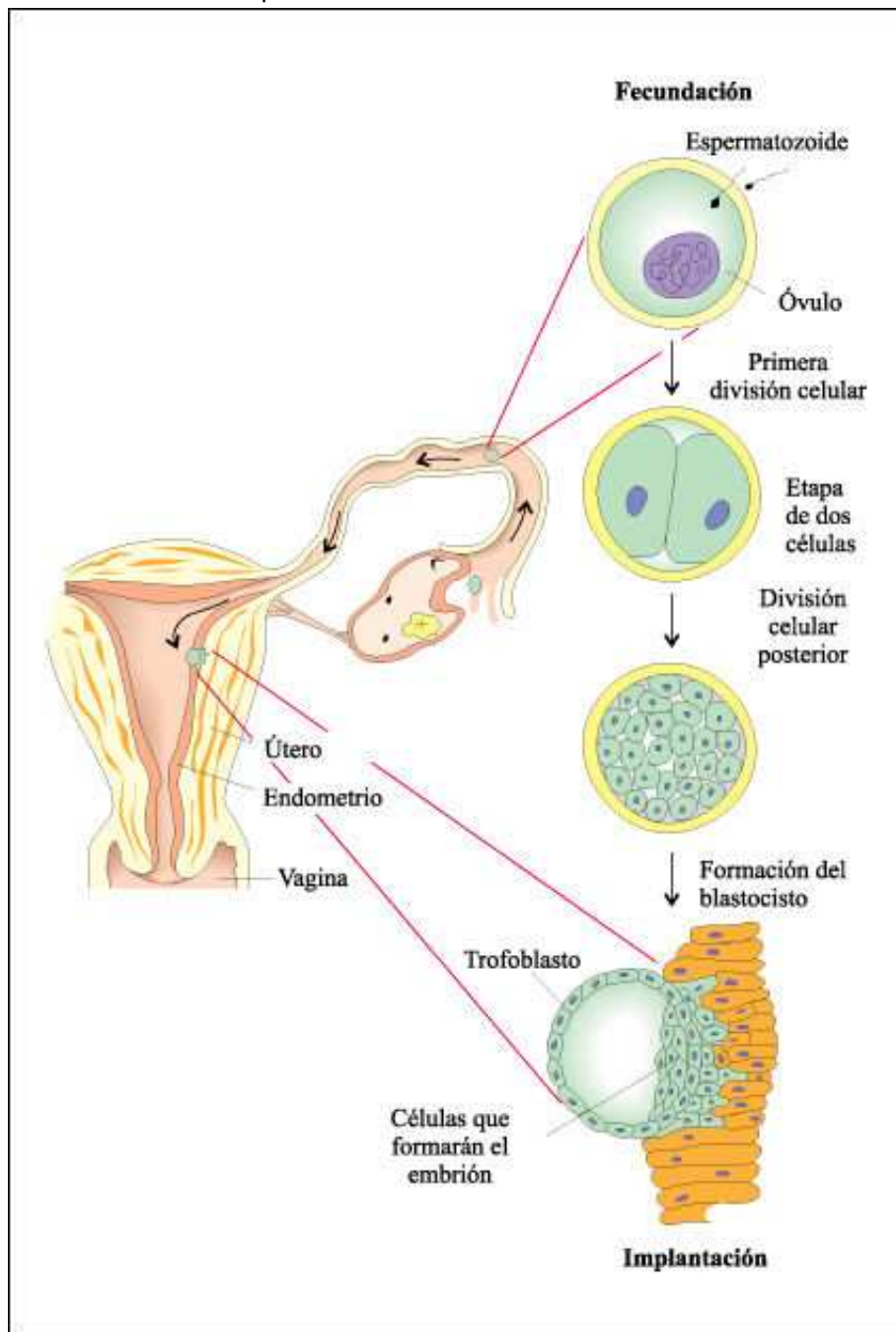
## Desarrollo del embrión humano

La fecundación del ovocito por parte del espermatozoide ocurre habitualmente en el oviducto. Luego, el huevo o embrión desciende por el oviducto. Simultáneamente experimenta una serie de divisiones mitóticas que producen un rápido incremento en el número de células, aunque no en el volumen. Estas células, las blastómeras, se tornan cada vez más pequeñas con cada división de segmentación.

En las etapas tempranas, todas las células son del mismo tamaño, al igual que el erizo de mar, y son totipotenciales. Sin embargo, las células mantienen su totipotencialidad durante unas pocas divisiones.

En un principio, el embrión depende exclusivamente del control genético materno y su desarrollo es sostenido por las proteínas, RNA, mitocondrias y otros componentes celulares pertenecientes al ovocito. Esto ocurre hasta que se activa la transcripción en el genoma embrionario. Una vez que el embrión se encuentra en el estadio de mórula, puede ingresar en el útero.





Etapas del desarrollo embrionario humano desde la fecundación hasta la implantación en la pared del endometrio.

El diminuto embrión que ha alcanzado la etapa de blastocisto invade el endometrio. Una vez realizada la implantación, comienza a formarse la placenta.

Por un proceso de compactación se diferencian dos tipos de grupos celulares, uno de los cuales formará el trofoblasto. Las células trofoblásticas no son capaces de producir ninguna célula del embrión propiamente dicho, pero son necesarias para la implantación del embrión en la pared uterina. Las células descendientes de las células internas de la mórula generarán la masa celular interna, la cual dará origen al embrión. Así, la distinción entre blastómeros del trofoblasto y de la masa celular interna representa la primera diferenciación celular en el desarrollo de mamíferos.

La mórula adquiere luego una cavidad interna, el blastocelo. La masa celular interna se posiciona sobre un lado del anillo de células trofoblásticas y esta estructura, el blastocisto, es bastante diferente de las examinadas hasta ahora. El trofoblasto es el precursor del corion. Cuando el embrión alcanza el útero, sale a través de la zona pelúcida y así puede adherirse a la pared uterina, durante el día 6 del desarrollo. Alrededor de 2 o 3 días después que el embrión llega al útero, el trofoblasto hace contacto con el epitelio uterino. El embrión humano es endocrinológicamente activo antes de la implantación; produce estrógenos -que tienen un efecto local sobre el endometrio- y gonadotropina coriónica humana (HCG), la cual estimula al cuerpo lúteo y éste, así, continúa la producción de estrógenos y progesterona. Esto impide la

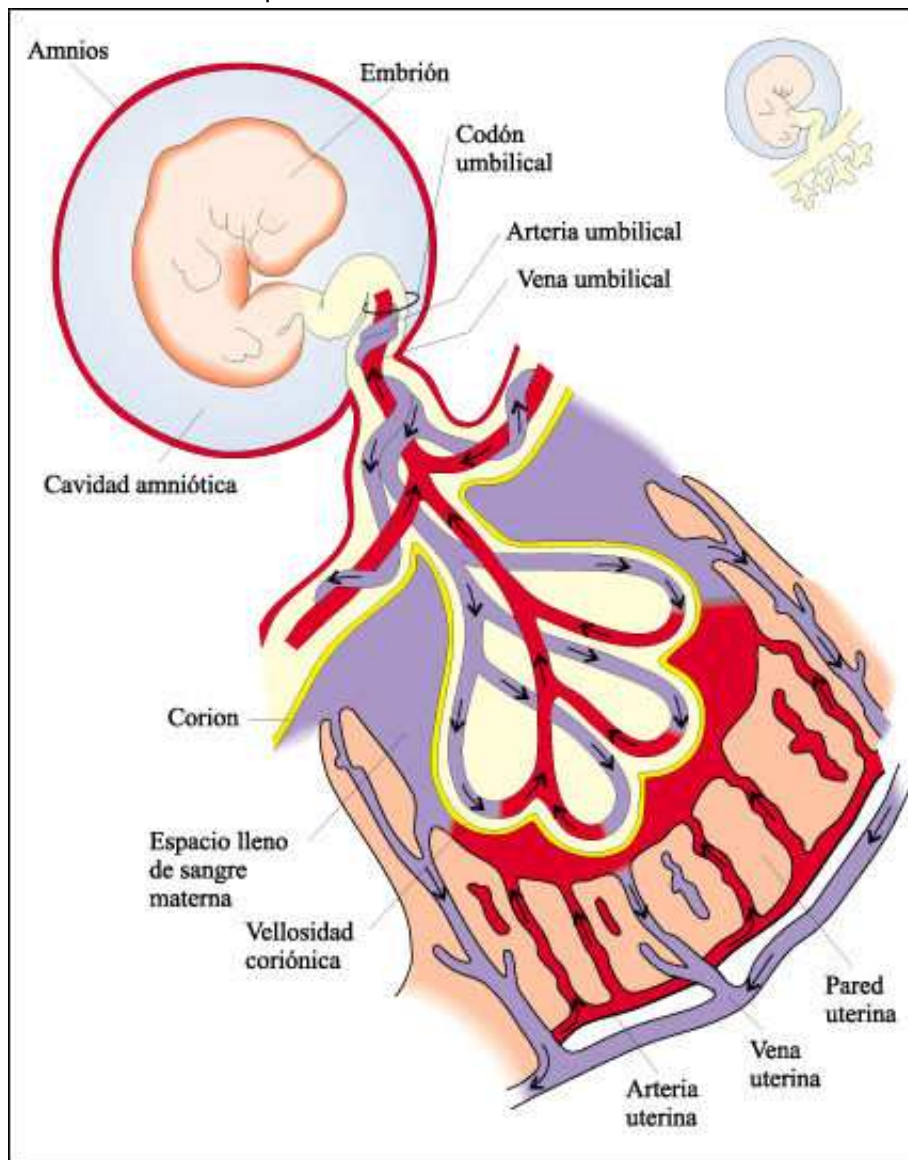
menstruación y protege, de esta manera al embarazo.

En la implantación el embrión penetra en los tejidos del endometrio y es rodeado por vasos sanguíneos rotos y por la sangre llena de nutrientes que escapa de ellos; en este momento, la sangre materna entra en contacto directo con el trofoblasto embrionario.

Al implantarse el embrión, comienzan a desarrollarse las membranas extraembrionarias que tienen interesantes similitudes y diferencias con las membranas presentes en el desarrollo de aves y reptiles. En primer lugar, el saco vitelino no tiene vitelo. Se forma la cavidad amniótica que forma la segunda membrana extraembrionaria, el amnios. Como en el pollo, la cavidad amniótica está llena con el líquido amniótico y así, el embrión se desarrolla en un medio acuoso. La tercera membrana es el corion, una combinación de células del trofoblasto y del mesodermo extraembrionario que crece a partir del propio embrión. El corion representa la porción embrionaria de la placenta y permite al feto tomar oxígeno y nutrientes de la madre. También es capaz de secretar hormonas que ayudan al útero materno a retener el embrión y de producir reguladores de la respuesta inmune que evitan el rechazo materno del embrión. Alrededor del decimocuarto día, comienzan a formarse la placenta madura.

En los seres humanos y otros mamíferos, la alantoides se origina el saco vitelino. En estos organismos, los desechos metabólicos son transportados en forma de urea y amoníaco al torrente sanguíneo materno a diferencia de lo que ocurre en el pollo, en el que son almacenados en forma de ácido úrico.

En los mamíferos, la implantación del embrión y el desarrollo de la placenta son requisitos esenciales para el desarrollo fisiológico normal del feto. Las vellosidades coriónicas otorgan una enorme superficie de intercambio. La placenta se forma como resultado de las interacciones de un tejido materno -el endometrio- con el corion extraembrionario, y está ricamente irrigada por ambos. Sin embargo, los sistemas circulatorios extraembrionarios y materno no están conectados de manera directa, de modo que las células sanguíneas de la madre y del embrión no se mezclan.



Vellosidades coriónicas.

Desde la placenta, se proyectan numerosas vellosidades coriónicas digitiformes al espacio de la sangre materna en la pared del útero. La sangre que llena estos espacios de la placenta procede de ramificaciones de la arteria uterina.

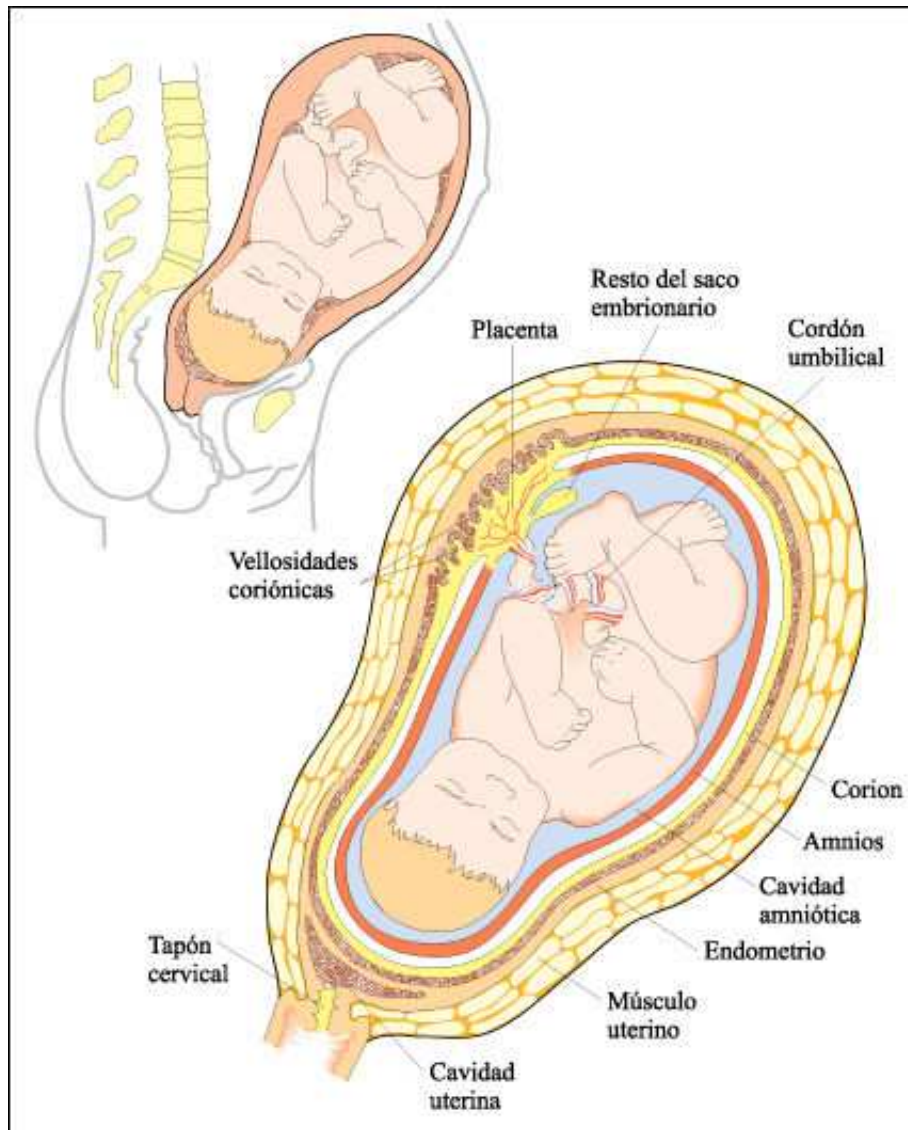
A través de la delgada barrera que separa la sangre materna de la fetal, ocurre intercambio de diversas sustancias: nutrientes solubles, oxígeno, agua y sales pasan a la vena umbilical desde la sangre de la madre, el dióxido de carbono y los desechos nitrogenados, llevados a la placenta por las arterias umbilicales, pasan a la sangre de la madre. Algunas sustancias tóxicas atraviesan fácilmente la placenta y también lo hacen algunas drogas. La permeabilidad de la placenta a diferentes sustancias depende del peso molecular de esas sustancias. Aunque la placenta teóricamente previene el pasaje de microorganismos desde la madre al feto, algunos patógenos pueden provocar en el feto enfermedades graves. Los virus atraviesan fácilmente la placenta y también pueden causar enfermedades severas en el feto o embrión. Así, la placenta es el órgano excretor del embrión, y es, asimismo, su superficie respiratoria y su fuente de nutrición.

Cuando el embrión humano tiene aproximadamente dos semanas, se forma una línea primitiva, seguida por el desarrollo de una placa neural y un surco neural, que se pliega formando el tubo neural. Aunque el embrión es aún muy pequeño, la mayoría de los órganos principales han comenzado a formarse en estas semanas muy tempranas.

Hacia el final del segundo mes, el embrión, llamado ahora feto, tiene aspecto casi humano, aunque solamente pesa aproximadamente 1 gramo.

Hacia el final del tercer mes, todos los sistemas de órganos se han constituido.

Durante el segundo trimestre continúa el desarrollo de los sistemas de órganos, y durante el trimestre final hay un gran incremento en el tamaño y en el peso. El nacimiento ocurre, en promedio, 266 días después de la fecundación.



Un feto humano, poco antes del nacimiento, mostrando las membranas protectoras y los tejidos uterinos que las rodean.

El tapón cervical está compuesto principalmente de moco. Se desarrolla por influencia de la progesterona y sirve para mantener a las bacterias y otros agentes infecciosos fuera del útero. En el 95% de todos los nacimientos, el feto se encuentra con la cabeza hacia abajo.

El parto se divide en tres etapas: la dilatación, la expulsión y la etapa placentaria. La dilatación comienza con el inicio de contracciones del útero y finaliza con la dilatación completa o apertura del cuello del útero. En esta etapa habitualmente ocurre la ruptura del saco amniótico (también llamado "bolsa") con la expulsión de fluidos.

La segunda etapa o etapa de expulsión comienza con la dilatación completa del cuello y la aparición de la cabeza del bebé en el cuello del útero. La tercera etapa, o etapa placentaria, comienza inmediatamente después del nacimiento del bebé. También implica contracciones del útero y la expulsión del fluido, de sangre y finalmente de placenta con el cordón umbilical unido. Esta etapa también es llamada posnacimiento.

El bebé emerge desde el encierro cálido y protector en el que había estado nutrido y pudo crecer durante 9 meses. El cordón umbilical -hasta ese momento su cuerda salvavidas- es cortado inmediatamente después del parto. El bebé llora con su primer aliento, comienza a respirar regularmente y, así, se inicia su existencia independiente.

## Epílogo

¿Cuándo comenzó esta vida humana particular? ¿Cuando el espermatozoide se encontró con el ovocito? ¿Cuando el embrión se transformó en un feto, visiblemente humano? ¿Cuando el bebé se hizo viable como una entidad independiente? En el pasado, estos temas se discutían entre filósofos y teólogos preocupados por la cuestión relativa al momento en que el alma entraba en el cuerpo. Estos temas han sido revividos en las controversias éticas y legales relacionadas con el aborto. Sin embargo, en un sentido evolutivo, ninguno de estos hechos marca el comienzo de la vida. La vida comenzó hace más de 3.000 millones de años y fue transmitida desde entonces de organismo a organismo, generación tras generación, hasta el presente, y se proyecta hacia el futuro, más allá de lo que la mente humana pueda avisorar. Cada nuevo organismo es, así, un participante temporal en el hilo continuo de la vida. Del mismo modo lo es cada espermatozoide, cada ovocito y de hecho -en cierto sentido- cada célula viva. Sin embargo, cada individuo es una mezcla única de herencia y experiencia que jamás podrá repetirse y que, por lo tanto, es irremplazable. Pero, desde la perspectiva de la continuidad biológica, una vida humana no dura más que el pestañeo de un ojo.

---



---

**El cuarto Blanco - Biblioteca Web**