

FIGURA 3.6 A. Ovocito inmediatamente después de la ovulación, que muestra el huso de la segunda división meiótica. B. Un espermatozoide penetró en el ovocito que ya terminó su segunda división meiótica. Los cromosomas del ovocito se disponen en un núcleo vesicular: el pronúcleo femenino. Las cabezas de varios espermatozoides quedan atrapadas en la zona pelúcida. C. Pronúcleos masculino y femenino. D, E. Los cromosomas se disponen en el huso, se dividen en forma longitudinal y migran a los polos opuestos. F. Fase bicelular.

■ FECUNDACIÓN

La fecundación, proceso a través del cual se fusionan los gametos masculino y femenino, se lleva a cabo en la **región ampular de la trompa de Falopio**. Es la parte más ancha de la trompa y está cerca del ovario (Fig. 3.4). Los espermatozoides pueden permanecer viables por varios días en el aparato reproductor de la mujer.

Apenas 1% de los espermatozoides depositados en la vagina entra en el cuello uterino, donde pueden sobrevivir muchas horas. El movimiento de los espermatozoides del cuello a la trompa de Falopio se efectúa principalmente mediante las contracciones musculares del útero y de la trompa, muy poco mediante su propulsión. El viaje desde el cuello uterino hasta el oviducto puede realizarse en 30 minutos o durar hasta 6 días. Los espermatozoides al llegar al istmo pierden motilidad y terminan su migración. Durante la ovulación los espermatozoides recobran su motilidad —quizá por la acción de quimioatrayentes producidos por las células del cúmulo que rodean al óvulo— y nadan hacia la ampolla donde suele ocurrir la fecundación. Los espermatozoides no pueden fecundar al ovocito inmediatamente después de llegar al aparato genital femenino donde experimentan 1) un proceso de **capacitación** y 2) de **reacción acrosómica**.

La **capacitación** es un periodo de acondicionamiento del tracto reproductor de la mujer que en el ser humano dura cerca de 7 horas. Por ello acortar el tiempo en la ampolla no ofrece ventaja alguna, porque todavía no se efectúa la capacitación y los espermatozoides no pueden fecundar al huevo. Gran parte del acondicionamiento durante la capacitación se lleva a cabo en la trompa de Falopio; en ella se dan interacciones epiteliales entre los espermatozoides y la superficie mucosa de la trompa. Durante este lapso una capa de glucoproteínas y de proteínas plasmáticas seminales se elimina de la membrana plasmática que recubre la región acrosómica de los espermatozoides. Únicamente los espermatozoides capacitados pueden cruzar la células de la corona y experimentar la reacción acrosómica.

La **reacción acrosómica**, que tiene lugar tras la unión con la zona pelúcida, está inducida por las proteínas de zona. La reacción culmina en la liberación de las enzimas necesarias para penetrar la zona pelúcida, entre ellas sustancias de tipo de la acrosina y tripsina (Fig. 3.5).

Las fases de la fecundación son:

- Fase 1, penetración de la corona radiada
- Fase 2, penetración de la zona pelúcida
- Fase 3, fusión entre las membranas celulares del ovocito y del espermatozoide.

Fase 1: penetración de la corona radiada

De los 200 a 300 millones de espermatozoides que normalmente se depositan en el aparato genital femenino, apenas entre 300 y 500 llegan al lugar de la fecundación. Sólo uno de ellos fecunda al óvulo. Se piensa que el resto ayuda al espermatozoide fecundador a penetrar la barrera que protege al gameto femenino. Los espermatozoides acondicionados cruzan con libertad las células de la corona (Fig. 3.5).

Fase 2: penetración de la zona pelúcida

La zona es una cubierta de glucoproteínas que rodean al ovocito para facilitar y mantener la unión del espermatozoide e inducir la reacción acrosómica. En ambos procesos interviene el ligando ZP3, una proteína de zona. La liberación de las enzimas acrosómicas (acrosina) permite a los espermatozoides penetrar en la zona; así entran en contacto con la membrana plasmática del ovocito (Fig. 3.5). La permeabilidad de la zona pelúcida cambia cuando la cabeza del espermatozoide hace contacto con la superficie del ovocito. Con el contacto se liberan enzimas lisosómicas en los

gránulos corticales que revisten la membrana plasmática del ovocito. A su vez estas enzimas modifican las propiedades de la zona pelúcida (**reacción de zona**) para evitar la penetración de otros espermatozoides en la superficie de la zona. Se han descubierto otros espermatozoides sumergidos en la zona pelúcida, pero al parecer únicamente uno parece capaz de penetrar el ovocito (Fig. 3.6).

Fase 3: fusión entre las membranas de ovocito y del espermatozoide

En parte la adherencia inicial del espermatozoide al ovocito se ve facilitada por la interacción de integrinas en el ovocito y sus ligandos y de desintegrinas en el espermatozoide. Tras la adherencia se fusionan las

membranas plasmáticas del espermatozoide y del ovocito (Fig. 3.5). Puesto que la membrana plasmática que cubre el acrosoma desaparece durante la reacción acrosómica, la fusión propiamente dicha se efectúa entre la membrana del ovocito y la que recubre la región posterior de la cabeza del espermatozoide (Fig. 3.5). En el ser humano la cabeza y la cola del espermatozoide entran en el citoplasma del ovocito, pero la membrana plasmática queda atrás en la superficie del ovocito. Cuando el espermatozoide entra en el ovocito, éste responde al instante en tres formas:

1. **Reacciones corticales y de zona.** Tras la liberación de los gránulos corticales del ovocito que contienen enzimas lisosómicas, 1) la membrana del ovocito se vuelve impenetrable a otros espermatozoides y 2) la zona pelúcida modifica su estructura y su composición para evitar la unión y penetración de otros espermatozoides. Estas reacciones impiden la poliespermia (penetración de más de un espermatozoide en el ovocito).
2. **Reanudación de la segunda división meiótica.** El ovocito termina su segunda división meiótica inmediatamente después que entra el espermatozoide. Se da el nombre de **segundo corpúsculo polar** a una de las células hijas, que recibe muy poco citoplasma; la otra es el **ovocito definitivo**. Sus cromosomas (22 más el X) se disponen en un núcleo vesicular llamado **pronúcleo femenino** (Figs. 3.6 y 3.7).
3. **Activación metabólica del ovocito.** El factor activador probablemente esté en el espermatozoide. La activación incluye los procesos moleculares y celulares iniciales que acompañan a la embriogénesis temprana.

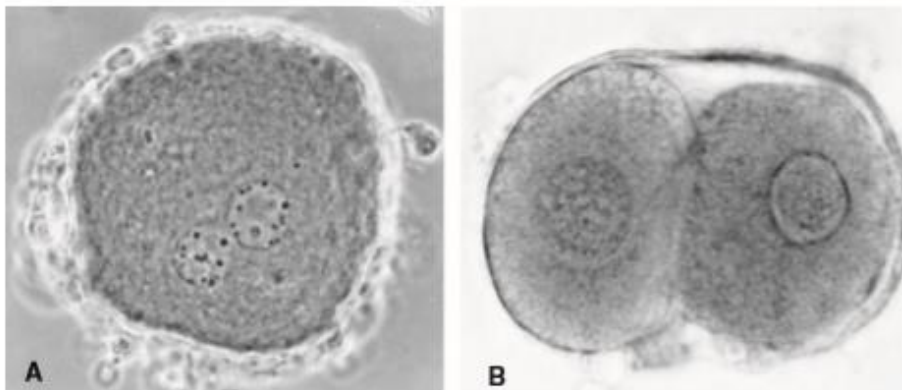


FIGURA 3.7 **A.** Imagen por contraste del periodo pronuclear de un ovocito humano fecundado, que muestra los pronúcleos masculino y femenino. **B.** Fase bicelular del cigoto humano.

Mientras tanto, el espermatozoide avanza hacia delante hasta que se halla cerca del pronúcleo femenino. Su núcleo se dilata y da origen al **pronúcleo masculino** (Fig. 3.6); la cola se separa y degenera. Desde el punto de vista morfológico, los pronúcleos masculino y femenino son indistinguibles; con el tiempo entran en contacto estrecho y pierden sus envoltorios nucleares (Fig. 3.7A). Durante el crecimiento de los dos pronúcleos (ambos haploides), cada uno debe replicar su ADN. De lo contrario, cada célula del cigoto bicelular tendrá sólo la mitad de la cantidad normal de ADN. Inmediatamente

después de sintetizar el ADN, los cromosomas se organizan en el huso preparándose para una división mitótica normal. Los 23 cromosomas maternos y los 23 paternos (dobles) se dividen en forma longitudinal en el centrómero; las cromátidas hermanas se dirigen a polos opuestos proporcionando a cada célula del cigoto un número diploide normal de cromosomas y de ADN (Fig. 3.6D,E). Al irse desplazando las cromátidas hermanas hacia los polos opuestos, un surco profundo aparece sobre la superficie de la célula, dividiendo de manera gradual el citoplasma en dos partes (Figs. 3.6F y 3.7B).

He aquí los resultados principales de la fecundación:

- **Restablecimiento del número diploide de cromosomas**, la mitad proveniente del padre y la otra mitad proveniente de la madre. Por tanto, el cigoto contiene una combinación de cromosomas distinta a la de los progenitores.
- **Determinación del sexo del nuevo individuo**. Un espermatozoide portador del cromosoma X produce un embrión femenino (XX) y un espermatozoide portador del cromosoma Y, un embrión

masculino(XY). Por tanto, el sexo cromosómico del individuo se decide en la fecundación.

- **Inicio de la segmentación**. El ovocito suele degenerar 24 horas después de la ovulación cuando no se fecunda.

■ SEGMENTACIÓN

Una vez que el cigoto alcanza la fase bicelular, pasa por una serie de divisiones mitóticas que aumentan el número de células. Éstas se vuelven más pequeñas con cada segmentación y se conocen con el nombre