



MATERIAL DE APOYO PARA EL BLOQUE II REPRODUCCIÓN

Biología

OCTAVA EDICIÓN

LA VIDA EN LA TIERRA



AUDESIRK

AUDESIRK

BYERS

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

OCTAVA EDICIÓN

Teresa Audesirk

University of Colorado at Denver and Health Science Center

Gerald Audesirk

University of Colorado at Denver and Health Science Center

Bruce E. Byers

University of Massachusetts, Amherst

TRADUCCIÓN

Augusta Victoria Flores Flores

Traductora profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Vicente Gerardo
Hernández Hernández
*Preparatoria de la Universidad
La Salle*

Paula Cortés García
*Colegio Gimnasio del Norte
Bogotá, Colombia*

Víctor Hugo
Blanco Lozano
ITESM Campus Puebla



**AUDESIRK TERESA; AUDESIRK
GERALD; BYERS, BRUCE E.**
Biología: La vida en la Tierra

Pearson Educación de México, 2008

ISBN 978-970-26-1194-3

Área: Ciencias

Formato 21 × 27

Páginas: 1024

Authorized translation from the English Language edition, entitled *Biology: Life on earth with physiology*, 8th Edition by Teresa Audesirk, Gerald Audesirk and Bruce E. Byers, published by Pearson Education Inc., publishing as PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. All rights reserved.

Versión en español de la obra titulada *Biology: Life on earth with physiology*, 8^a edición, de Teresa Audesirk, Gerald Audesirk y Bruce E. Byers, publicada originalmente en inglés por Pearson Education Inc., publicada como PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. Todos los derechos reservados.

ISBN 0-13-195766-X

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Enrique Quintanar Duarte
e-mail: enrique.quintanar@pearsoned.com
Editor de desarrollo: Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción: Rodrigo Romero Villalobos

OCTAVA EDICIÓN, 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México,
S.A. de C.V.
Atacomulco Núm. 500, 5° Piso
Col. Industrial Atoto
53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial
Mexicana. Reg. Núm. 1031

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson
Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte
de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o
transmitirse, por un sistema de recuperación de infor-
mación, en ninguna forma ni por ningún medio, sea
electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o elec-
troóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin
permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión
de uso de este ejemplar requerirá también la autoriza-
ción del editor o de sus representantes.

ISBN 10: 970-26-1194-6

ISBN 13: 978-970-26-1194-3

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08



Edición en inglés

Editor: Jeff Howard
Development Editor: Anne
Scanlan-Rohrer
Production Editor: Tim
Flem/PublishWare
Media Editor: Patrick Shriner
Executive Managing Editor:
Kathleen Schiaparelli
Editor in Chief of Development:
Carol Trueheart
Media Production: nSight
Managing Editor, Science
Media: Rich Barnes
Director of Marketing: Patrick
Lynch
Marketing Assistant: Jessica
Muraviov
Director of Creative Services:
Paul Belfanti
Creative Director: Juan Lopez
Art Director: John Christiana
Interior Design: Maureen Eide
Cover Designers: Maureen Eide
and John Christiana
Page Composition: PublishWare
Manufacturing Manager: Alexis
Heydt-Long
Buyer: Alan Fischer
Senior Managing Editor, Art
Production and Management:
Patricia Burns
Manager, Production
Technologies: Matthew Haas
Managing Editor, Art
Management: Abigail Bass
Art Development Editor: Jay
McElroy

Art Production Editor: Rhonda
Aversa
Manager, Art Production: Sean
Hogan
Assistant Manager, Art
Production: Ronda Whitson
Illustrations: ESM Art
Production; Lead
Illustrators: Daniel
Knopsnyder, Stacy Smith,
Nathan Storck;
Imagineering;
Stephen Graepel
Cartographer: GeoNova, LLC
Assistant Managing Editor,
Science Supplements: Karen
Bosch
Editorial Assistant: Gina Kayed
Production Assistant: Nancy
Bauer
Director, Image Resource
Center: Melinda Reo
Manager, Rights and
Permissions: Zina Arabia
Interior Image Specialist: Beth
Boyd Brenzel
Cover Image Specialist: Karen
Sanatar
Image Permission Coordinator:
Debbie Latronica
Photo Researcher: Yvonne
Gerin
Cover Photograph: Rockhopper
Penguins; The Neck,
Saunders Island, Falkland
Islands, by Laura Crawford
Williams

Reproducción y desarrollo de las plantas



La *Amorphophallus titanum*, también conocida como "flor cadáver", pudo florecer en Estados Unidos. La proyección central, llamada *espádice*, a menudo mide 1.80 metros de altura y está llena de pequeñas flores masculinas y femeninas.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: ¿Hermoso? Sí, pero ¿caliente?

43.1 ¿Cuáles son las características fundamentales de los ciclos de vida de las plantas?

- Las plantas participan en el sexo
- La alternancia de generaciones es evidente en los helechos y los musgos

43.2 ¿Cómo se adapta la reproducción en las plantas con semilla a los ambientes secos?

43.3 ¿Cuál es la función y la estructura de las flores?

- La mayoría de las flores atraen a los animales que las polinizan
- Guardián de la salud:** ¿Eres alérgico al polen?
- Las flores son las estructuras reproductoras de las angiospermas
- Las flores completas tienen cuatro partes principales
- El polen contiene el gametofito masculino
- El gametofito femenino se forma dentro del óvulo del ovario
- La polinización de la flor permite la fecundación

43.4 ¿Cómo se desarrollan los frutos y las semillas?

- El fruto se desarrolla a partir del ovario
- La semilla se desarrolla a partir del óvulo

Guardián de la Tierra: Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados

43.5 ¿Cómo germinan y crecen las semillas?

- El estado de latencia de las semillas ayuda a asegurar la germinación en el momento apropiado
- En la germinación, la raíz surge primero, seguida del vástago
- Los cotiledones nutren a la semilla germinada

43.6 ¿Cuáles son algunas adaptaciones para la polinización y la dispersión de semillas?

- La coevolución pone en contacto a plantas y polinizadores
- Los frutos ayudan a dispersar las semillas

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Hermoso? Sí, pero ¿caliente?



ESTUDIO DE CASO ¿HERMOSO? SÍ, PERO ¿CALIENTE?

ROGER SEYMOUR, investigador de la Universidad de Adelaide, Australia, recuerda que vio por primera vez las “plantas calientes” cuando un amigo llevó una flor de filodendro (en realidad un denso racimo de pequeñas flores) a una fiesta donde todos los asistentes notaron su parecido con la forma y calidez de una mama. En la década de 1970 Seymour y sus colaboradores reportaron que, al igual que una mama, las flores del árbol de filodendro mantienen una temperatura relativamente constante de unos 35°C, incluso en medio de temperaturas de congelamiento. De hecho, sus enormes flores generan cinco veces más calor que una mama de un tamaño similar. Recientemente, luego de introducir un termómetro del grueso de un cabello en flores de loto sagrado de Asia (*Nelumbo nucifera*, FIGURA 43-1), Seymour descubrió que éstas también mantienen una temperatura de unos 32°C, incluso cuando la temperatura en el exterior ronda los 40°C. Las flores cálidas se conocen desde hace 200 años, cuando el naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck describió por primera vez las flores pertenecientes a la fa-

milia Arum, que se calientan a sí mismas. Este grupo incluye la flor con el apropiado nombre de “caballo muerto”, cuya calidez dispersa su olor de carne en descomposición. El olor fétido atrae a las moscas azules, que con gran entusiasmo entran en las flores, al confundirlas con carne descompuesta a la que consideran un manjar. La cálida flor de la col fétida del Oriente (*Symplocarpus foetidus*), otro miembro de la familia Arum, en ocasiones florece dentro de bancos de nieve, donde su calor forma pequeños huecos (véase la figura 43-18). Una de las flores más espectaculares del mundo, la “flor cadáver” (también de la familia Arum), llega a medir hasta tres metros de altura. Irradia calor y un olor fétido que atrae a los escarabajos carroñeros de su nativa Sumatra. En Estados Unidos, donde sólo ha florecido una docena de estos ejemplares, las flores cadáver atraen a miles de visitantes (véase la fotografía al inicio del capítulo). Uno de tales ejemplares prosperó en el invernadero de la Universidad de Washington, donde el administrador, Douglas Ewing, logró cultivar esta increíble planta a partir de una semilla.

El olor fétido —dijo entusiasmado como si fuera un padre debutante— “significa que está haciendo lo que le resulta natural, y espero que continúe así hasta sacarnos de aquí”. ¿Por qué algunas flores imitan la apariencia y la calidez de un cuerpo en descomposición?



FIGURA 43-1 Flor de loto sagrado de Asia

43.1 ¿CUÁLES SON LAS CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LOS CICLOS DE VIDA DE LAS PLANTAS?

Las plantas participan en el sexo

Muchas plantas se pueden reproducir de forma sexual o asexual. En la reproducción asexual, una parte de una planta (por ejemplo, un tallo) da origen a una nueva planta mediante la división celular por mitosis. La descendencia resultante de la reproducción asexual es genéticamente idéntica al progenitor. En el capítulo 42 se mencionaron varios métodos de reproducción asexual, como los estolones de las fresas, los bulbos de los narcisos y los rizomas de los lirios. La reproducción asexual suele ser muy eficaz y permite a las plantas colonizar toda una zona en la que la planta original encontró condiciones óptimas.

No obstante, si la descendencia es genéticamente idéntica a la progenitora, estará tan bien adaptada al ambiente como ella. ¿Y si el entorno cambia? Casi toda la descendencia pro-

ducida sexualmente combina genes de ambos progenitores y, por consiguiente, tiene rasgos que difieren de los que caracterizan a éstos. La nueva combinación de características podría ayudar a la descendencia a enfrentar entornos cambiantes o a sobrevivir en lugares ligeramente distintos. Por ello, casi todos los organismos, entre ellos las plantas, se reproducen sexualmente, al menos una parte del tiempo.

Ahora que ya estás familiarizado con el fenómeno de reproducción sexual en los animales, ¿cómo se compara la reproducción de las plantas? Durante el ciclo de vida animal, los individuos con células diploides ($2n$) producen gametos haploides (n) (espermatozoides u óvulos) mediante meiosis (seguida de división citoplásmica). Los núcleos de los gametos (un espermatozoide y un óvulo) se fusionan para formar una nueva célula diploide (el cigoto) que, al desarrollarse, se convierte en el organismo adulto mediante continuas divisiones celulares por mitosis (seguidas de división citoplásmica). Sin embargo, el ciclo de vida de las plantas es un poco más complejo. Las plantas tienen dos formas multicelulares distintas, una diploide y una haploide, que dan origen una a la otra.

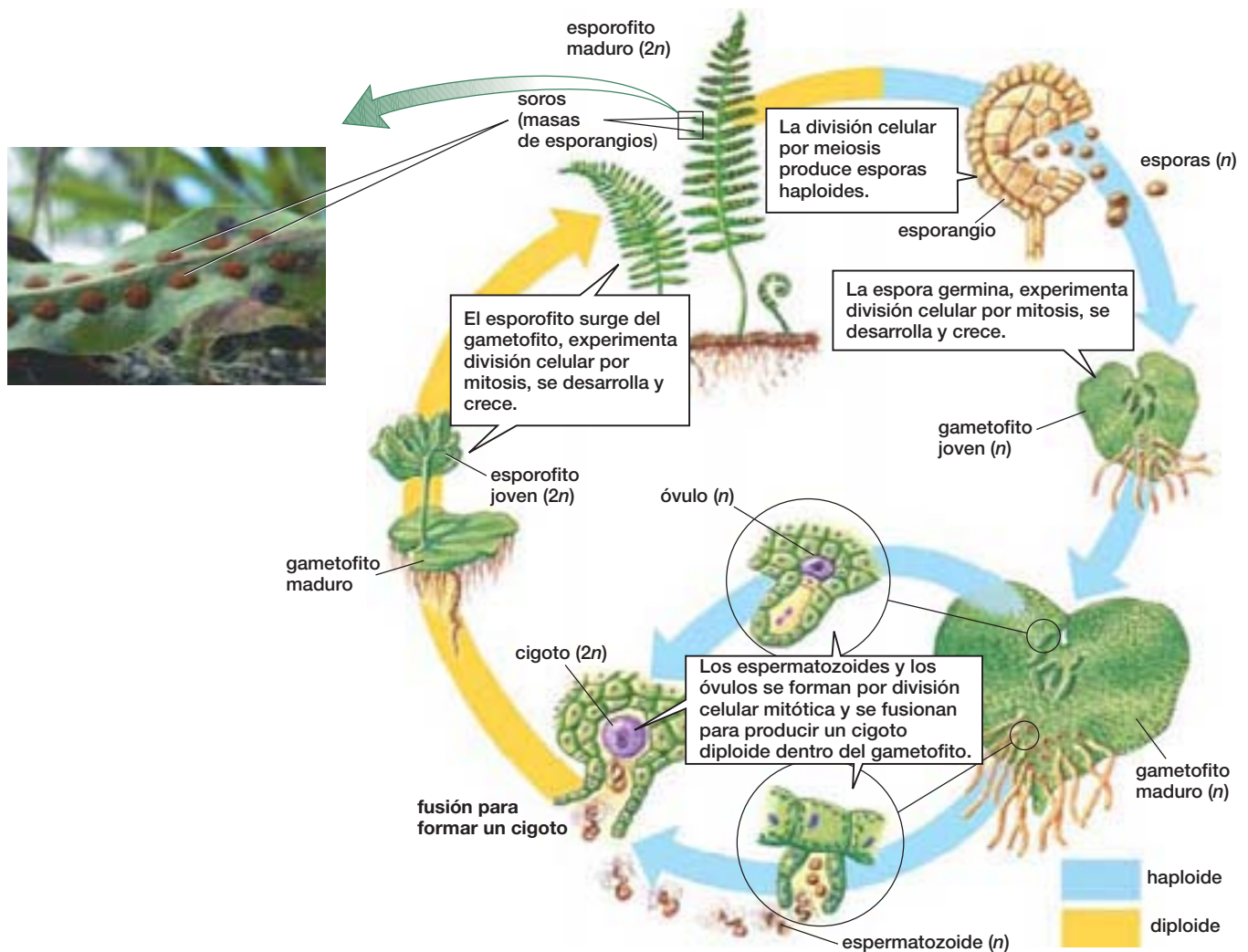


FIGURA 43-2 Ciclo de vida de un helecho: una planta sin flores

Los helechos ilustran el ciclo de vida de alternancia de generaciones que se observa en todas las plantas. Organismos multicelulares haploides y diploides distintos existen en diferentes partes del ciclo de vida. La letra n se refiere al estado haploide y $2n$, al estado diploide. Al encontrar un helecho, a menudo se distinguen cúmulos de esporangios de color café en el envés o cara inferior de las hojas (fotografía).

Por ello, decimos que el ciclo de vida de las plantas es una **alternancia de generaciones**: plantas diploides (llamadas *esporofitos*) se alternan con plantas haploides (llamadas *gametofitos*).

La alternancia de generaciones es evidente en los helechos y los musgos

La alternancia de generaciones se presenta en todas las plantas. En las plantas terrestres primitivas, entre ellas los musgos y los helechos, las generaciones que se alternan son fácilmente distinguibles porque el gametofito es una planta independiente. En los helechos es de menor tamaño que el esporofito, mientras que en los musgos el gametofito es mucho más grande (véase el capítulo 21, figura 21-4). Como vimos en el capítulo 21, estas plantas no producen flores. El gametofito libera espermatozoides móviles que llegan al óvulo, ya sea nadando a través de delgadas películas de agua que cubren a los gametofitos adyacentes, o bien, luego de ser lanzados junto con gotas de lluvia de una planta a la siguiente. Por esa razón, los helechos y los musgos sólo pueden reproducirse en medios húmedos.

Para ilustrar la alternancia de generaciones, examinemos el ciclo de vida de un helecho, partiendo de la forma diploide adulta (**FIGURA 43-2**). Esta etapa del ciclo de vida, el **esporofito** (“planta de esporas”, en griego) produce células reproductoras, las cuales se dividen por meiosis para producir células haploides. Estas células reproductoras son **esporas**, no gametos. A diferencia de los gametos, las esporas no se fusionan para formar una célula diploide. Más bien, la espora es transportada hacia el suelo por el viento o el agua. Ahí, la espora **germina** (comienza a crecer y desarrollarse), dividiéndose una y otra vez por mitosis hasta formar un organismo multicelular haploide. Este organismo produce gametos, por lo que se le llama **gametofito** (“planta de gametos”, en griego). Puesto que sus células son haploides, el gametofito puede producir espermatozoides y óvulos sin necesidad de meiosis. Por lo regular, un solo gametofito produce tanto espermatozoides como óvulos, pero suele hacerlo en épocas diferentes, con lo que se evita la autofecundación. Los espermatozoides y los óvulos se fusionan para formar un **cigoto** que, al desarrollarse, produce una nueva planta esporofita diploide.

43.2 ¿CÓMO SE ADAPTA LA REPRODUCCIÓN EN LAS PLANTAS CON SEMILLA A LOS AMBIENTES SECOS?

Muchos ambientes terrestres son relativamente secos, de manera que los espermatozoides no tienen oportunidad de nadar hacia los óvulos. El espermatozoide, el óvulo, el cigoto que se forma cuando se unen y el embrión que se desarrolla a partir del cigoto deben mantenerse húmedos para sobrevivir. Las plantas con semilla (tanto las que tienen flores como las que carecen de ellas) han tenido éxito en colonizar los medios terrestres secos. Durante la evolución, sus gametofitos masculinos y femeninos se volvieron de tamaño microscópico. Un gametofito masculino rodeado por un recubrimiento protector se llama **grano de polen**



FIGURA 43-3 Las coníferas se polinizan gracias al viento

Hasta las brisas más suaves sacan espesas nubes de polen de los conos masculinos maduros. Esos “conos blandos” pueden verse en racimos cerca de las puntas de las ramas de los pinos, piceas y abetos, sobre todo a fines de la primavera. Los conos se desintegran después de soltar su polen. Los conos leñosos y más grandes son femeninos; producen semillas en la base de cada escama. **PREGUNTA:** En comparación con las plantas con flor polinizadas por los animales, ¿de qué ventajas gozan las plantas polinizadas por el viento? ¿Qué desventajas enfrentan?

te al óvulo, como se describirá más adelante. El óvulo fecundado queda envuelto en una semilla resistente a la sequía. La **semilla**, que incluye una planta embrionaria y una reserva alimenticia dentro de una cubierta protectora externa, podría mantenerse en estado de latencia (o reposo) durante meses o años, en espera de condiciones favorables para su germinación y crecimiento.

Las primeras plantas de semilla fueron las gimnospermas, representadas en la actualidad principalmente por las coníferas, grupo que incluye a los pinos, abetos y piceas. Como vimos en el capítulo 21, las coníferas no producen flores; en vez de ello, llevan gametofitos masculinos y femeninos en distintas estructuras reproductoras, llamadas *conos*. A principios de la primavera, los pequeños conos masculinos sueltan millones de granos de polen que son transportados grandes distancias por el viento (**FIGURA 43-3**). Hay tantos granos flotando en el aire que algunos entran, al azar, en las cámaras del polen situadas en las escamas de los conos femeninos, donde son capturados por recubrimientos pegajosos de azúcares y resinas. Luego, de los granos de polen salen estructuras tubulares que forman un túnel hasta los gametofitos femeninos que están en la base de cada una de las *escamas* (las placas leñosas que forman el cono). Los espermatozoides viajan a través de los tubos de polen y fecundan a los óvulos dentro del gametofito femenino, para formar un cigoto diploide del cual nace una nueva generación. El ciclo de vida de una conífera (un pino) se ilustra en la figura 21-9 del capítulo 21.

43.3 ¿CUÁL ES LA FUNCIÓN Y LA ESTRUCTURA DE LAS FLORES?

La mayoría de las flores atraen a los animales que las polinizan

GUARDIÁN DE LA SALUD

¿Eres alérgico al polen?

La polinización por el viento tiene éxito sólo si las plantas liberan enormes cantidades de polen al aire. Por desgracia para quienes sufren de alergias, es fácil inhalar estos gametofitos masculinos microscópicos. Las proteínas en el recubrimiento del polen activan los sistemas inmunitarios de individuos sensibles, lo que les provoca ojos irritados y llorosos, flujo nasal, ardor en la garganta, tos y estornudos. Si eres de estas infortunadas personas, tu sistema inmunitario provoca todos estos síntomas en un intento por librarte del inofensivo polen, al que confunde con organismos patógenos. La gente que padece "fiebre del heno", por lo general, es sensible sólo a tipos específicos de polen. En climas templados, durante la primavera, se manifiestan las alergias al polen de los árboles, mientras que durante el verano se hacen presentes las alergias provocadas por los pas-



FIGURA E43-1 Las insignificantes flores de las ambrosías y sus granos de polen

tos. Sin embargo, en Estados Unidos la principal causa de la fiebre del heno no es el heno, sino las ambrosías, flores que liberan su polen al final del verano y durante el otoño (**FIGURA E43-1**). Las flores de las ambrosías, al igual que las de la mayoría de las plantas que se polinizan con la ayuda del viento, pasan inadvertidas porque no están adaptadas para atraer a los animales polinizadores. Una sola planta puede liberar hasta un millón de granos de polen al día; se estima que, en conjunto, las ambrosías liberan 100 millones de toneladas de polen en Estados Unidos cada año. Se ha encontrado polen de ambrosías a más de 600 kilómetros mar adentro y también en la atmósfera, a distancias tan altas como 3 kilómetros. El pequeño tamaño y las grandes cantidades de los granos de polen de las ambrosías, así como el tipo de proteínas en su cubierta protectora, hacen de ellos una amenaza importante para quienes sufren de alergias.

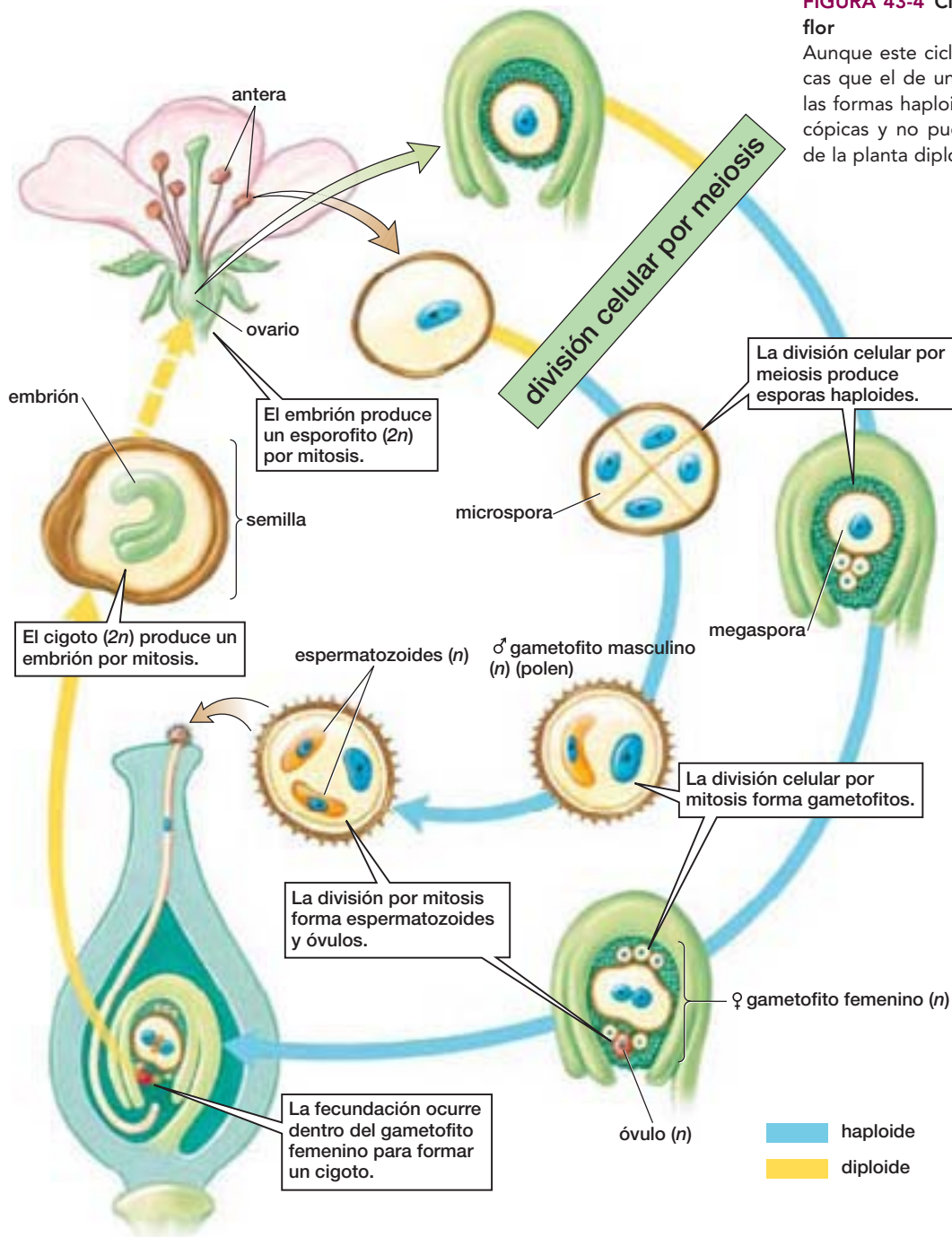
Las plantas polinizadas por las abejas y otros animales rara vez provocan alergias, porque sus granos de polen son pegajosos y se producen en pequeñas cantidades. Con frecuencia se ha hecho responsable a la planta llamada vara de San José, que es de un color amarillo intenso y florece durante la misma temporada que las ambrosías, de las alergias que en realidad provoca el polen de estas últimas. De hecho, las flores amarillas de la vara de San José atraen a las abejas y mariposas que sirven de polinizadores, y casi todas las personas pueden disfrutar de ellas sin sufrir molestias (**FIGURA E43-2**).



FIGURA E43-2 La vara de San José

voreados de polen por todo el cuerpo. Si el mismo escarabajo visitaba una planta y come polen y luego se dirigía a otra planta de la misma especie para tomar secreciones azucaradas de los conos femeninos, es muy probable que un poco del polen suelto se embarrara en el cono femenino. De esta forma, el escenario estuvo listo para la evolución de las plantas con flores.

Para que la polinización por insectos sea eficiente, es necesario que un mismo insecto visite varias plantas de la misma especie y las polinice en su camino. Para las plantas, dos adaptaciones clave eran necesarias. Primera, se debía producir suficiente polen o néctar (un líquido azucarado) dentro de las estructuras reproductoras para que los insectos las visitaran con regularidad en busca de alimento. Segunda, había que anunciar a los insectos la ubicación y riqueza de estas fuentes de polen y néctar, tanto para indicarles a dónde ir como para animarlos a especializarse en esa especie de planta en particular. Cualquier mutación que contribuyera a tales adaptaciones mejoraría el éxito reproductivo de la planta y la selección natural la favorecería. Hace unos 130 millones de años, la evolución produjo flores precisamente con esas adaptaciones. Las ventajas de las flores son tan grandes que las plantas con flor o *angiospermas*, dominan en las zonas *templadas*



flores son polinizadas por animales como abejas, polillas, mariposas, colibríes, algunos mamíferos y escarabajos (como se describe en el estudio de caso). Aunque las flores no evolucionaron para atraer a la gente, por razones aún desconocidas a menudo respondemos con placer a sus aromas, formas y colores.

Las flores son las estructuras reproductoras de las angiospermas

Las **flores** son las estructuras reproductoras de las angiospermas, producidas por la generación esporofita. Dentro de las flores se forman dos tipos de esporas por división celular meiótica (**FIGURA 43-4**

tan una existencia independiente. El tipo más grande de espora, la *megaspóra* (en griego, “mega” significa grande), experimenta unas cuantas divisiones por mitosis y se desarrolla como el gametofito femenino, un pequeño cúmulo de células conservadas de manera permanente dentro de la flor. El otro tipo de espora, la *microspóra*

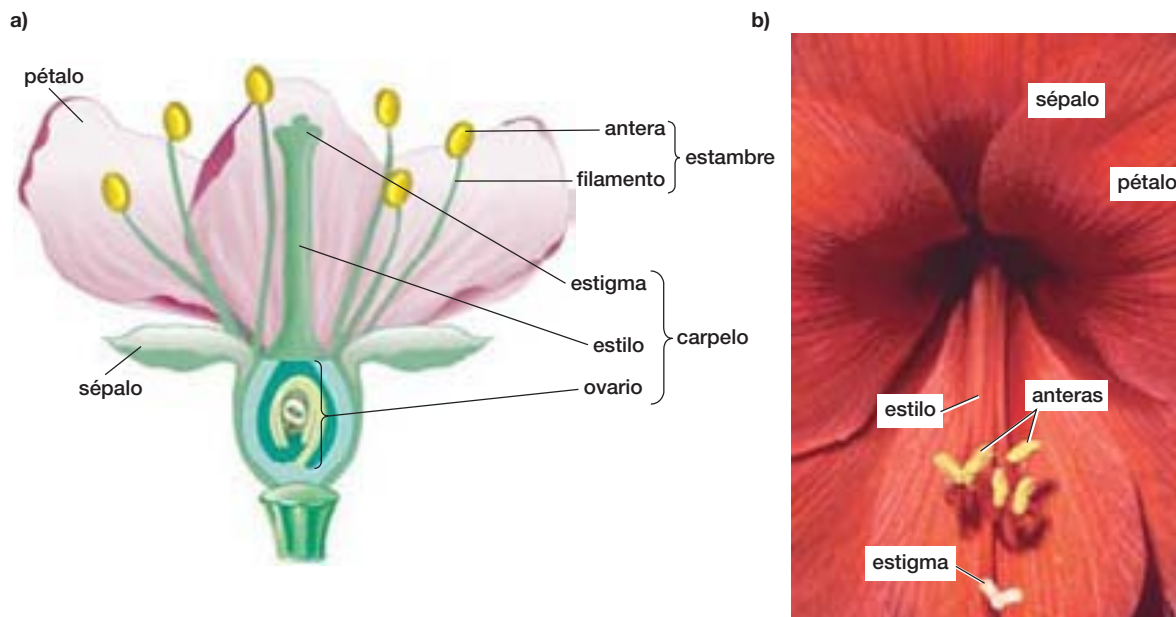


FIGURA 43-5 Una flor completa

Una flor completa tiene cuatro partes: sépalos, pétalos, estambres (las estructuras reproductoras masculinas) y por lo menos un carpelo (la estructura reproductora femenina). Este dibujo muestra una flor completa de dicotiledónea. **b)** La azucena es una flor completa de monocotiledónea, con tres sépalos (prácticamente idénticos a los pétalos), tres pétalos, seis estambres y tres carpelos (fusionados en una sola estructura). Las anteras se encuentran en un nivel más bajo que el estigma, probablemente para evitar la autopolinización.

se encuentra en el interior. El espermatozoide baja por ese tubo y entra en el gametofito femenino, donde ocurre la fecundación. En los siguientes apartados exploraremos los detalles de la reproducción sexual en las plantas con flor.

Las flores completas tienen cuatro partes principales

La evolución suele producir nuevas estructuras, modificando estructuras anteriores; en realidad las partes de las flores son hojas muy modificadas, moldeadas por la mutación y la selección natural hasta adquirir una forma que promueve la polinización. Una **flor completa**, como las de las petunias, rosas y azucenas, consiste en un eje central al cual están unidos cuatro juegos sucesivos de hojas modificadas (**FIGURA 43-5**). Estas hojas modificadas forman los **sépalos**, **pétalos**, **estambres** y **carpelos**. Los **sépalos** están en la base de la flor. En las dicotiledóneas, los sépalos suelen ser verdes y tienen aspecto de hoja (figura 43-5a); en las monocotiledóneas, casi todos los sépalos se parecen a los pétalos (figura 43-5b). En ambos casos, los sépalos rodean y protegen al capullo de la flor mientras se desarrollan las otras tres estructuras. Justo arriba de los sépalos están los **pétalos**, que suelen tener colores brillantes y perfume para anunciar la ubicación de la flor.

Las estructuras reproductoras masculinas, los **estambres**, están sujetos inmediatamente arriba de los pétalos. Casi todos los estambres consisten en un **filamento** largo y delgado que sostiene una **antera**, la estructura que produce polen. Las estructuras reproductoras femeninas, los **carpelos**, ocupan la posición central en la flor. Un carpelo comúnmente tiene forma aproximada de jarrón, con un **estigma** pegajoso para atrapar polen montado sobre un **estilo** alargado. El estilo conecta al estigma con el **ovario**, que es bulboso (figura 43-5a). Dentro del ovario hay uno o más **óvulos**

que el ovario formará una envoltura protectora, adhesiva y/o comestible, el **fruto**.

Las **flores incompletas** carecen de una o más de las cuatro partes florales. Por ejemplo, las flores de los pastos (véase la figura 43-9) carecen tanto de pétalos como de sépalos. Otras flores incompletas carecen ya sea de los estambres masculinos o de los carpelos femeninos. En tales casos, las flores se consideran *imperfectas*, además de incompletas. Éste no es un juicio de valor; las especies de plantas con flores imperfectas subsisten con mucho éxito. Producen flores masculinas y femeninas por separado, algunas veces en la misma planta, como sucede con la familia de las calabazas, en especial con las calabacitas (**FIGURA 43-6**), o con la “flor cadáver” y el filodendro. Estas dos últimas flores contienen una estructura central alargada, llamada *espádice*, que aloja muchas flores pequeñas masculinas y femeninas. Otras plantas con flores imperfectas generan flores masculinas y femeninas en plantas separadas. Un ejemplo es el acebo americano, cuyas bayas de color rojo se producen sólo en las plantas femeninas.

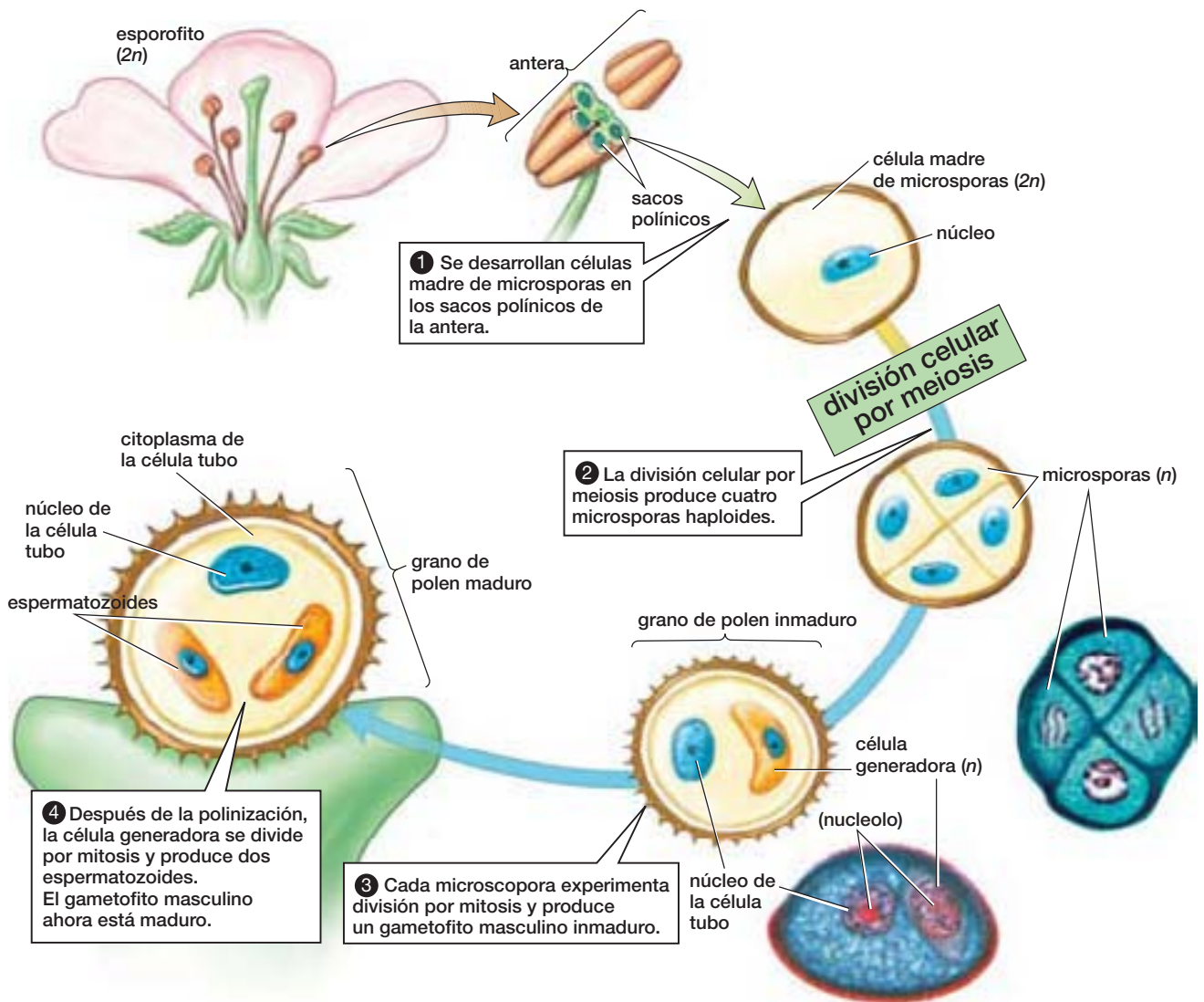
El polen contiene el gametofito masculino

El polen se desarrolla dentro de la antera de la planta esporofita. Cada antera consta de cuatro cámaras llamadas sacos polínicos (**FIGURA 43-7**). Dentro de cada saco se desarrollan de cientos a miles de **células madre de microsporas**, que son diploides. Cada una de esas células se divide por meiosis (descrita en el capítulo 11) para producir cuatro **microsporas** haploides. Cada microspora se divide una vez, por mitosis, para producir un gametofito masculino haploide. En muchas especies, el gametofito masculino inmaduro consta de sólo dos células: una **célula tubo** grande y una **célula generadora**



FIGURA 43-6 Flores masculinas y femeninas

Las plantas de la familia de las calabazas, como las calabacitas, producen flores femeninas (izquierda) y masculinas (derecha) distintas. Cada planta produce inicialmente sólo flores masculinas, con lo cual se garantiza cierta polinización cruzada entre plantas que florecen de manera ligeramente desfasada. Las calabacitas sólo son producidas por las flores femeninas. **PREGUNTA:** En las especies con flores masculinas y femeninas separadas, pero en la misma planta, ¿por qué la selección natural favorece a los individuos cuyas flores masculinas y femeninas florecen en diferentes momentos?



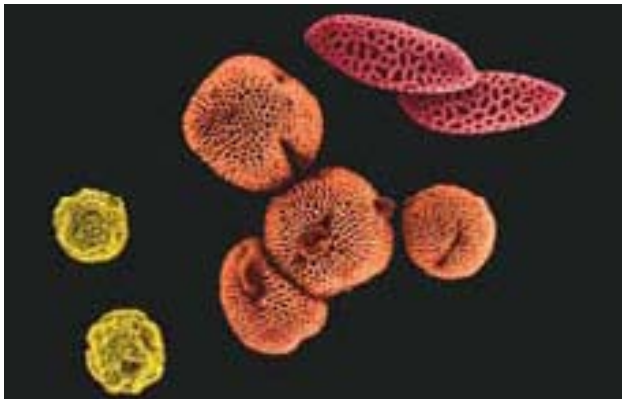


FIGURA 43-8 Granos de polen

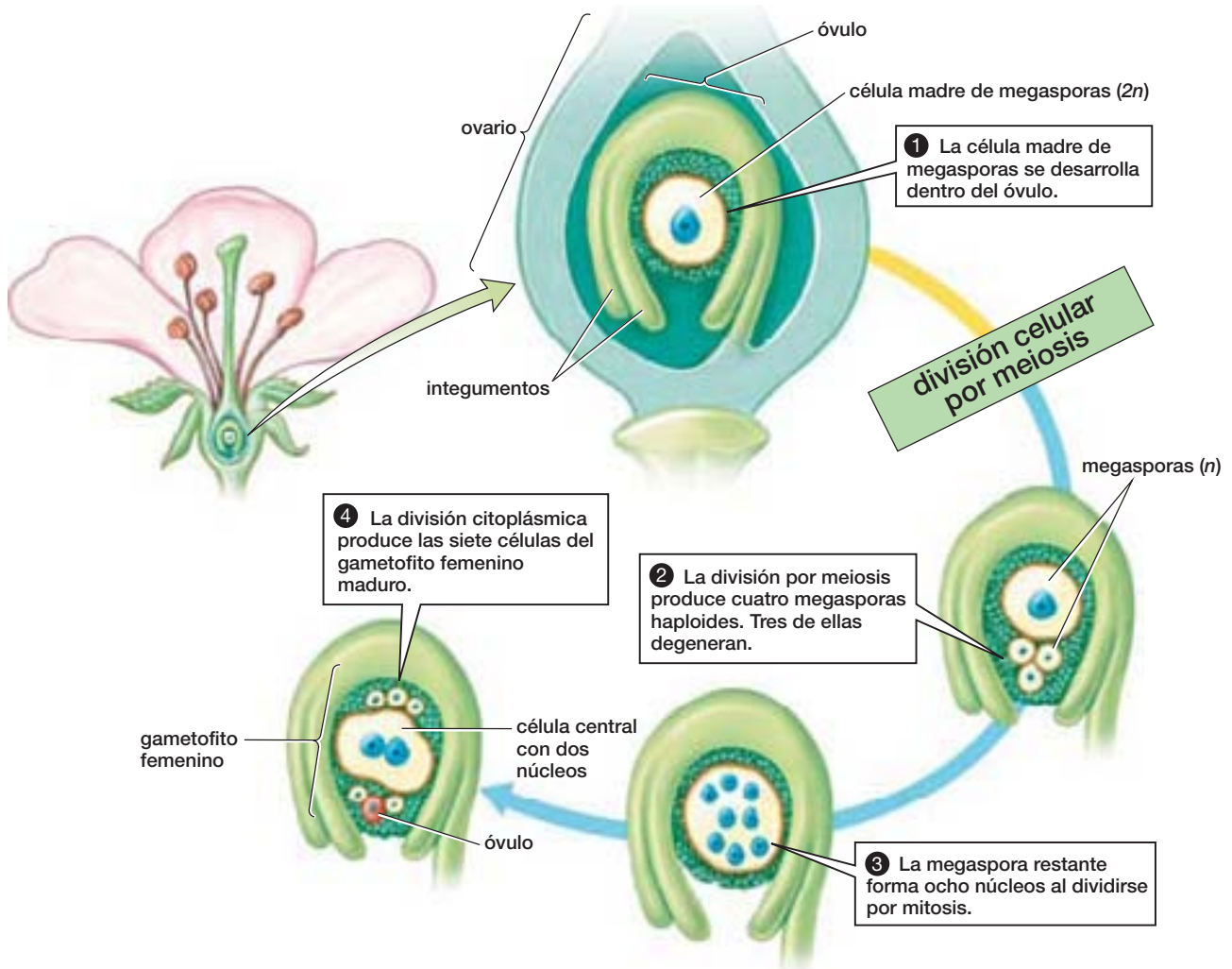
La resistente cubierta exterior de muchos granos de polen adopta complejas formas y patrones que son específicos para cada especie. Los granos de color intensificado de esta fotografía por microscopio electrónico de barrido son de un geranio (anaranjados), una azucena tigre (rojo) y un diente de león (amarillo).



FIGURA 43-9 Flor polinizada por el viento

Las flores de los pastos y muchos árboles caducifolios son polinizados por el viento y tienen las anteras (estructuras amarillas que cuelgan bajo las flores) expuestas al aire. Los pétalos suelen ser muy pequeños, si acaso existen.

Conforme el grano de polen madura, la célula generadora se divide por mitosis para producir dos espermatozoides haploides (figura 43-7). Se desarrolla una cubierta resistente en torno al grano de polen, a menudo con un patrón de cavidades y protuberancias características de cada especie vegetal (**FIGU-**



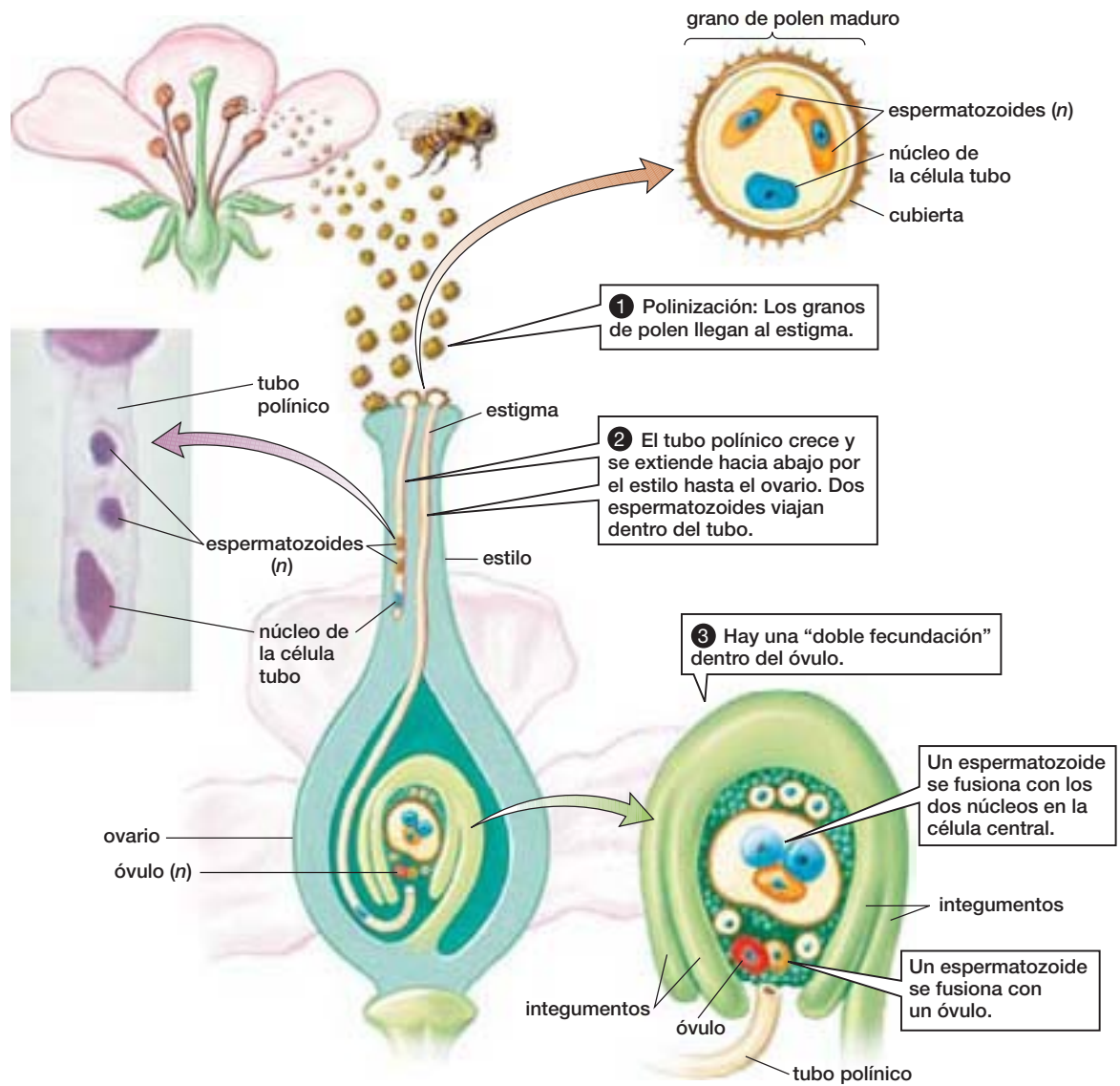


FIGURA 43-11 Polinización y fecundación de una flor

RA 43-8). Esta cubierta protege a las células del interior durante su viaje, algunas veces largo, hacia el carpelo. El gametofito masculino y su cubierta protectora, en conjunto, forman el grano de polen.

Una vez que ha madurado el polen, los sacos polínicos de la antera se abren. En las flores polinizadas por el viento, como las de los pastos (**FIGURA 43-9**) y los robles, los granos de polen se derraman y las corrientes de aire los dispersan ampliamente. Unos cuantos de esos granos llegan a otras flores de la misma especie y las polinizan. En las flores polinizadas por animales, el polen se adhiere débilmente a la caja de la antera hasta que pasa por ahí el polinizador y los recoge o se le adhieren.

El gametofito femenino se forma dentro del óvulo del ovario

En un ovario, masas de células se diferencian para formar óvulos. Cada óvulo joven consiste en capas exteriores de células protectoras llamadas **integumentos**, los cuales rodean a una sola **célula madre de megasporas** diploide (**FIGURA 43-10**). Esa célula grande produce el gametofito femenino. Primero se divide por meiosis una vez y produce cuatro **megasporas**

haploides grandes. Tres megasporas sufren degeneración y una sobrevive. El núcleo de esta megaspora se divide por mitosis tres veces para producir ocho núcleos haploides. Luego, las membranas plasmáticas dividen el citoplasma en siete células (no ocho). Hay tres células pequeñas en cada extremo, cada una de las cuales contiene un núcleo, y una célula grande en medio que contiene dos núcleos. Este organismo de siete células es el gametofito femenino haploide. El **óvulo** es una de las tres células en el extremo inferior, cerca de la abertura o poro de los integumentos del óvulo (figura 43-10).

La polinización de la flor permite la fecundación

Si bien la *polinización* es necesaria para la *fecundación*, estos fenómenos son diferentes. La **polinización** ocurre cuando un grano de polen llega al estigma de una flor perteneciente a la misma especie de planta, lo que desencadena una extraordinaria serie de acontecimientos (**FIGURA 43-11**). El grano de polen absorbe agua del estigma. La célula generadora se divide por mitosis para formar dos espermatozoides. Mientras tanto, la célula tubo se alarga, penetra en el estilo y forma un tubo que conducirá a los espermatozoides hasta el óvulo dentro del ovario.

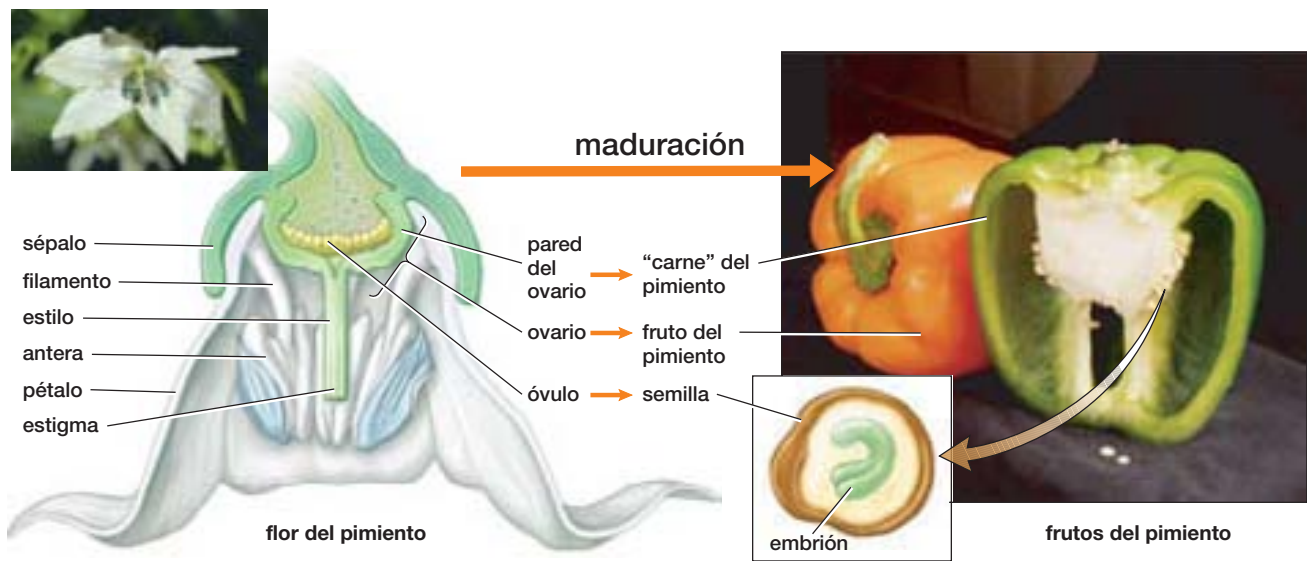


FIGURA 43-12 Desarrollo del fruto y las semillas en un pimiento

Los frutos y las semillas se desarrollan de las partes de la flor. La pared del ovario madura para convertirse en la “carne” del pimiento. Cada ovario alberga muchos óvulos, los cuales se desarrollan en semillas. El cigoto dentro de cada semilla se desarrolla en el embrión.

Si todo sale bien, el tubo polínico llegará al poro del integumento de un óvulo y penetrará en el gametofito femenino. La punta del tubo se rompe y libera los dos espermatozoides. Uno de ellos se une con el óvulo, un proceso llamado **fecundación**, para formar el cigoto diploide que, al desarrollarse, producirá el embrión y finalmente un nuevo esporofito. El segundo espermatozoide entra en la célula central grande y su núcleo se fusiona con los dos núcleos ya existentes, para formar un **núcleo triploide** (con tres juegos de cromosomas). Después de varias divisiones por mitosis, esta célula dará origen al **endospermo** triploide ($3n$), un tejido que almacena alimento dentro de la semilla. La fusión del óvulo con un espermatozoide y de los dos núcleos centrales con el segundo espermatozoide se conoce como **doble fecundación**, un proceso que es exclusivo de las plantas con flor. Las otras cinco células del gametofito femenino sufren degeneración poco después de la fecundación.

43.4 ¿CÓMO SE DESARROLLAN LOS FRUTOS Y LAS SEMILLAS?

Aprovechando los recursos de la planta progenitora, el gameto femenino y los integumentos que rodean al óvulo se desarrollan para producir una semilla. La semilla está rodeada por el ovario, que se desarrolla para formar un fruto (**FIGURA 43-12**). Luego de cumplir con su misión de atraer polinizadores y producir polen, los pétalos y los estambres se marchitan y caen a medida que el fruto crece.

El fruto se desarrolla a partir del ovario

Cuando comemos un fruto, estamos consumiendo el ovario maduro de una planta (en ocasiones acompañado por otras partes de la flor). Los alimentos que comúnmente llamamos frutos (manzanas, bayas, duraznos, naranjas, plátanos) por lo general son dulces y jugosos, pero muchos de los que conocemos como “verduras”, como aguacates, calabacitas, tomates y pimientos (véase la figura 43-12), en realidad son frutos. También es posible que los frutos tengan cubiertas duras, rasposas

o incluso con alas o con púas. Las diversas formas, colores y texturas de los frutos sirven para la misma función; ayudan a dispersar las semillas lejos de la planta progenitora, en muchos casos sacando ventaja de la movilidad de los animales (véase “Guardián de la Tierra: Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados”). Por ejemplo, los abrojos que se adhieren a tus calcetines cuando caminas por un campo en el otoño probablemente sean frutos especializados que te solicitan dispersar sus semillas.

La semilla se desarrolla a partir del óvulo

Dentro del óvulo ocurren dos procesos de desarrollo distintos para producir la semilla (**FIGURA 43-13**). Primero, la célula central triploide se divide rápidamente. Sus células hijas absorben nutrimentos de la planta progenitora y forman un endospermo lleno de alimento. Segundo, el cigoto se convierte en el embrión (figura 43-13a, b), mientras las otras cinco células del gametofito femenino degeneran. Tanto en las monocotiledóneas como en las dicotiledóneas, el embrión consta de una raíz y un vástago embrionarios (figura 43-13c). La porción del vástago incluye uno o dos **cotiledones**, u hojas de semilla, que absorben las moléculas de alimento del endospermo y las transfieren a otras partes del embrión. Cuando comemos chícharos, frijoles, maíz, arroz o trigo, nos beneficiamos del alimento que estas plantas almacenaron en las semillas para sus propios embriones. Mientras tanto, las cubiertas exteriores o integumentos del óvulo aumentan de grosor, se endurecen y se convierten en el **tegumento de la semilla** que rodea y protege esta última.

En las monocotiledóneas (término que significa “un cotiledón”), por lo regular, el cotiledón absorbe parte del endospermo durante el desarrollo de la semilla, pero la mayor parte del endospermo se conserva en la semilla madura para utilizarse directamente en la plántula germinada, como se ilustra con un grano de maíz en la **FIGURA 43-14a**. Los cereales como el arroz, la cebada y el trigo son monocotiledóneas. En el caso del trigo, molem el endospermo para producir harina y a veces consumimos el embrión de la semilla como “germen de trigo”.

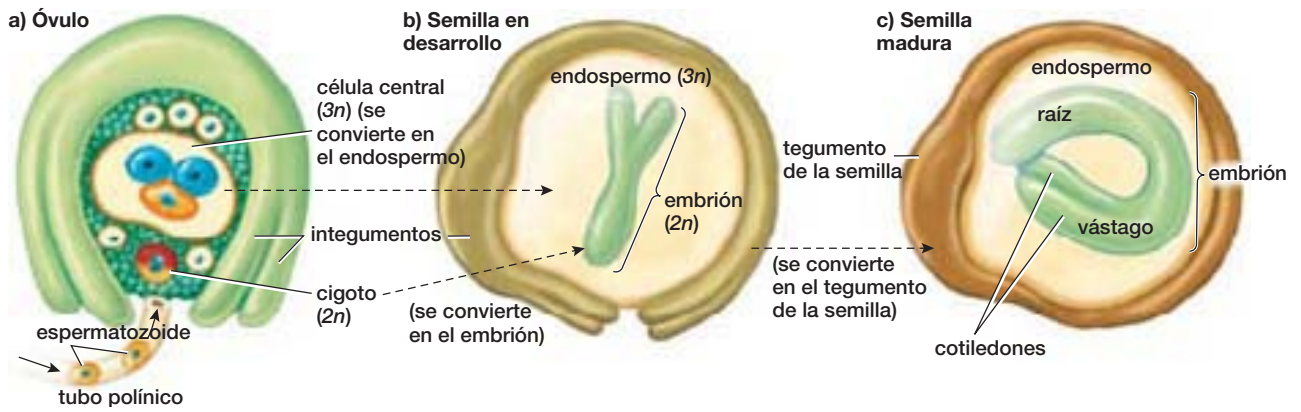


FIGURA 43-13 Desarrollo de la semilla

a) El desarrollo de la semilla comienza después de que un espermatozoide se fusiona con el óvulo para formar un cigoto diploide y luego de que el segundo espermatozoide se une con la célula central. **b)** El endospermo se desarrolla a partir de la célula central triploide, la cual se divide varias veces por mitosis conforme absorbe nutrientes de la planta progenitora. Luego se desarrolla el embrión, absorbiendo nutrientes del endospermo. **c)** Los dos cotiledones de las dicotiledóneas (como este pimienta) absorbe endospermo a medida que la semilla se desarrolla.

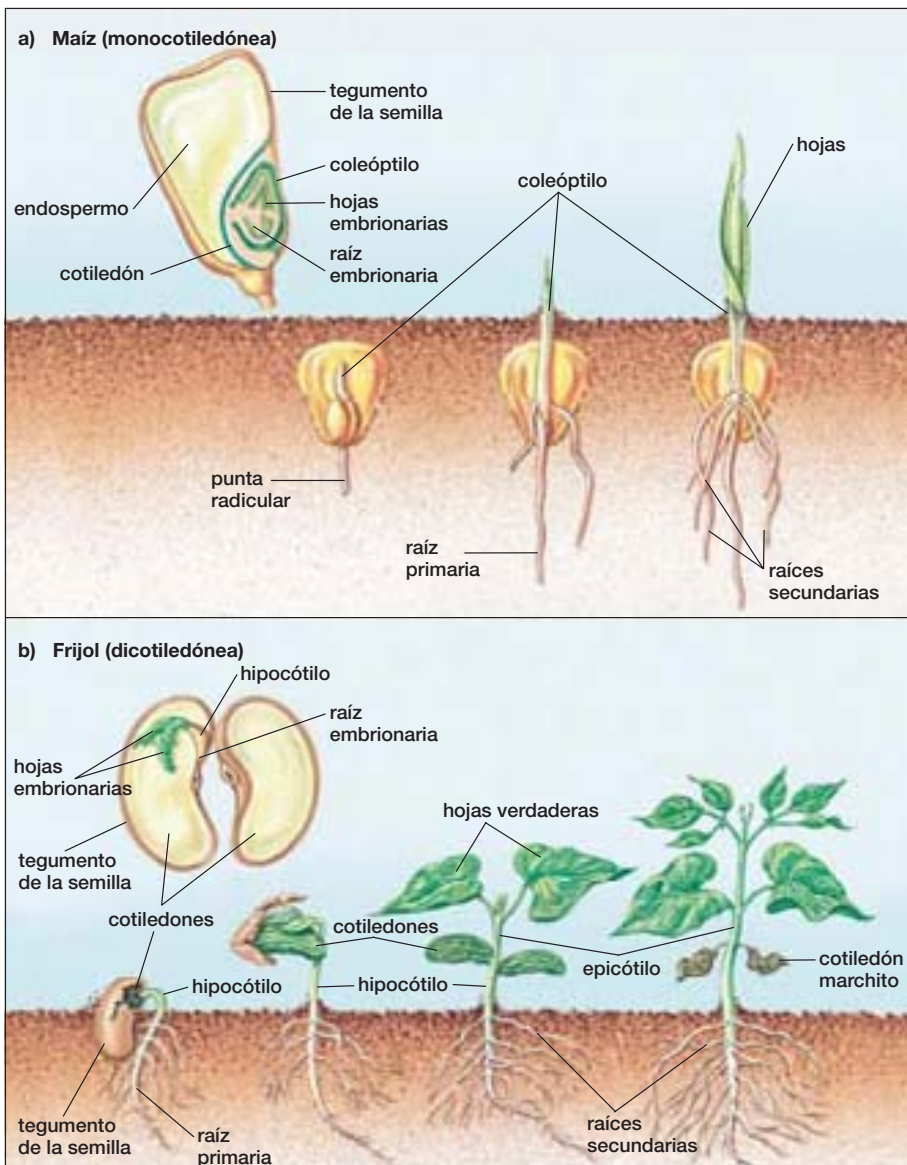


FIGURA 43-14 Germinación de las semillas

Primero, la raíz crece rápidamente absorbiendo agua y nutrientes. **a)** En las monocotiledóneas, como el maíz, la punta del vástago está protegida dentro de un coleótilo resistente. **b)** En las dicotiledóneas, como el frijol, el hipocótilo (ilustrado) o el epicótilo forman una curvatura que sale primero del suelo, protegiendo la punta del vástago.

GUARDIÁN DE LA TIERRA

Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados

Las plantas con flor dominan los ecosistemas terrestres en gran medida gracias a las relaciones mutuamente benéficas que han establecido con los animales que polinizan sus flores y dispersan sus semillas. Dentro de ecosistemas complejos, estas relaciones mutuamente benéficas sostienen a las poblaciones tanto de plantas como de animales y, en última instancia, al ecosistema mismo.

En la isla Mauricio, en el Océano Índico, el árbol calvaria, al igual que la mayoría de las plantas nativas de la isla, está en peligro de extinción. Los calvarias producen un fruto grande y comestible parecido a un durazno, con un hueso muy duro rodeado por pulpa. En la actualidad, los árboles que quedan producen frutos sanos que caen al suelo y rápidamente se pudren en el clima tropical. Las semillas del interior son muy susceptibles a las infecciones de hongos y bacterias, que la putrefacción del fruto promueve. Antes de la llegada del hombre, la isla era el hogar del dodó (FIGURA E43-3a). Los primeros marineros que llegaron no tenían dificultad para capturar a los grandes y lentos dodós, y para 1681 la cacería había extinguido la especie. Otros animales nativos, como las tortugas de tierra gigantes, los loros de pico grande y el escinco gigante (un reptil de gran tamaño), también se extinguieron cuando los seres humanos introdujeron monos, cerdos, venados y varios tipos de plantas en la isla Mauricio. Todos estos factores amenazaron a los calvarias. Los científicos creen que algunos de esos animales desaparecidos comían el fruto del calvaria antes de que tuviera tiempo de pudrirse, con lo que las semillas se limpiaban perfectamente y quedaban protegidas contra el ataque de los hongos. Además, los animales dispersaban las semillas por toda la isla, garantizando que algunas de ellas llegaran a lugares favorables para la germinación.

En otro ejemplo, en la isla de Madagascar, frente a las costas de África, los investigadores han identificado más de 20 es-

pecies de árboles que dependen primordialmente de los lémures (primates arborícolas) para la disseminación de sus semillas. Pero una población humana que crece de forma acelerada está destruyendo los hábitat de los lémures, los cuales se están extinguiendo rápidamente. Donde desaparecen los lémures, también están desapareciendo esos árboles.

En muchos bosques tropicales, los murciélagos frugívoros son los más importantes agentes disseminadores de semillas (FIGURA E43-3b). Los murciélagos pueden volar más de 30 kilómetros en una noche y consumir hasta el doble de su peso en frutas cuyas semillas expulsan al defecar durante el vuelo. El biólogo Donald Thomas descubrió que después de pasar por el tracto digestivo de un murciélago, casi todas las semillas germinaron; en contraste, las semillas de la fruta que se plantaron directamente sólo tuvieron una proporción de germinación del 10 por ciento. Actualmente, en las selvas tropicales del sur de México, animales frugívoros que dispersan las semillas, como monos, tapires y venados, han sido objeto de una cacería excesiva, en tanto que los murciélagos que comen fruta están amenazados por la destrucción del hábitat en aras de obtener tierras para la agricultura. Las frutas tropicales se están pudriendo en el suelo de la selva o produciendo vástagos destinados a morir bajo la sombra de sus progenitores; la disseminación se ha reducido drásticamente. Según Alejandro Estrada, investigador de la Universidad de México, "la supervivencia de los bosques tropicales, cuyos primates,... aves y murciélagos han sido víctimas de la cacería, es tan precaria como si los árboles hubieran sido talados y arrancados". La red de seres vivos interdependientes vinculados por interacciones forjadas a lo largo de milenios de coevolución es frágil y fácil de perturbar. Sólo si comprendemos y preservamos las complejas y cruciales interacciones entre plantas y animales tendremos esperanzas de conservar ecosistemas diversos y funcionales.



FIGURA E43-3 Los animales que disseminan las semillas son cruciales para algunos ecosistemas

a) El dodó y otros animales ahora extintos probablemente ayudaron a dispersar y promover la germinación de los árboles de calvaria en la isla Mauricio. Ahora los árboles están en grave peligro y casi nunca germinan en la selva. **b)** Un murciélago en Kenia come un higo maduro. Sin murciélagos y otros animales disseminadores de semillas, algunas comunidades de los bosques tropicales quizá no podrían sobrevivir.

En las dicotiledóneas (“dos cotiledones”), los cotiledones absorben la mayor parte del endospermo durante el desarrollo de las semillas, de manera que la semilla madura prácticamente se llena con el embrión, como se ilustra con la semilla de frijol en la **FIGURA 43-14b**. Si se retira el fino tegumento de un frijol o de un guisante, la parte interna puede dividirse fácilmente en dos mitades; cada una es un cotiledón.

43.5 ¿CÓMO GERMINAN Y CRECEN LAS SEMILLAS?

Todas las semillas necesitan calor y humedad para germinar, pero muchas semillas que recién han madurado no germinan de inmediato, aunque las condiciones sean ideales. En vez de ello, entran en un estado de **latencia** en el que su actividad metabólica se reduce, lo que les permite resistir condiciones ambientales adversas.

El estado de latencia de las semillas ayuda a asegurar la germinación en el momento apropiado

El estado de latencia de las semillas resuelve dos problemas. En primer lugar, evita que las semillas germinen dentro del fruto; en tal caso, la nueva planta podría ser consumida por un animal frugívoro o atacada por los hongos cuando el fruto está en descomposición. Además, si nacieran plántulas dentro de un fruto que contiene muchas semillas, crecerían en un cúmulo apretado, compitiendo entre sí por nutrimentos y luz. En segundo lugar, las condiciones ambientales que son adecuadas para el crecimiento de las plántulas (como humedad y temperatura apropiadas) podrían no coincidir con la maduración de las semillas. Por ejemplo, las semillas que maduran a fines del verano en *climas templados* (en latitudes medias donde hay cuatro estaciones marcadas) enfrentarán el frío invierno inminente. De esta forma, el invierno transcurre mientras las semillas se encuentran en estado latente, antes de que se originen los tiernos vástagos jóvenes. En las tibias y húmedas regiones tropicales, la latencia de las semillas es mucho menos común que en las regiones templadas porque las condiciones ambientales son apropiadas para la germinación durante todo el año.

Además de suficiente humedad y temperatura apropiada, muchas especies vegetales tienen requerimientos adicionales para la germinación de las semillas, los cuales están en fina sincronización con el ambiente nativo de cada planta y con los mecanismos utilizados para la dispersión. Los tres requisitos más comunes para poner fin al estado de latencia de las semillas son la desecación, la exposición al frío y la ruptura del tegumento de la semilla.

- **Desecación.** La desecación impide que la semilla germine mientras aún está en el fruto. Muchas semillas de este tipo son diseminadas por animales frugívoros, que no pueden digerir las semillas. Estas semillas son excretadas con las heces y quedan expuestas al aire, donde se secan. Luego, cuando los niveles de temperatura y humedad son favorables, las semillas germinan.
- **Frío.**

mente, ya que sucumbirían sin remedio durante el frío invierno. De esta manera, las semillas germinarán en la siguiente primavera.

- **Ruptura del tegumento de la semilla.** El tegumento mismo podría necesitar aclimatarse o ser digerido parcialmente antes de que la germinación ocurra; otros contienen sustancias que inhiben la germinación (como se describió en el capítulo 29). En los desiertos, por ejemplo, es común que transcurran años sin que haya suficiente agua para que las plantas completen su ciclo de vida. Los tegumentos de las semillas de muchas plantas desérticas tienen sustancias solubles en agua que inhiben la germinación. Sólo una lluvia intensa puede eliminar los inhibidores como para permitir que broten las plantas. Una semilla del loto sagrado de Asia (véase la figura 43-1), que fue encontrada en el lecho de un lago seco en China, germinó cuatro días después de que su tegumento se retiró. Una prueba de radiocarbono reveló que la semilla tenía unos 1300 años.

En la germinación, la raíz surge primero, seguida del vástago

Durante la germinación, el embrión absorbe agua, lo que hace que se hinche y rompa el tegumento. La raíz suele ser la primera estructura en salir del tegumento; crece con rapidez y absorbe agua y minerales del suelo. Conforme se hunde en la tierra, el meristemo apical en la punta de la raíz está protegido por una cofia (véase la figura 42-15 en el capítulo 42). Gran parte del agua se transporta hacia el vástago. Al alargarse sus células, el tallo empuja hacia arriba y sale del suelo en busca de luz.

El vástago embrionario generalmente consta de dos partes. Debajo de los cotiledones, pero por arriba de la raíz, se encuentra el **hipocótilo** (“hipo” significa debajo en griego); arriba de los cotiledones, el vástago se llama **epicótilo** (“epi” significa encima). En la punta del epicótilo se encuentra el meristemo apical del vástago; sus células hijas se diferenciarán después en distintos tipos de células del tallo, las hojas y las flores. En algunos embriones, una o dos hojas en desarrollo podrían comenzar a formarse.

Conforme se abre paso a través del suelo, el vástago en germinación debe proteger de la abrasión el meristemo apical y las tiernas hojas de la punta. En las monocotiledóneas, el **coleóptilo**, una vaina resistente, envuelve la punta del vástago como un guante (véase la figura 43-14a) haciendo a un lado las partículas del suelo conforme crece la punta. Una vez que sale al aire, el coleóptilo degenera para que pueda salir el vástago tierno. Las dicotiledóneas no tienen coleóptilo. En vez de ello, el vástago forma una curvatura en el hipocótilo o el epicótilo (véase la figura 43-14b). El codo de esta curvatura, cubierto por células epidérmicas con paredes celulares resistentes, abre camino en el suelo para el meristemo apical, que apunta hacia abajo, y sus tiernas hojas nuevas. Tan pronto como emerge, el vástago comienza a enderezarse orientando sus hojas hacia la radiación solar.

Los cotiledones nutren a la semilla germinada

El alimento almacenado en la semilla provee la energía para la germinación. Recordemos que los cotiledones de muchas dicotiledóneas absorben el endospermo durante el desarrollo de la semilla, por lo que se hinchan y se llenan de alimento.



FIGURA 43-15 Los cotiledones nutren a la planta en desarrollo. En las dicotiledóneas, como los frijoles y la familia de las calabazas, las hojas de semilla o cotiledones se expanden para realizar la fotosíntesis. La primera “hoja verdadera” se desarrolla un poco después. Finalmente, los cotiledones se marchitan y mueren.

En las dicotiledóneas con hipocótilo curvo, como los frijoles y los miembros de la familia de las calabazas, el vástago, al alargarse, saca los cotiledones del suelo. Estos cotiledones expuestos al aire suelen ponerse verdes, realizan la fotosíntesis y transfieren al vástago tanto el alimento almacenado como azúcares recién sintetizados (FIGURA 43-15). En las dicotiledóneas con epicótilo curvado, los cotiledones permanecen enterrados, marchitándose a medida que el embrión absorbe su alimento almacenado. Las monocotiledóneas (véase el caso del maíz en la figura 43-14a) conservan casi toda su reserva de alimento en el endospermo hasta la germinación, cuando el cotiledón la digiere y absorbe a medida que crece el embrión. El cotiledón permanece enterrado en el residuo de la semilla.

Una vez en el aire, el vástago extiende rápidamente sus hojas al Sol. De forma simultánea, el sistema de raíz penetra en el suelo. Las células del meristemo apical del vástago y la raíz se dividen para dar origen a las estructuras maduras descritas en el capítulo 42. Finalmente, la planta madura, florece y produce semillas, renovando así el ciclo de vida. La regulación de este ciclo —incluyendo por qué los vástagos crecen hacia arriba mientras las raíces crecen hacia abajo y por qué las plantas producen flores en la época adecuada del año— se describe en el capítulo 44.

43.6 ¿CUÁLES SON ALGUNAS ADAPTACIONES PARA LA POLINIZACIÓN Y LA DISPERSIÓN DE SEMILLAS?

La coevolución pone en contacto a plantas y polinizadores

En muchos casos, las plantas y sus polinizadores han coevolucionado, es decir, cada uno ha actuado como un agente de se-



visión humana

“visión de la abeja”

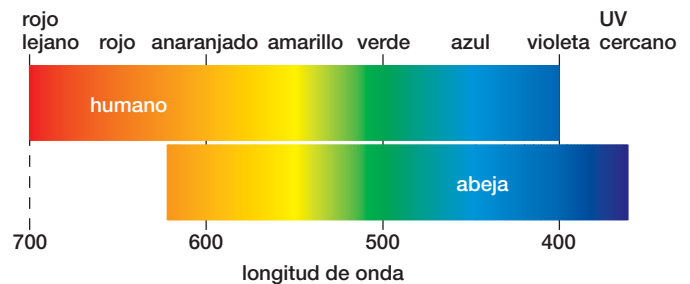


FIGURA 43-16 Patrones de luz ultravioleta guían a las abejas hacia el néctar

(Abajo) Los espectros de la visión del color para los humanos y las abejas se traslapan considerablemente, pero difieren en los extremos. Los seres humanos somos sensibles al rojo, que las abejas no perciben; las abejas pueden ver la luz ultravioleta, que es invisible para el ojo humano. (Arriba) Las flores fotografiadas bajo luz de día ordinaria (izquierda) y bajo luz UV (derecha) muestran notables diferencias en los patrones de color. Las abejas pueden ver patrones UV, que posiblemente las conducen a los centros llenos de néctar y polen de las flores.

lección natural sobre el otro. Las flores polinizadas por los animales deben atraer a polinizadores útiles y desalentar a los visitantes indeseables que podrían consumir el néctar o el polen sin contribuir a su fecundación. Por otra parte, los animales deben ser capaces de localizar e identificar a las plantas con valor nutritivo y extraer de ellas el néctar o el polen. Las flores polinizadas por animales pueden agruparse, a grandes rasgos, en tres categorías, dependiendo de los beneficios (reales o imaginarios) que ofrecen a los polinizadores en potencia. Así, esas flores ofrecen: alimento, sexo o un criadero. Como veremos, algunas plantas han evolucionado en formas que engañan a los insectos para que las polinicen sin gastar energía en brindarles alimento.

FIGURA 43-17 Un polinizador es “polinizado”

a) En las flores escoba escocesa, la abeja encuentra néctar en la unión de los pétalos superiores e inferiores. b) El peso de la abeja dobla los pétalos inferiores hacia abajo y hace que salgan estambres curvos cargados de polen que cubren el peludo dorso del insecto con polen. La abeja llevará el polen a otras flores escoba escocesa y dejará un poco en los estigmas listos para ser fecundados.

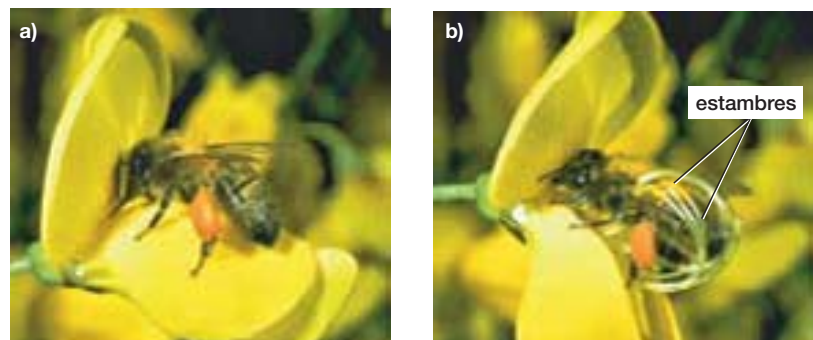




FIGURA 43-18 Una col fétida

Los insectos carroñeros son atraídos por el olor fétido emitido por las flores como esta col fétida del Oriente, cuya calidez derrite la nieve que hay alrededor.

Algunas flores proveen alimento a los polinizadores

Muchas flores ofrecen alimento a animales como escarabajos, abejas, polillas, mariposas y colibríes. A cambio, los animales reparten sin querer el polen de flor en flor. Podemos agradecer a las abejas la existencia de casi todas las flores de aroma agradable, porque los dulces olores “florales” atraen a estos polinizadores (las flores producen aromas en sus pétalos o en otras partes, dependiendo de la especie). Las abejas tienen buena visión del color, pero no ven exactamente la misma gama de colores que los seres humanos (FIGURA 43-16). Para atraer a las abejas desde lejos, las flores polinizadas por esos insectos deben presentarles colores brillantes. Por lo regular, esas flores son blancas, azules, amarillas o anaranjadas y mu-

chas tienen otras marcas, como manchas centrales o líneas que apuntan hacia el centro, las cuales reflejan la luz ultravioleta.

Las flores polinizadas por abejas tienen adaptaciones estructurales que ayudan a garantizar la transferencia de polen. En la flor escoba escocesa, por ejemplo, el néctar se forma en una hendidura entre los pétalos. En las flores recién abiertas, los estambres cargados de polen sobresalen de la hendidura. Cuando una abeja visita una flor joven, su peso dobla los pétalos hacia abajo, de manera que los estambres salen y salpican de polen su dorso (FIGURA 43-17). En las flores más viejas, el estigma pegajoso del carpelo sobresale de la hendidura, así que cuando una abeja cubierta de polen entra en la flor en busca de néctar, deja el polen en el estigma.

Muchas flores adaptadas a la polinización por polillas y mariposas tienen tubos llenos de néctar en los que puede entrar la larga lengua de esos insectos. Las flores polinizadas por polillas nocturnas se abren únicamente al anochecer; casi todas son blancas y algunas despiden fuertes olores de almizcle que ayudan a la polilla a encontrar la flor en la oscuridad. Los escarabajos y las moscas prefieren alimentarse de materia animal, así que las flores polinizadas por escarabajos expiden un olor a estiércol o carne en descomposición para atraer a esos insectos carroñeros. Algunas de esas flores, como la “flor cadáver” (véase la fotografía al inicio del capítulo) y la col fétida del Oriente (FIGURA 43-18) también se calientan. El calor atrae a polinizadores y sin duda ayuda a difundir aromas desagradables (véase la sección “Otro vistazo al estudio de caso”). Estas flores engañan a sus polinizadores: huelen a carne en descomposición, rica en nutrientes, pero en realidad no ofrecen alimento.

Los colibríes se cuentan entre los pocos polinizadores vertebrados (FIGURA 43-19a), aunque varios mamíferos también visitan las flores (FIGURA 43-19b). Puesto que el sentido del olfato de los colibríes es notablemente deficiente, las flores

a)



FIGURA 43-19 Algunos polinizadores vertebrados

a) Un colibrí se alimenta de una flor de hibisco. Observa la posición de las anteras para depositar el polen sobre su cabeza. b) Cuando la zarigüeya mielera husmea en esta flor, granos de polen se pegan a su hocico y sus bigotes. Una visita a otra flor transferirá el polen. **PREGUNTA:** ¿Por qué muchas plantas que son polinizadas por los colibríes desarrollaron flores con forma de tubos alargados y delgados?



FIGURA 43-20 El engaño sexual promueve la polinización. Esta avispa macho intenta aparearse con la flor de una orquídea. El resultado es una reproducción fructífera, ¡pero para la orquídea, no para la avispa!

polinizadas por estas aves casi nunca sintetizan sustancias perfumadas; en cambio, producen más néctar que otras flores, pues los colibríes necesitan más energía que los insectos y prefieren las flores que pueden suministrarla. Estas flores tienen una forma tubular profunda, congruente con los largos picos y lenguas de esas aves. Además, casi todas las flores polinizadas por colibríes son de color rojo, el cual tiene un atractivo especial para los colibríes, mientras que las abejas son incapaces de distinguirlo (véase la figura 43-16).

Engaños sexuales atraen a polinizadores

Para polinizar sus flores, unas cuantas plantas, entre las que destacan las orquídeas, aprovechan el instinto de apareamiento y los comportamientos estereotipados de las avispas macho. Algunas flores de orquídeas imitan a las avispas o abejas hembra tanto en su olor (las orquídeas liberan un atrayente sexual similar al producido por el insecto hembra) como en su forma (FIGURA 43-20). Los machos se posan sobre estas “hembras falsas” e intentan aparearse, aunque lo único que consiguen es un paquete de polen. Al repetir su intento con otras orquídeas de la misma especie, las avispas transfieren el paquete de polen.

Algunas plantas ofrecen criaderos para los polinizadores

Tal vez las relaciones más complejas entre plantas y polinizadores se den en unos cuantos casos en que los insectos fecundan una flor y luego ponen sus huevecillos en el ovario de ésta. Este acuerdo se presenta entre el algodoncillo y la chinche del algodoncillo, entre la higuera y ciertas avispas, así como entre la yuca y la polilla de la yuca (FIGURA 43-21). El extraordinario comportamiento de la polilla da como resultado la polinización de la yuca y una alacena bien surtida para su prole. Una polilla hembra visita una flor de yuca, recoge polen y forma con él una bola compacta, vuela llevando la bola de polen hasta llegar a otra flor de yuca, hace un agujero en la pared del ovario y pone sus huevecillos dentro de éste. Luego toma la bolita de polen y la embara en el estigma de la flor, ejecutando de manera impecable este comportamiento programado genéticamente. Al polinizar la yuca, la polilla garantiza que la planta producirá semillas en desarrollo para las orugas que constituyen su prole. Puesto que las orugas sólo consumen una fracción de las semillas, la yuca también lo-

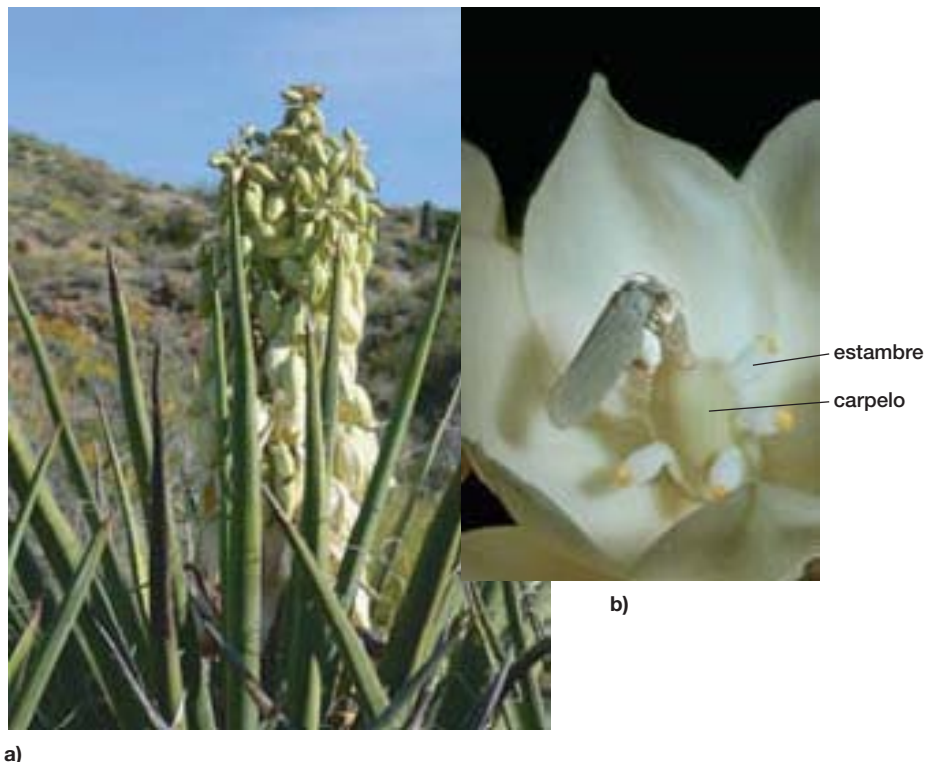


FIGURA 43-21 Una relación de dependencia mutua

Las yucas florecen en las áridas llanuras del este de Colorado a principios del verano. **b)** Una polilla deposita el polen en el estigma de una flor de yuca.



a)



b)

FIGURA 43-22 Frutos dispersados por el viento

a) El diente de león tiene pelusas filamentosas que las brisas atrapan. b) Los frutos del arce parecen helicópteros-planeadores en miniatura, cuyo giro en espiral los aleja del árbol cuando caen. **EJERCICIO:** Para ver cómo las alas ayudan a dispersar las semillas, toma dos frutos de arce y quita el ala a uno. Sostén ambos arriba de tu cabeza y déjalos caer. Compara dónde caen uno y otro.

gra su reproducción. La adaptación mutua de la yuca y la polla es total y ninguna puede reproducirse sin la otra.

Los frutos ayudan a dispersar las semillas

Una planta se beneficia si sus semillas se dispersan la distancia suficiente como para que las plantas jóvenes no compitan con sus progenitores por luz y nutrientes. Además, las plantas tendrán más éxito y proliferarán más si sus miembros envían semillas a sitios tanto cercanos como lejanos. En las plantas con flores, los frutos utilizan una diversidad de fascinantes mecanismos para dispersar las semillas.

Los frutos explosivos efectúan una dispersión "de escopeta"

Algunas plantas desarrollan frutos explosivos que expulsan sus semillas a varios metros de la planta progenitora. Los muérdagos, parásitos comunes de los árboles, producen frutos que disparan semillas pegajosas. Si una semilla golpea un árbol cercano, se adhiere a la corteza y germina, introduciendo en los tejidos vasculares del huésped fibras que actúan como raíces para extraer alimento. Como el sitio apropiado para la germinación de una semilla de muérdago no es el suelo sino un árbol, es obvia la utilidad de disparar las semillas en vez de dejarlas caer.

Los frutos ligeros hacen posible la dispersión eólica

El diente de león y el arce (FIGURA 43-22) producen frutos ligeros cuya superficie atrapa el viento. Cada penachito peludo de la cabeza de un diente de león es un fruto individual que contiene una sola semilla pequeña, la cual puede viajar millas enteras si el viento coopera. En contraste, una sola ala del fruto del arce hace que su gran semilla caiga en forma de espiral, llevándola a unos metros de la planta progenitora.

Los frutos flotantes permiten la dispersión por agua



FIGURA 43-23 Fruto dispersado por agua

Después de un largo viaje por mar, una tormenta depositó este coco en una playa a buena distancia de la orilla. La "carne" y la "leche" del coco son dos tipos diferentes de endospermo. El gran tamaño y las abundantes reservas de alimento de los cocos probablemente son adaptaciones necesarias para lograr la germinación y el crecimiento de árboles en playas arenosas y estériles.

es el campeón de los flotadores. Redondo, flotante e impermeable, el coco cae de la planta progenitora, a menudo cerca de una playa. Puede germinar en ese lugar, o bien, podría rodar hasta el mar y flotar durante semanas o meses hasta llegar a tierra en alguna isla distante (FIGURA 43-23). Ahí, germinará y tal vez establecerá una nueva colonia de cocoteros en una isla donde antes no había palmeras.

Los frutos que se pegan o son sabrosos permiten la dispersión por animales

Las bardanas, el trébol de abrojo, el rabo de zorra y los bidentes desarrollan frutos con ganchos, horquillas, espinas o pelos adhesivos que se adhieren al pelaje de los animales (FIGURA 43-24) o a la ropa de los humanos. Las plantas progenitoras sujetan muy débilmente a sus frutos maduros para que el más leve contacto con un pelaje arranque al fruto de la planta y quede pegado al animal. Algunos de esos frutos podrían caerse



FIGURA 43-24 El fruto de la bardana menor usa espinas con ganchos para viajar gratis en animales peludos

cuando el animal ruede por el suelo, roce algún objeto, o cuando se acicale.

A diferencia de los frutos que se adhieren a los animales, los frutos comestibles benefician tanto al animal como a la planta. La planta almacena azúcares, almidones y atractivos sabores en un fruto carnoso que rodea a las semillas e incita a los animales hambrientos a que coman el fruto (FIGURA 43-25). Algunos frutos, como los duraznos, las ciruelas y los aguacates, contienen semillas grandes y duras que los animales, por lo regular, no comen. Otros frutos, como las zarzamoras, frambuesas, fresas, tomates y pimientos, tienen semillas pequeñas que son deglutidas junto con la pulpa. Luego, las semillas pasan por el tracto digestivo del animal sin sufrir daños. En algunos casos, el paso por el intestino de un animal incluso podría ser indispensable para la germinación de las semillas porque así se elimina por abrasión o digestión una parte del tegumento (véase “Guardián de la Tierra: Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados”). Hace poco, un estudiante de posgrado en ecología descubrió el secreto de la diseminación de las semillas de los chiles. El sabor picante desanima a los mamíferos locales que podrían comer la fruta, pero no a las aves que son incapaces de percibir el sabor. El investigador descubrió que el tracto digestivo de los mamíferos que podrían consumir los chiles destruiría las semillas, pero el paso a través del tracto digestivo de las aves eleva la tasa de germinación al triple en comparación con las semillas que simplemente caen al suelo. Además de ser transportada lejos de su progenitora, una semilla que se deglute y excreta obtiene otro beneficio: ¡recibe su propio abasto de fertilizante!



FIGURA 43-25 Los colores de las frutas maduras atraen a los animales

El fruto rojo brillante de una frambuesa atrajo a un esplendoroso quetzal en Costa Rica. Sólo los frutos maduros con semillas maduras son dulces y tienen color llamativo, lo que atrae a los animales que se alimentan de ellos y se encargan de dispersar sus semillas.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

¿HERMOSO? SÍ, PERO ¿CALIENTE?



Las moscas, al intentar escapar, rocían a las flores femeninas con el polen recolectado en un encuentro anterior con una flor masculina. Para el día siguiente, las vellosidades se marchitarán y las flores masculinas habrán madurado, liberando el polen sobre las moscas cuando éstas escapen. Como son aprendices lentos, las moscas resultan enga-

ñadas —y polinizadas— por muchas flores de caballo muerto.

Roger Seymour sostiene la hipótesis de que otra función importante de algunas flores calientes es recompensar a sus polinizadores de sangre fría, los cuales deben alcanzar una temperatura corporal de por lo menos 29.4°C (85°F) antes de que puedan



volar. El agradable aroma de las flores de filodendro atrae a los escarabajos que se alimentan de su polen y de otras partes de la flor. Además de proveer verdadero alimento a los escarabajos, estas benevolentes flores también ofrecen un lugar para el apareamiento. Los escarabajos se arrastran alrededor del espádice durante el día, donde se establecen para una noche de festín y apareamiento dentro de los cálidos confines de la flor (FIGURA 43-27). Mediciones del consumo de energía de los escarabajos revelan

que utilizan un 50 por ciento menos de energía cuando frecuentan el “club nocturno” del filodendro que cuando permanecen activos fuera durante una noche fría.

Las flores que producen calor son poco comunes, y muchas son miembros de grupos primitivos en términos de evolución. Algunos botánicos piensan que la calidez de las flores fue una innovación temprana para atraer a los escarabajos polinizadores. En la

actualidad, la mayoría de las flores ofrecen a sus polinizadores un sorbo de néctar que les da un poco de energía y los despiden con una rápida espolvoreada de polen, un proceso mucho más rápido y que consume menos energía en comparación con el hecho de ofrecer una flor tibia. Quizá a lo largo de la evolución, como afirma Seymour, “los clubes nocturnos fueron sustituidos por los restaurantes de comida rápida”.

Piensa en esto Considera las estrategias de polinización utilizadas por la flor de caballo muerto y el filodendro que se mencionaron en esta sección y piensa en las flores “de comida rápida” de las que se habló en el capítulo. Cuando el aire está a la misma temperatura (digamos, 20°C), ¿cuál flor es probable que utilice la mayor cantidad de energía? ¿La menor cantidad de energía? Sugiere las razones evolutivas para ceder el paso a las flores “de comida rápida” que predominan en la actualidad.



FIGURA 43-27 Un “burdel” para los escarabajos

Esta flor de filodendro (nativa de la Guayana Francesa) emite olor desde el primer día en que florece (izquierda). Luego se calienta para atraer a los escarabajos, los cuales se congregan, comen, se aparean y conservan energía de la flor caliente (derecha).

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

43.1 ¿Cuáles son las características fundamentales de los ciclos de vida de las plantas?

El ciclo de vida sexual de las plantas, llamado alternancia de generaciones, comprende una forma multicelular diploide (la generación de esporofito) y una forma multicelular haploide (la generación de gametofito).

43.2 ¿Cómo se adapta la reproducción en las plantas con semilla a los ambientes secos?

En las plantas de semilla, la etapa de gametofito es muy reducida y no vive de forma independiente. El gametofito masculino encerrado dentro de una cubierta es el grano de polen, que puede ser llevado de una planta a otra por el viento o los animales. El gametofito femenino se conserva en el cuerpo de la planta esporofita. Estas adaptaciones permiten a las plantas de semilla reproducirse en ambientes relativamente secos.

43.3 ¿Cuál es la función y la estructura de las flores?

Las plantas con flor o angiospermas evolucionaron a partir de las gimnospermas. En estas últimas, el viento lleva polen de los conos masculinos a los femeninos. Sin embargo, la polinización por viento es ineficiente. En muchos hábitat, las plantas con flores tienen una ventaja selectiva sobre las gimnospermas porque muchos tipos de flores atraen insectos que llevan polen de una planta a otra.

Las flores completas constan de cuatro partes: sépalos, pétalos, estambres (las estructuras reproductoras masculinas) y carpelos (las estructuras reproductoras femeninas). Los sépalos forman la

cubierta exterior del capullo de la flor. Casi todos los pétalos (y, en algunos casos, los sépalos) tienen colores brillantes y atraen polinizadores a la flor. El estambre consiste en un filamento que lleva en la punta una antera en la que se desarrolla el polen. El carpelo consiste en el ovario, en el que se desarrollan uno o más gametofitos femeninos, y un estilo. El estilo tiene en la punta un estigma pegajoso al cual se adhiere el polen durante la polinización.

El polen, formado por el gametofito masculino encerrado en una cubierta resistente, se desarrolla en las anteras. La célula madre de microsporas, que es diploide, sufre meiosis para producir cuatro microsporas haploides. Cada una de éstas se divide por mitosis para formar el gametofito masculino haploide. Un grano de polen inmaduro consta de dos células: la célula tubo y la célula generadora. La célula generadora se divide una vez para producir dos espermatozoides.

El gametofito femenino se desarrolla dentro de los óvulos del ovario. Una célula madre de megasporas, que es diploide, sufre meiosis para formar cuatro megasporas haploides. Tres de éstas sufren degeneración; la cuarta se divide por mitosis para producir los ocho núcleos del gametofito femenino. Una de ellas se convierte en el óvulo, otra se convierte en una gran célula central con dos núcleos y las demás células sufren degeneración.

La polinización es la transferencia de polen de la antera al estigma. Cuando un grano de polen se posa en un estigma, su célula tubo crece a través del estilo hasta el gametofito femenino. La célula generadora se divide para formar dos espermatozoides que

bajan por el estilo dentro de la célula tubo e ingresan finalmente en el gametofito femenino. Un espermatozoide se fusiona con el óvulo para formar un cigoto diploide, que dará origen al embrión. El otro espermatozoide se fusiona con la célula central de dos núcleos para producir una célula triploide. Esta célula dará origen al endospermo, un tejido para almacenar alimento dentro de la semilla.

Web tutorial 43.1 Reproducción en las plantas con flor

43.4 ¿Cómo se desarrollan los frutos y las semillas?

Los frutos pueden ser jugosos y comestibles; las semillas en su interior están adaptadas para pasar a través del tracto digestivo de los animales. También existen frutos que tienen ganchos que se adhieren al pelaje de los animales, o bien, alas que promueven la dispersión por medio del viento. La función de los frutos es dispersar las semillas. El embrión consiste en una raíz y un vástago embrionarios, incluyendo el cotiledón (uno en las monocotiledóneas y dos en las dicotiledóneas). Los cotiledones absorben el alimento del endospermo y los transfieren al embrión en crecimiento. La semilla está encerrada dentro del fruto, el cual se desarrolla a partir de la pared del ovario.

43.5 ¿Cómo germinan y crecen las semillas?

La germinación de las semillas requiere calor y humedad. La energía para la germinación proviene del alimento, almacenado en el endospermo, que los cotiledones se encargan de transferir al embrión. Las semillas normalmente permanecen en estado de latencia durante cierto tiempo después de la maduración del fruto, en

especial en los climas templados. Para germinar, algunas semillas también requieren de condiciones de sequía, exposición al frío o ruptura de su tegumento. La raíz es la primera en surgir de la semilla germinada, absorbiendo agua y nutrientes para el vástago. Los vástagos de las monocotiledóneas a menudo están protegidos por un coleótilo, mientras que las dicotiledóneas utilizan la curvatura de un epicótilo o un hipocótilo para salir del suelo. Los cotiledones proveen energía al joven vástago a partir del alimento para que pueda crecer.

43.6 ¿Cuáles son algunas adaptaciones para la polinización y la dispersión de semillas?

Las plantas y los animales que les sirven como polinizadores y dispersores de semillas han coevolucionado, al actuar como agentes de selección natural unos sobre otros a lo largo de la historia evolutiva. Las flores atraen a los animales con olores, alimentos (como el néctar) y formas y colores apropiados en correspondencia con el cuerpo y los sentidos de esos animales. Algunas flores engañan a los polinizadores, atrayendo insectos con olores de alimentos o simulando la forma de una potencial pareja. Algunas plantas y sus polinizadores, como la yuca y la polilla, son completamente dependientes entre sí. Los frutos dispersan las semillas de muchas formas. Algunos están adaptados para ser transportados por el agua o el viento. Otros se adhieren al pelaje de los animales; otros más atraen a los animales para que se los coman sin dañar a las semillas.

TÉRMINOS CLAVE

alternancia de generaciones
pág. 889

antera pág. 892

carpelo pág. 892

célula tubo pág. 892

célula generadora pág. 892

célula madre de megasporas
pág. 895

célula madre de microsporas
pág. 892

cigoto pág. 889

coleótilo pág. 899

cotiledón pág. 896

doble fecundación pág. 896

endospermo pág. 896

epicótilo pág. 899

espora pág. 889

esporofito pág. 889

estambre pág. 892

estigma pág. 892

estilo pág. 892

fecundación pág. 896

filamento pág. 892

flor pág. 891

flor completa pág. 892

flor incompleta pág. 892

fruto pág. 892

gametofito pág. 889

germinar pág. 889

grano de polen pág. 889

hipocótilo pág. 899

integumento pág. 895

latencia pág. 899

megaspora pág. 895

microspora pág. 892

ovario pág. 892

óvulo pág. 892

pétalo pág. 892

polinización pág. 895

semilla pág. 889

sépalo pág. 892

tegumento de la semilla
pág. 896

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Elabora un diagrama del ciclo de vida de las plantas, comparando los helechos con las plantas con flores. ¿Qué etapas son haploides y qué etapas son diploides? ¿En qué etapa se forman los gametos?

¿Cuáles son las ventajas de las etapas reducidas de gametofito en las plantas con semilla en comparación con los gametofitos más sustanciales de los helechos?

3. Elabora un diagrama de una flor completa. ¿Dónde se forman los gametofitos masculino y femenino?

4. ¿Cómo se desarrolla un óvulo dentro de un gametofito femenino? ¿Cómo permite esta estructura que se realice la doble fecundación?

5. ¿Qué es un grano de polen y cómo se forma?

6. ¿De qué partes se compone una semilla y cómo contribuye cada una al desarrollo de una plántula?
7. Describe las características que esperarías encontrar en flores polinizadas por el viento, escarabajos, abejas y colibríes, respectivamente. En cada caso, explica por qué se desarrollarían tales rasgos.
8. ¿Qué es el endospermo? ¿De qué célula del gameto femenino se deriva? ¿El endospermo es más abundante en la semilla madura de una monocotiledónea o de una dicotiledónea?
9. Describe tres mecanismos por los que se interrumpe el estado de latencia en diferentes tipos de semillas. ¿Qué relación tienen esos mecanismos con el ambiente normal de la planta?
10. ¿Cómo protegen las plántulas de las monocotiledóneas y las dicotiledóneas la delicada punta del vástago durante la germinación de la semilla?
11. Describe tres tipos de frutos y los mecanismos con que ayudan a dispersar sus semillas.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Un amigo te regala unas semillas para sembrarlas en el patio. Las siembras, pero nada sucede. ¿Qué podrías intentar para que germinen las semillas?
2. Charles Darwin describió en cierta ocasión una flor que producía néctar en el fondo de un tubo de 43 centímetros de profundidad y predijo que debía haber una polilla u otro animal con una lengua de 43 cm de longitud. Tenía razón. Tal especialización casi con toda seguridad implica que esta flor en particular sólo podía ser polinizada por esa polilla. ¿Qué ventajas y desventajas tiene semejante especialización?
3. Muchas plantas que llamamos yerbas fueron traídas de otro continente de forma accidental o deliberada. En un entorno nuevo, tie-

nen pocos competidores o depredadores animales, por lo que tienden a reproducirse en tales cantidades que desplazan a las plantas nativas. Piensa en varias formas en que los seres humanos podrían participar en la dispersión de las plantas. ¿Hasta qué grado crees que los seres humanos hayan alterado las distribuciones de las plantas? ¿En qué formas ha sido útil este cambio para el hombre? ¿En qué formas es una desventaja?

4. En los trópicos hay varias relaciones de coevolución entre planta y animal en las que ambos dependen de la relación para sobrevivir. En virtud de la rapidez con que se destruyen los ecosistemas tropicales, ¿cómo propicia este tipo de relaciones que ambos organismos sean especialmente vulnerables a la extinción?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Brown, Kathryn. "Patience Yields Secrets of Seed Longevity". *Science*, 9 de marzo de 2001. El estudio de la germinación de las plantas que realizó William Beal continúa 120 años después.

Eiseley, L. "How Flowers Changed the World". *National Wildlife*, abril-mayo de 1996. El filósofo y naturalista Loren Eiseley explica con gran elocuencia cómo la evolución de las flores ha cambiado la historia de la vida en la Tierra. Un documento bellamente escrito e ilustrado.

Milius, S. "The Science of Big, Weird Flowers". *Science News*, 11 de septiembre de 1999. Muchas flores gigantes expiden un olor a carroña y engañan a las moscas y los escarabajos para que las polinicen.

Milius, S. "Warm-Blooded Plants". *Science News*, 13 de diciembre de 2003. Algunas plantas se calientan para atraer y, en ocasiones, beneficiar a los polinizadores.

Milius, S. "Moss Express: Insects and Mites Tote Mosses' Sperm". *Science News*, 2 de septiembre de 2006. Recientes investigaciones sugieren que algunos musgos no dependen por completo del agua para transferir los espermatozoides, sino que quizá dependan también de diminutos artrópodos.

Mlot, C. "Where There's Smoke, There's Germination". *Science News*, 31 de mayo de 1997. Investigadores descubrieron que el dióxido de nitrógeno, como el que se libera en el humo, es un fuerte estímulo para la germinación de las semillas en algunas especies.

Moore, P. D. "The Buzz About Pollination". *Nature*, 7 de noviembre de 1996. El zumbido de las abejas podría contribuir a liberar el polen de ciertas flores especialmente adaptadas para ello, en una especie de "polinización sónica".

Pichersky, E. "Plant Scents". *American Scientist*, noviembre-diciembre de 2004. Los aromas de las flores no sólo podrían atraer a los polinizadores, sino también disuadir a los depredadores y organismos patógenos de atacarlas.

Seymour, R. S. y Schultz-Motel, P. "Thermoregulating Lotus Flowers". *Nature*, 26 de septiembre de 1996. La flor de loto genera una cantidad significativa de calor y regula su propia temperatura de manera eficiente. El calor podría servir para atraer a los polinizadores.

En las plantas se alternan las generaciones multicelulares haploides y diploides

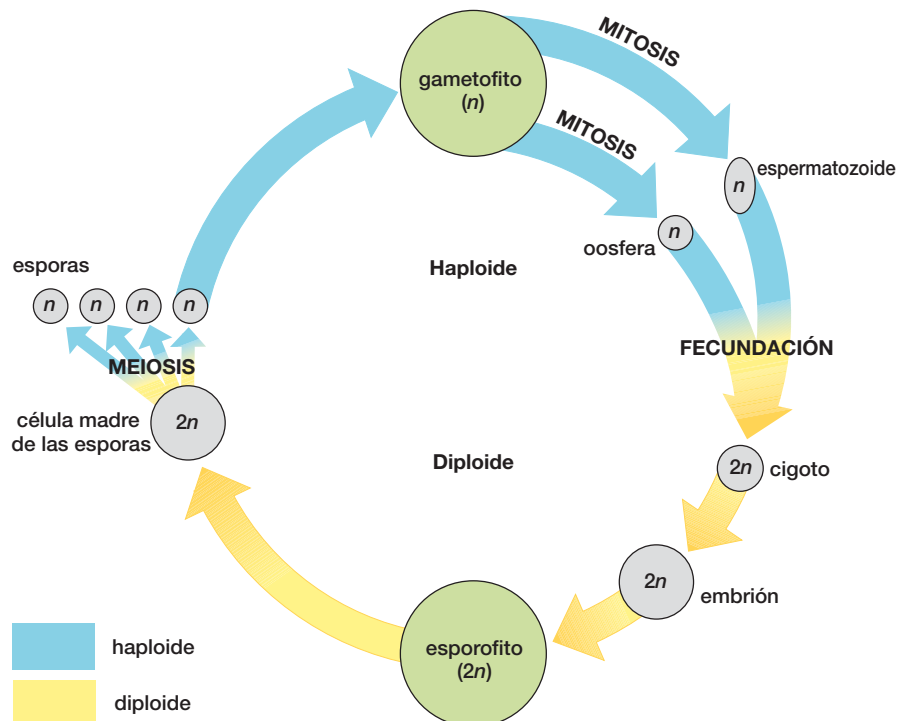
El ciclo vital de las plantas se caracteriza por la **alternancia de generaciones** (FIGURA 21-1), en la que se alternan generaciones diploides y haploides individuales. (Recordemos que un organismo diploide tiene dos juegos de cromosomas; un organismo haploide, un juego). En la generación diploide, el cuerpo de la planta se compone de células diploides y se conoce como **esporofito**. Ciertas células de los esporofitos experimentan meiosis para producir células reproductivas haploides llamadas *esporas*. Estas esporas haploides se desarrollan hasta convertirse en plantas haploides multicelulares llamadas **gametofitos**.

Finalmente, los gametofitos producen *gametos* haploides masculinos y femeninos por mitosis. Los gametos son células reproductivas, al igual que las esporas, pero, a diferencia de estas últimas, un gameto individual por sí solo no puede desarrollarse para convertirse en un nuevo individuo.

En vez de ello, dos gametos de sexo opuesto deben encontrarse y fusionarse para formar un nuevo individuo. En las plantas, los gametos producidos por gametofitos se fusionan para formar un **cigoto** diploide, que se desarrolla hasta constituir un esporofito diploide, y el ciclo se inicia de nuevo.

FIGURA 21-1 Alternancia de generaciones en las plantas

Como se muestra en esta representación generalizada del ciclo vital de una planta, la generación esporofítica diploide produce esporas haploides por meiosis. Las esporas se desarrollan hasta dar origen a una generación gametofítica haploide que produce gametos haploides por mitosis. El resultado de la fusión de estos gametos es un cigoto diploide que se transforma en la planta esporofítica.



Las plantas tienen embriones multicelulares y dependientes

En las plantas, los cigotos se desarrollan en embriones multicelulares que permanecen dentro de la planta progenitora de cuyos tejidos reciben nutrientes. Esto es, el embrión permanece adherido a la planta progenitora y es dependiente de ésta conforme crece y se desarrolla. Tales embriones multicelulares y dependientes no se encuentran entre los protistas fotosintéticos, de manera que esta característica distingue a las plantas de sus más cercanos parientes entre las algas.

Las plantas desempeñan un papel ecológico fundamental

Las plantas proveen alimento, ya sea de forma directa o indirecta, a todos los animales, hongos y microbios no fotosintéticos terrestres. Las plantas utilizan la fotosíntesis para captar la energía solar y convierten parte de esa energía en hojas, retoños, semillas y frutos que sirven de alimento a otros organismos. Muchos de estos consumidores de tejidos vegetales, a la vez, sirven de alimento a otros organismos. Las plantas son los principales proveedores de energía y nutrientes a los ecosistemas terrestres, y toda la vida terrestre depende de la capacidad de las plantas para fabricar alimentos a partir de la luz solar.

Además de su papel como proveedores de alimento, las plantas hacen otras contribuciones esenciales a los demás organismos. Por ejemplo, generan oxígeno como un subproducto de la fotosíntesis y, al hacerlo, reponen continuamente el oxígeno de la atmósfera. Sin la contribución de las plantas,

el oxígeno atmosférico se agotaría rápidamente como resultado de la respiración que consume oxígeno por parte de una multitud de organismos sobre la Tierra.

Las plantas también ayudan a crear y mantener el suelo. Cuando una planta muere, sus tallos, hojas y raíces se convierten en alimento para los hongos, procariotas y otros organismos encargados de la descomposición. Gracias al proceso de descomposición, los tejidos de las plantas se degradan en diminutas partículas de materia orgánica que constituyen parte del suelo. La materia orgánica mejora la capacidad del suelo de retener agua y nutrientes, haciéndolo más fértil y más capaz de contribuir al crecimiento de las plantas vivas. Las raíces de estas últimas ayudan a conservarlas en su lugar y a mantener la consistencia de la tierra. Los suelos de los cuales se ha eliminado la vegetación son susceptibles a la erosión del viento y el agua.

Las plantas satisfacen las necesidades de los humanos y halagan sus sentidos

Todos los habitantes de los ecosistemas terrestres dependen de las contribuciones de las plantas, pero la dependencia de los seres humanos en relación con las plantas es especialmente notoria. Sería difícil exagerar el grado en que las poblaciones humanas dependen de las plantas. Ni la explosión demográfica ni nuestro rápido avance tecnológico serían posibles sin las plantas.

Las plantas proveen refugio, combustible y medicinas

Las plantas son el origen de la madera que se utiliza para construir casas para una gran parte de la población humana. Durante buena parte de la historia de la humanidad, la madera fue también el principal combustible para calentar los hogares y para cocinar. La madera sigue siendo el combustible más importante en muchos lugares del mundo. El carbón, otro combustible importante, se compone de los restos de plantas antiguas que se han transformado como resultado de procesos geológicos.

Las plantas también suministran muchos medicamentos de los que depende el cuidado de la salud en la actualidad. Medicamentos importantes que originalmente se encontraron y se extrajeron de las plantas incluyen la aspirina, el medicamento para el corazón llamado digitalina, el Taxol[®] y la vinblastina, que se utilizan en el tratamiento contra el cáncer; la quinina, que combate la malaria, así como los analgésicos codeína y morfina, entre muchos otros medicamentos.

Además de extraer sustancias útiles de las plantas silvestres, los humanos han domesticado una multitud de especies vegetales útiles. A través de generaciones de cruce selectiva, los humanos han modificado las semillas, los tallos, las raíces, las flores y los frutos de especies seleccionadas para obtener alimento y fibra. Es difícil imaginar la vida sin el maíz, el arroz, las papas, las manzanas, los tomates, el aceite para cocinar, el algodón y la infinidad de alimentos básicos que las plantas domésticas nos suministran.

Las plantas brindan placer

A pesar de las obvias contribuciones de las plantas al bienestar de los seres humanos, nuestra relación con ellas parece estar basada en algo más profundo que en su capacidad para ayudarnos a satisfacer nuestras necesidades materiales. Aunque apreciamos el valor práctico del trigo y la madera, nues-

tras conexiones emocionales más poderosas con las plantas son puramente sensuales. Muchos de los placeres de la vida llegan a nosotros por cortesía de nuestras compañeras las plantas. Nos deleitamos con la belleza y la fragancia de las flores y las presentamos a otros como símbolo de nuestras emociones más sublimes e inefables. Muchos de nosotros dedicamos horas enteras de nuestro tiempo de ocio a cuidar de los jardines y céspedes, sin otra recompensa que el placer y la satisfacción que obtenemos al observar los frutos de nuestro trabajo. En nuestras casas, reservamos un espacio no sólo para los miembros de la familia, sino también para las plantas. Nos sentimos impulsados a alinear las calles con árboles y buscamos refugio del estrés de la vida cotidiana en parques con abundante vegetación. Nuestras mañanas se enriquecen con el aroma del café o el té y nuestras noches con un buen vaso de vino. Es evidente que las plantas nos ayudan a cumplir nuestros deseos, tanto como nuestras necesidades.



persar el polen con más precisión que el viento. Por su parte, los frutos atraían a los animales que se alimentaban de ellos y dispersaban en sus heces las semillas que no podían digerir.

21.4 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES GRUPOS DE PLANTAS?

Dos grupos principales de plantas terrestres surgieron a partir de las antiguas algas (tabla 21-1). Uno de ellos, el grupo de las **briofitas** (también conocidas como *plantas no vasculares*), necesita un medio húmedo para reproducirse, por lo que constituye un puente entre la vida acuática y la terrestre, de manera análoga a los anfibios en el reino animal. El otro grupo, el de las plantas **vasculares** (también llamadas *traqueofitas*), ha conseguido colonizar ambientes más secos.

Tabla 21-1 Características de los principales grupos de plantas

Grupo	Subgrupo	Relación entre el esporofito y el gametofito	Transferencia de células reproductoras	Desarrollo embrionario inicial	Dispersión	Estructuras de transporte de agua y nutrientes
Briofitas		Gametofito dominante: el esporofito se desarrolla a partir del cigoto	El espermatozoide móvil nada hacia la oosfera inmóvil retenida en el gametofito	Se lleva a cabo dentro del arquegonio del gametofito	Esporas haploides arrastradas por el viento	Ausentes
Plantas vasculares	Helechos	Esporofito dominante: se desarrolla a partir del cigoto retenido en el gametofito	El espermatozoide móvil nada hacia la oosfera inmóvil retenida en el gametofito	Se lleva a cabo dentro del arquegonio del gametofito	Esporas haploides arrastradas por el viento	Presentes
	Coníferas	Esporofito dominante: el gametofito microscópico se desarrolla dentro del esporofito	El polen, dispersado por el viento transporta los espermatozoides hasta la oosfera inmóvil en el cono	Se lleva a cabo dentro de una semilla protectora que contiene una provisión de alimento	Semillas que contienen el embrión esporofítico diploide dispersadas por el viento o animales	Presentes
	Plantas con flor	Esporofito dominante: el gametofito microscópico se desarrolla dentro del esporofito	El polen, dispersado por el viento o los animales, lleva espermatozoides a la oosfera inmóvil dentro de la flor	Se lleva a cabo dentro de una semilla protectora que contiene una provisión de alimento; la semilla está encerrada en el fruto	Fruto con semillas que son dispersadas por animales, el viento o el agua	Presentes

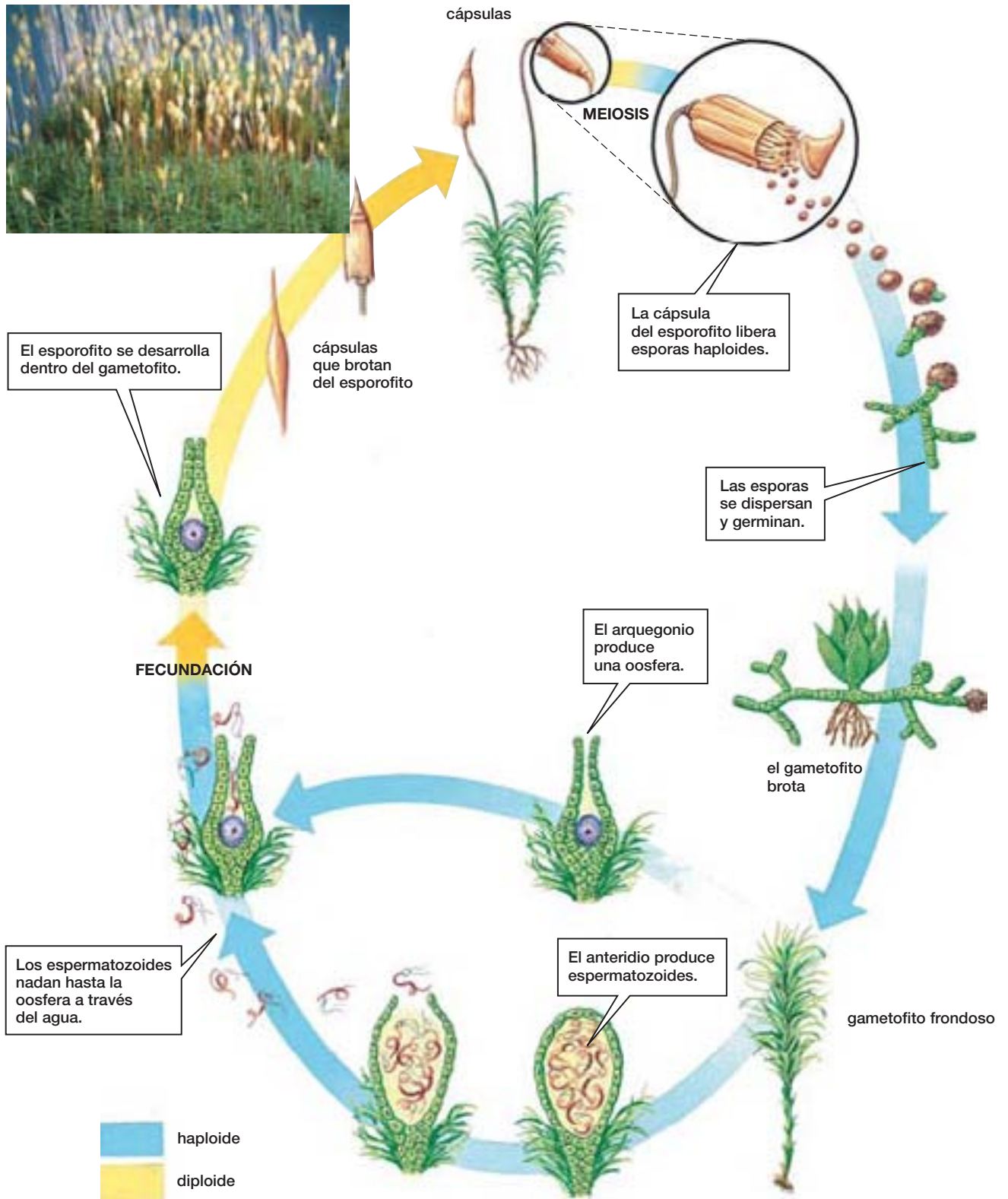


FIGURA 21-4 Ciclo vital de un musgo

El gametofito verde frondoso (abajo a la derecha) es la generación haploide que produce espermatozoides y oosferas. Los espermatozoides deben nadar por una película de agua para llegar a la oosfera. El cigoto se desarrolla hasta convertirse en un esporofito diploide con tallo que emerge de la planta gametofítica. El esporofito tiene como remate una cápsula de color marrón donde se producen esporas haploides por meiosis. Éstas se dispersan y germinan para producir otra generación de gametofitos verdes. (Imagen en recuadro) Plantas de musgo. Las plantas verdes, cortas y frondosas son los gametofitos haploides; los tallos de color marrón rojizo son esporofitos diploides.

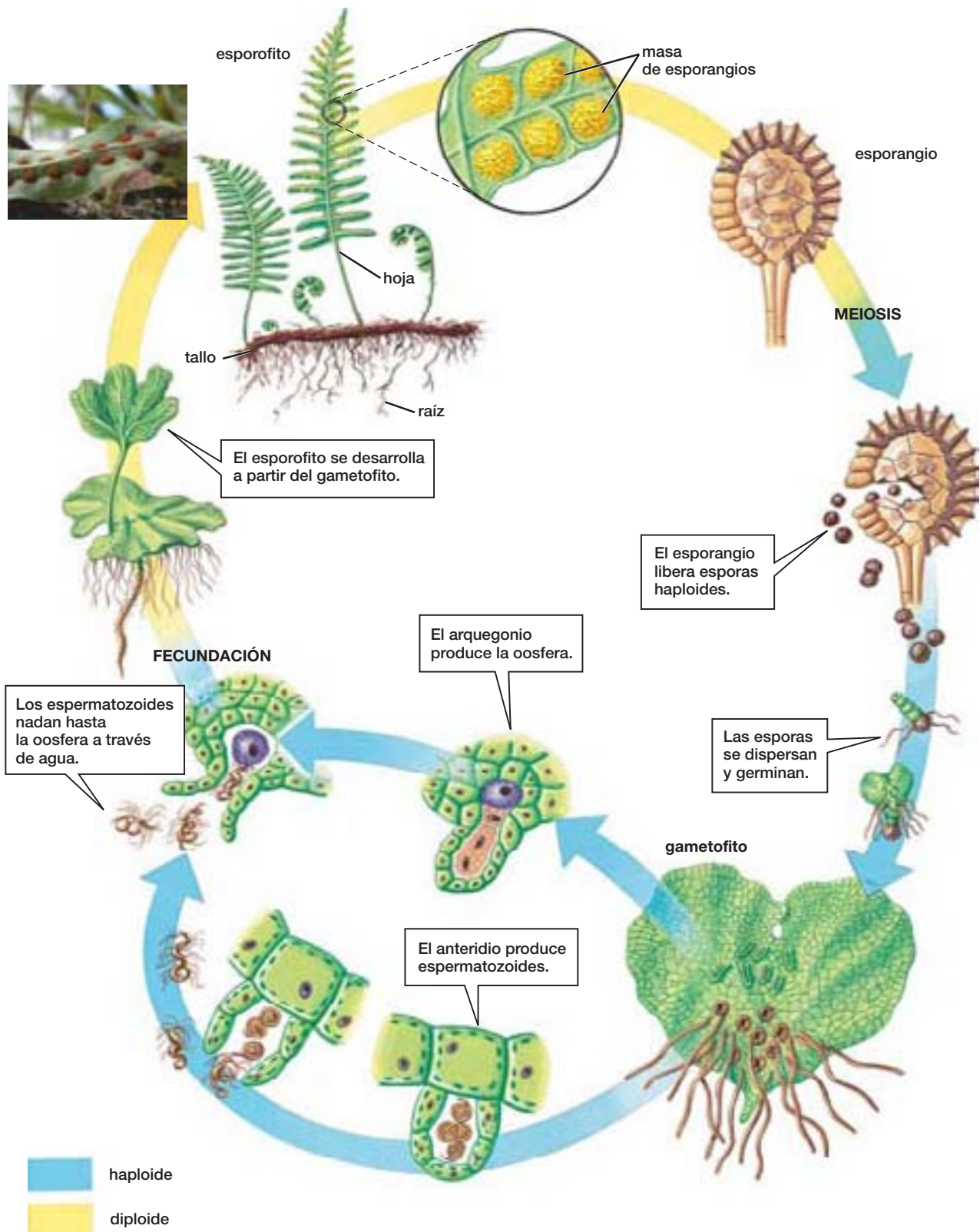


FIGURA 21-6 Ciclo vital de un helecho

El cuerpo de la planta dominante (arriba a la izquierda) es el esporofito diploide. El viento dispersa las esporas haploides —formadas en los esporangios situados en el envés de ciertas hojas—, que germinan en el suelo húmedo del bosque y se transforman en plantas gametofíticas haploides, las cuales pasan desapercibidas. En la superficie inferior de estos pequeños gametofitos con forma de lámina, los anteridios masculinos y los arquegonios femeninos producen espermatozoides y oosferas. Los espermatozoides deben nadar hasta la oosfera, que permanece en el arqueogonio. El cigoto se desarrolla hasta convertirse en una planta esporofítica grande. (Imagen en recuadro) Envés de una hoja de helecho, donde se observan grupos de esporangios.

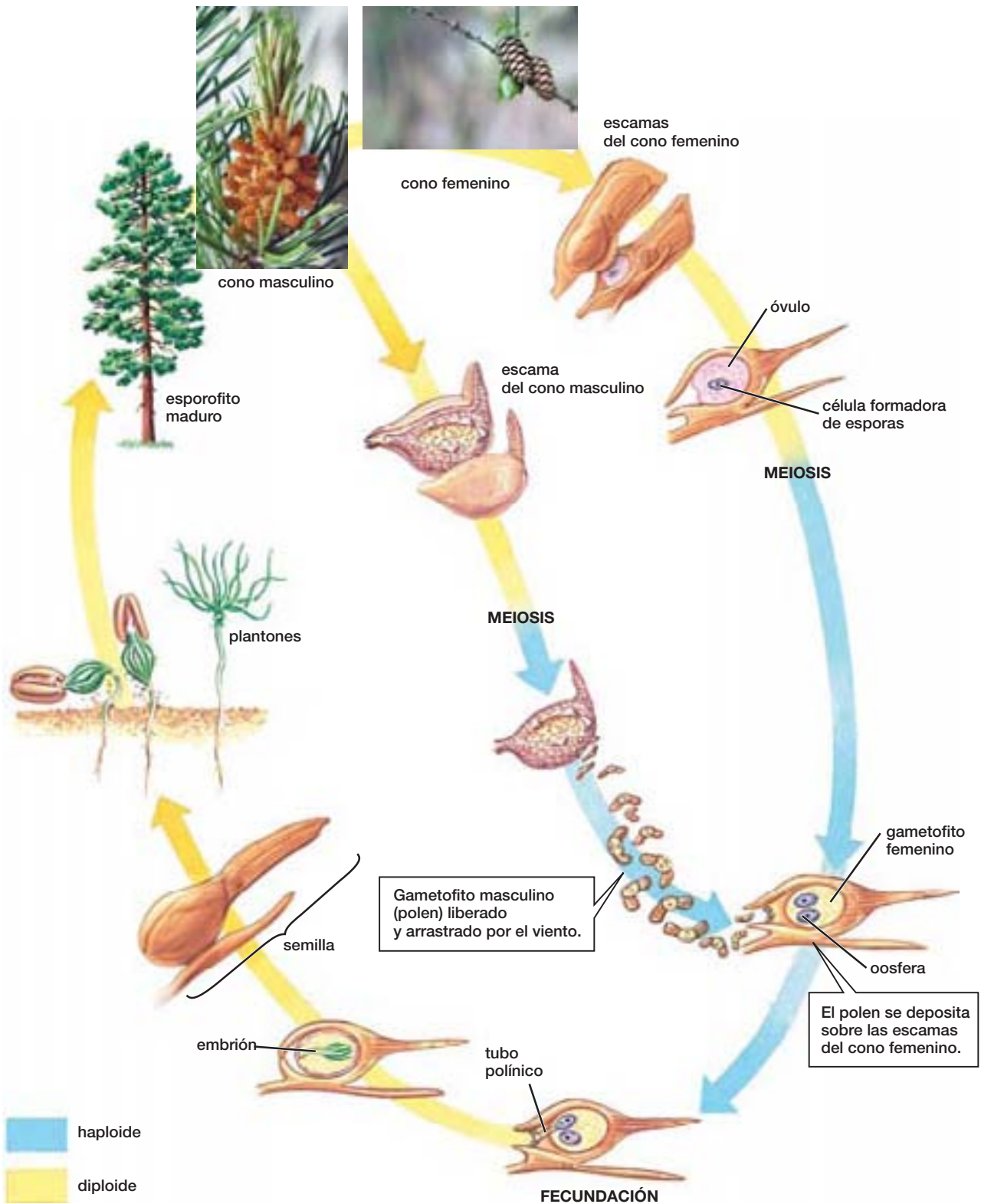


FIGURA 21-9 Ciclo vital del pino

El pino es la generación esporofítica (arriba a la izquierda) que posee conos tanto masculinos como femeninos. Los gametofitos haploides femeninos se desarrollan dentro de las escamas de los conos femeninos y producen oosferas. Los conos masculinos producen polen, es decir, gametofitos masculinos. Un grano de polen, dispersado por el viento, se deposita en las escamas de un cono femenino. Del grano de polen crece un tubo polínico que penetra en el gametofito femenino y conduce los espermatozoides hacia la oosfera. La oosfera fecundada se transforma en una planta embrionaria encerrada en una semilla. Finalmente, la semilla se desprende del cono, germina y crece hasta convertirse en un árbol esporofítico.

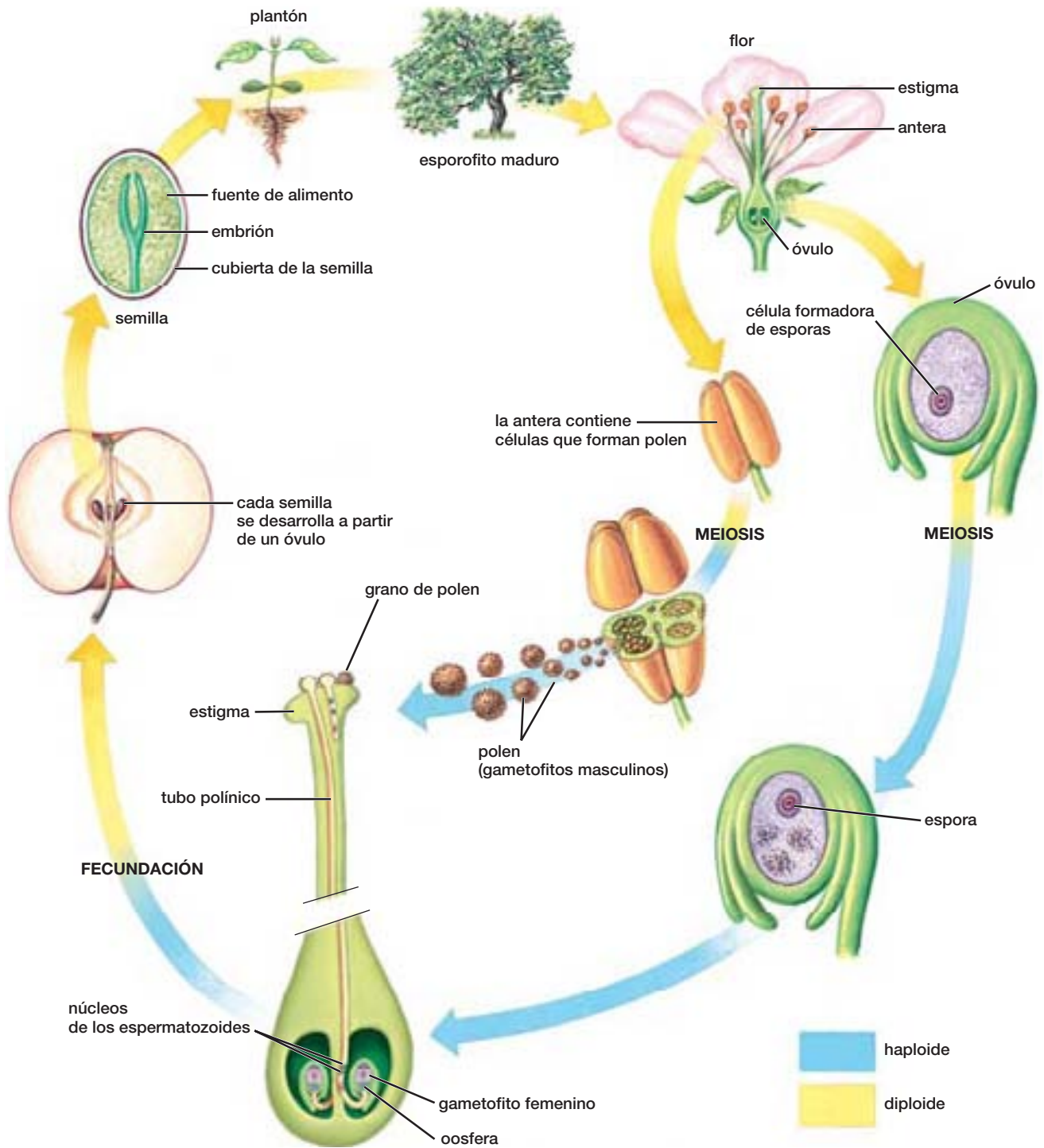


FIGURA 21-11 Ciclo vital de una planta con flor

El cuerpo de la planta dominante (arriba a la derecha) es el esporofito diploide, cuyas flores producen normalmente gametofitos tanto masculinos como femeninos. Los gametofitos masculinos (granos de polen) se producen dentro de las anteras. El gametofito femenino se desarrolla a partir de una espora en el interior del óvulo y contiene una oosfera. Un grano de polen que cae dentro de un estigma forma un tubo polínico que baja hacia el óvulo y llega al gametofito femenino. Ahí libera sus espermatozoides, uno de los cuales se une con la oosfera para formar un cigoto. El óvulo da origen a la semilla, que contiene el embrión en desarrollo y constituye su fuente de alimento. La semilla se dispersa, germina y se desarrolla hasta convertirse en un esporofito maduro.

ción gametofítica se reduzcan (véase la tabla 21-1). Por eso se cree que las primeras plantas eran similares a las plantas no vasculares de la actualidad, las cuales tienen un esporofito más pequeño en comparación con el gametofito y que permanece unido a éste. En contraste, las plantas que se originaron tiempo después, como los helechos y otras plantas vasculares sin semilla, desarrollaron un ciclo de vida en el que el esporofito es do-

minante y el gametofito es una planta independiente y de menor tamaño. Por último, en el grupo de plantas que se originó más recientemente, las plantas con semilla, los gametofitos son microscópicos y apenas reconocibles como una generación alterna. Sin embargo, estos diminutos gametofitos aún producen oosferas y espermatozoides que se unen para formar el cigoto, el cual se desarrolla hasta formar un esporofito diploide.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO LA REINA DE LOS PARÁSITOS



Las aproximadamente 17 especies de plantas parásitas del género *Rafflesia*, que incluyen la *Rafflesia arnoldii*, habitan en los bosques húmedos del sureste asiático, un hábitat que está desapareciendo rápidamente conforme se talan las selvas para ceder paso a la agricultura y el desarrollo económico. La zona geográfica donde crece la *Rafflesia arnoldii* está limitada a las reducidas selvas de la península de Malasia y las islas de Borneo y Sumatra, en Indonesia; la especie es escasa y está en peligro de extinción. El gobierno de Indonesia ha establecido algunos parques y reservas para proteger a la *Rafflesia arnoldii*, pero, como sucede con frecuencia en los países en desarrollo, un bosque o una selva protegida en el papel es vulnerable en la realidad.

Tal vez la mayor esperanza para la supervivencia de la *Rafflesia* de mayor tamaño sea la toma de conciencia por parte de los residentes rurales de Sumatra y Borneo de que las espectaculares flores de olor pútrido atraen a turistas interesados. En el marco de un innovador programa de conservación, que pretende aprovechar su potencial para el ecoturismo, los pobladores que viven cerca de las *Rafflesia arnoldii* se han convertido en los mejores cuidadores de esas plantas. A cambio de cuidar estas plantas, pueden cobrar una módica tarifa a los curiosos visitantes. Los pobladores reciben un incentivo económico para proteger esta extraña planta parasitaria.

Piensa en esto Un estilo de vida parasitario es inusual entre las plantas, pero es una mo-

dalidad que, de hecho, se presenta. Quince familias diferentes de plantas incluyen especies parasitarias, y los sistemáticos estiman que el parasitismo ha evolucionado por lo menos en nueve ocasiones a lo largo de la historia evolutiva de las plantas. ¿Por qué a pesar de los obvios beneficios de la fotosíntesis, el parasitismo (que a menudo va acompañado de una pérdida de la capacidad fotosintética) evolucionó repetidamente en las plantas que realizan fotosíntesis?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

21.1 ¿Cuáles son las principales características de las plantas?

El reino Plantae se compone de organismos eucarióticos multicelulares fotosintéticos. A diferencia de sus parientes, las algas verdes, las plantas desarrollan embriones multicelulares y dependientes y presentan una alternancia de generaciones, en la que una generación gametofítica haploide se alterna con una generación esporofítica diploide. Las plantas desempeñan un papel ecológico clave, al captar energía y ponerla a disposición de los habitantes de los ecosistemas terrestres, reabasteciendo el oxígeno atmosférico y creando y estabilizando los suelos.

21.2 ¿Cuál es el origen evolutivo de las plantas?

Protistas fotosintéticos, probablemente algas verdes, dieron origen a las primeras plantas. Las plantas primitivas eran probablemente semejantes a las algas verdes multicelulares modernas, que tienen pigmentos fotosintéticos, moléculas de almidón y componentes de pared celular similares a los de las plantas, incluida la celulosa. La vida en aguas dulces de las algas verdes pudo haberlas dotado de cualidades que permitieron a sus descendientes invadir la tierra.

21.3 ¿Cómo se adaptaron las plantas a la vida en la tierra?

Las plantas también presentan diversas adaptaciones a la vida terrestre: raíces para anclarse a tierra y que les permiten absorber agua y nutrientes; una cutícula cerosa para reducir la pérdida de agua a través de la evaporación; estomas que permiten el intercambio gaseoso cuando se abren y que evitan la pérdida de agua al cerrarse; vasos conductores para transportar agua y nutrientes por toda la planta, y una sustancia endurecedora, llamada lignina, para impregnar los vasos y brindar soporte al cuerpo de la planta.

Las estructuras reproductoras de las plantas que viven en tierra incluyen un gametofito masculino reducido (el polen), el cual permite que el viento tome el lugar del agua para transportar los espermatozoides hacia las oosferas; semillas que nutren, protegen y ayudan a dispersar los embriones en desarrollo; flores que atraen a los animales, los cuales se encargan de transportar el polen de manera más precisa y eficiente que el viento, y los frutos, que tienen a los animales para dispersar las semillas.

Web tutorial 21.1 Adaptaciones en la evolución de las plantas

21.4 ¿Cuáles son los principales grupos de plantas?

De las primitivas algas ancestrales surgieron dos grupos principales de plantas: las briofitas y las plantas vasculares. Las briofitas, que incluyen las hepáticas y los musgos, son plantas terrestres pequeñas y simples que carecen de vasos conductores. Aunque algunas se han adaptado a regiones secas, la mayoría vive en ambientes húmedos. Para reproducirse, las briofitas necesitan agua en la que puedan nadar los espermatozoides para alcanzar la oosfera.

En las plantas vasculares, un sistema de vasos, que debe su rigidez a la lignina, conduce el agua y los nutrientes absorbidos por las raíces hasta las partes superiores de la planta, además de sostener su cuerpo. Gracias a este sistema de sostén, las plantas vasculares sin semilla, que comprenden los licopodios, las colas de caballo y los helechos, crecen hasta alcanzar mayores dimensiones que las briofitas. Al igual que en estas últimas, los espermatozoides de las plantas vasculares sin semilla deben nadar hasta la oosfera para llevar a cabo la reproducción sexual, y el gametofito carece de vasos conductores.

Las plantas vasculares con semilla presentan otras dos características adaptativas importantes: el polen y las semillas. Las plantas con semilla se clasifican en dos categorías: gimnospermas y angiospermas. Las primeras comprenden los ginkgos, las cicadáceas, las gnetofitas y las coníferas, estas últimas de gran éxito. Todas ellas fueron las primeras plantas terrestres producto de la evolución. Su éxito en tierra seca se debe en parte a la transformación evolutiva del gametofito masculino en el grano de polen. El polen protege y transporta el gameto masculino, con lo que se elimina la necesidad de que el espermatozoide nade hasta la oosfera. La semilla, una estructura protectora latente que contiene un embrión y una provisión de alimento, es una segunda adaptación importante que contribuye al éxito de las plantas con semilla.

Actualmente, las angiospermas, esto es, las plantas con flores, predominan en gran parte del medio terrestre. Además del polen y las semillas, las angiospermas también producen flores y frutos. La flor permite a las angiospermas valerse de los animales como polinizadores. En contraste con el viento, en ciertos casos, los animales transportan el polen más lejos y con mayor precisión y menos desperdicio. Los frutos atraen a consumidores animales, que accidentalmente dispersan las semillas en sus heces.

En general, la tendencia evolutiva es hacia la reducción del gametofito haploide, que es dominante en las briofitas, pero microscópico en las plantas con semilla.

Web tutorial 21.2 Ciclo de vida de un helecho

TÉRMINOS CLAVE

alternancia de generaciones *pág. 404*
angiosperma *pág. 416*
anteridio *pág. 408*
arqueogonio *pág. 408*

briofita *pág. 407*
cigoto *pág. 404*
conifera *pág. 414*
cutícula *pág. 406*
esporofito *pág. 404*
estomas *pág. 406*

flor *pág. 416*
fruto *pág. 416*
gametofito *pág. 404*
gimnosperma *pág. 410*
lignina *pág. 406*

óvulo *pág. 416*
polen *pág. 410*
semilla *pág. 410*
vascular *pág. 407*
vaso *pág. 410*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

¿Qué significa la expresión “alternancia de generaciones”? ¿De cuáles dos generaciones se trata? ¿Cómo se reproduce cada una de ellas?

Explica los cambios evolutivos en la reproducción de las plantas que les permitieron adaptarse a ambientes cada vez más secos.

Describe las tendencias evolutivas de los ciclos vitales de las plantas. Pon especial énfasis en el tamaño relativo del gametofito y el esporofito.

¿De qué grupo de algas surgieron probablemente las plantas verdes? Explica las evidencias que respaldan esta hipótesis.

Menciona las adaptaciones estructurales que fueron necesarias para que las plantas invadieran la tierra seca. ¿Con cuáles de estas adaptaciones cuentan las briofitas? ¿Y los helechos? ¿Y las gimnospermas y angiospermas?

6. El número de especies de plantas con flor es mayor que el número de especies del resto del reino vegetal. ¿A qué características se debe el enorme éxito de las angiospermas? Explica por qué.

7. Menciona las adaptaciones de las gimnospermas que les han ayudado a llegar a convertirse en los árboles predominantes en los climas fríos y secos.

8. ¿Qué es un grano de polen? ¿Cómo ha ayudado a las plantas a colonizar la tierra seca?

9. La mayoría de las plantas tienen semilla. ¿Qué ventaja ofrece la semilla? ¿Cómo satisfacen las plantas sin semillas las necesidades que cubren estas últimas?



COLEGIO DE BACHILLERES BIOLOGIA II



PROYECTO * REPRODUCCIÓN DE HORTALIZAS EN HUERTOS VERTICALES * Elaborado por: Biol. Guadalupe Hernández Arellano Plantel 05 "Satélite"

Bloque temático 2

REPRODUCCION

Propósito: Al concluir este bloque el estudiante será capaz de tomar decisiones sobre temas de interés relacionados con la reproducción y sus procesos en pluricelulares, para comprender el efecto que esto tiene en el ambiente y en el cuidado de salud.

Desempeño 2. Utiliza el conocimiento científico sobre reproducción para decidir de manera crítica y reflexiva sobre temas de interés relacionados con el ambiente y la salud.

Referentes: 2, 3, 4 y 5.

Problemática: La necesidad de satisfacer la demanda de alimentos sanos para una población creciente y de bajo costo, así como el grave deterioro de los suelos son problemas en el plano nacional y muchas comunidades del país lo enfrentan. El que los alumnos conozcan y aprendan en forma sencilla la aplicación de los procesos reproductivos en plantas para la obtención de alimentos para ellos y su familia apoyaría el gasto familiar.

Objetivos del Proyecto:

- Que los alumnos reconozcan la creación de un huerto de hortalizas como un conocimiento donde el proceso reproductivo de las plantas es importante para obtener un beneficio en su salud y la de su familia.
- Que los alumnos identifiquen las hortalizas de germinación y crecimiento rápido para crear en casa un huerto familiar.
- Que los alumnos reconozcan en el proceso reproductivo de las plantas el efecto que tienen en el ambiente.

Antecedentes de conocimiento:

Los alumnos deberán conocer los conceptos siguientes: ¿Qué es la reproducción? ¿Qué es una semilla? Tipos de semillas y tiempos de germinación de estas, esquema de desarrollo de una planta desde semilla hasta la planta adulta, requerimientos nutricionales para la germinación de las semillas. Porque la reproducción de plantas es importante y el impacto de este proceso en el desarrollo de la salud de los alumnos y en el ambiente.

Material a emplear por equipo de trabajo:

- Un cartón de huevo completo y vacío (30 x 30 cm.) Se empleará como germinador.
- Semillas de rábano, cilantro, acelga, calabacitas, lechuga, etc.
- Tierra negra para maseta (1kilo)
- 3 envases de PET de 3 Li. de capacidad, limpios y secos.

- Alambre recosido de calibre 22 (250grs. Por equipo o 1 Kilo por grupo)
- 6 rondanas planas de ½ pulgada
- Cúter o tijeras, regla, plumón
- Agua

Desarrollo del proyecto.

Se propone explicar a los alumnos en la primera sesión del bloque 2 Reproducción, las características y el trabajo a realizar en el proyecto con el fin de que lo vayan desarrollando a lo largo de las semanas (4 o 5) en donde se están revisando en clase los desempeños y referentes de dicho bloque. Considerar también que el profesor debe realizar por lo menos 3 momentos para llevar a cabo el seguimiento del mismo y que todos los equipos de trabajo obtengan resultados que emplearan para el reporte final.

Fase de apertura. Se forman los equipos de trabajo para realizar el proyecto y los alumnos desarrollarán dicho proyecto en base a la aplicación de trabajo colaborativo durante el tiempo que dure (aproximadamente 4 a 5 semanas) para obtener resultados del mismo. Los alumnos llevarán a cabo la investigación bibliográfica, dando respuesta a los antecedentes de conocimiento señalados.

Fase de desarrollo:

Se les explica a los jóvenes como elaborar el germinador de la siguiente forma: (ver esquema 1)

El número de espacios (donde va un huevo) en el cartón solicitado es de 30 y en cada uno se coloca tierra para maseta hasta la mitad del mismo y se siembran 3 o 4 semillas en cada uno, es importante colocar en 10 espacios un tipo de semillas (cilantro), en otros 10 otra especie como rábanos y los últimos 10 espacios colocar otra especie (lechuga), de tal forma que el germinador quede dividido en tres tercios y cada uno con semillas de especie diferente, en total sembrarás tres especies de hortalizas, las semillas a sembrar las elijen los integrantes de cada equipo de las señaladas (ver sección de material). Al terminar de sembrar se agrega un poco de agua en cada espacio, sólo a humedecer la tierra (ojo no a saturar de humedad y no inundarlas). Ya elaborado el germinador, debes cuidar las semillas para lograr la germinación, para ello, debes mantener la humedad constante en el suelo y les tiene que dar el sol y el aire (**importante no permitir que la lluvia las inunde**) durante 3 a 7 días, que es período promedio de estas especies para germinar.

El profesor te indicará cuando tienes que mostrarle el germinador terminado y listo.

Cuando las semillas ya germinaron anotarás los datos correspondientes en el cuadro 1, y realizará el trasplante de las plántulas al huerto vertical que debes construir previamente.

Construcción del Huerto vertical. (Ver imágenes de estructura de huerto).

A cada uno de los envases de pet limpios y secos se le quita la etiqueta plástica y en la parte central de este y en el centro del mismo se traza con una pluma un rectángulo de aproximadamente 20 cm. de largo por un ancho 7 a 10 cm., debe quedar el espacio sin que rebese la mitad del envase de pet (ver dibujo). Ya elaborada la “maseta de pet, en el fondo de esta, se forman pequeños orificios de medio cm de diámetro con un cúter o unas tijeras, formando de 4 a 8 orificios para que por ellos escurra el agua cuando se riegan las plantas. Elaborados los tres envases de la misma forma, estos se unen por medio de alambre en los costados de los recipiente de pet, la distancia entre uno y otro debe ser de 20 a 30 cm. colocados en posición vertical uno debajo de otro; es importante colocar

el alambre bien, que no se mueva y que los recipientes queden unidos por el mismo alambre de un lado y del otro, para que se pueda colgar en cualquier pared o incluso en una rama de un árbol fuerte (ver esquema) ya armado el huerto.

Terminado de armar el huerto, los envases se llenan de tierra de maseta muy bien (la tierra debe formar una cama uniforme y la misma cantidad a lo largo del recipiente de pet), luego se trasplantan las semillas ya germinadas (del cartón de huevo) y se colocan con cuidado que en el huerto, cada especie de hortaliza germinada se sembrará en cada maceta de pet, de la siguiente manera: se agarra una a una de las plántulas con un poco de la tierra que está en el germinador cubriendo las raíces, y se coloca en la maceta de pet haciendo un pequeño orificio con dos dedos y debe tener una profundidad de 2 a 3 cm aproximadamente y ahí se coloca la plántula, cuidando que las raíces queden cubiertas bien de tierra, así se colocarán por maceta de 10 a 20 plántulas acomodadas con una distancia de 5 cm. entre una y otra.

Al terminar el trasplante de todas las semillas (recuerda debes tener una especie por recipiente), coloca tu huerto vertical colgado en una pared, debajo de un domo, en un tronco de un árbol, etc. cuidando que a las plantas les llegue el sol, tengan aire y la humedad debe ser constante, para lograrlo hay que revisar la cantidad de agua de cada maceta de pet cada dos días. Cuidaran las plantas durante 20 días y realizaras el registro de los datos de crecimiento de las plántulas en el cuadro 1.

Esquema 1 Germinador



Cartón de huevo de 30 x 30 cm. con 30 espacios
10 espacios se colocan semillas de rábanos
10 espacios se colocan semillas de cilantro
10 espacios se colocan semillas de acelga.



Se coloca la tierra
en los espacios
hasta la mitad



Se observa así cuando
estén los 30 espacios
con tierra

Estructura del Huerto Vertical Colgante

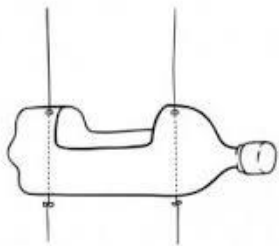
Envase de pet limpio y seco



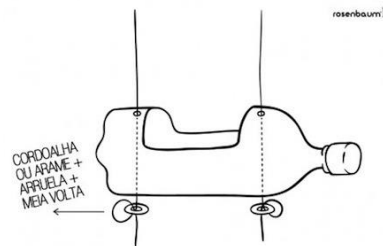
Marcado de rectángulo



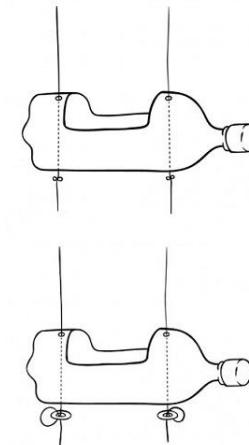
Cortado del rectángulo



Colocar el alambre como se ve en a cada envase como la imagen



Colocar una rondana plana en la parte de la base del envase en cada alambre



Colocar los tres envases de pet alineados uno debajo del otro y dejando la distancia indicada entre ellos

* El primer día de observación para registrar el crecimiento de las plántulas se considera a partir de un día después de realizado el trasplante de plántulas.

Las siguientes imágenes es un ejemplo de cómo deben crecer algunas de las semillas propuestas.



Zanahorias



Lechugas



Acelgas



Rábanos



Cilantro

Fase de cierre:

Los equipos de trabajo llevarán al salón de clases el huerto vertical que elaboraron con el fin de que el profesor revise el logro de los objetivos propuestos.

Entregará cada equipo un reporte del proyecto, el cual contendrá los datos siguientes:

Portada, índice, introducción (aquí estará la respuesta de las preguntas de conocimientos previos), problemática, objetivos, descripción del desarrollo del proyecto desde la colocación de los germinadores hasta el crecimiento de las plantas (evidencia fotográfica), resultados (cuadro de registro de datos y graficas % germinación y crecimiento de las plantas), conclusión y fuentes consultadas.

Fuentes de consulta:

https://www.youtube.com/watch?v=ftXIXg-D_-A

www.ecoagricultor.com

www.ecoagricultor.com/germinacion-hortalizas-semilleros

<https://www.youtube.com/watch?v=1FGDfbqnrP4>

https://www.youtube.com/watch?v=zB_uv92FSOM

La diversidad de los hongos



Estos *Armillaria* color miel forman parte de las porciones visibles de los organismos más grandes del mundo.

La mayoría de los hongos se pueden reproducir tanto sexual como asexualmente

En general, los hongos son capaces de reproducirse tanto asexual como sexualmente. En la mayoría de los casos, la reproducción asexual es la modalidad predeterminada en condiciones estables; en tanto que la reproducción sexual se lleva a cabo principalmente en condiciones de cambio ambiental o de tensión. Por lo común, ambos tipos de reproducción implican la producción de esporas dentro de cuerpos fructíferos especiales que se proyectan por encima del micelio.

La reproducción asexual genera esporas haploides por mitosis

El cuerpo y las esporas de los hongos son haploides (contienen sólo una copia de cada cromosoma). Un micelio haploide produce esporas asexuales haploides por mitosis. Si una espورا asexual se deposita en un lugar favorable, comenzará a dividirse mitóticamente y a desarrollarse hasta formar un nuevo micelio. El resultado de este sencillo ciclo reproducti-



FIGURA 22-2 Algunos hongos expelen esporas

Un hongo estrella de tierra maduro, al ser golpeado por una gota de agua, emite una nube de esporas que se dispersarán en las corrientes de aire.

vo es la rápida producción de clones genéticamente idénticos al micelio original.

La reproducción sexual genera esporas haploides por meiosis

Se forman estructuras diploides únicamente durante un breve periodo mientras ocurre la parte sexual del ciclo de vida de los hongos. La reproducción sexual se inicia cuando un filamento de un micelio entra en contacto con un filamento de un segundo micelio, que es de un tipo de cepa diferente y compatible (los diferentes tipos de cepa de los hongos son análogos a los diferentes sexos de los animales, salvo que suele haber más de dos tipos de cepa). Si las condiciones son idóneas, las dos hifas pueden fusionarse, de tal modo que los núcleos de dos hifas distintas compartan una célula común. Esta fusión de hifas va seguida (inmediatamente en algunas especies, al cabo de cierto tiempo en otras) de la fusión de los núcleos haploides diferentes para formar un cigoto diploide. A continuación, el cigoto sufre meiosis para formar esporas sexuales haploides. Tales esporas se dispersan, germinan y se dividen por mitosis para formar nuevos micelios haploides. A diferencia de los descendientes clonados de las esporas asexuales, estos cuerpos micóticos producidos sexualmente son genéticamente distintos de ambos progenitores.

22.2 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES TIPOS DE HONGOS?

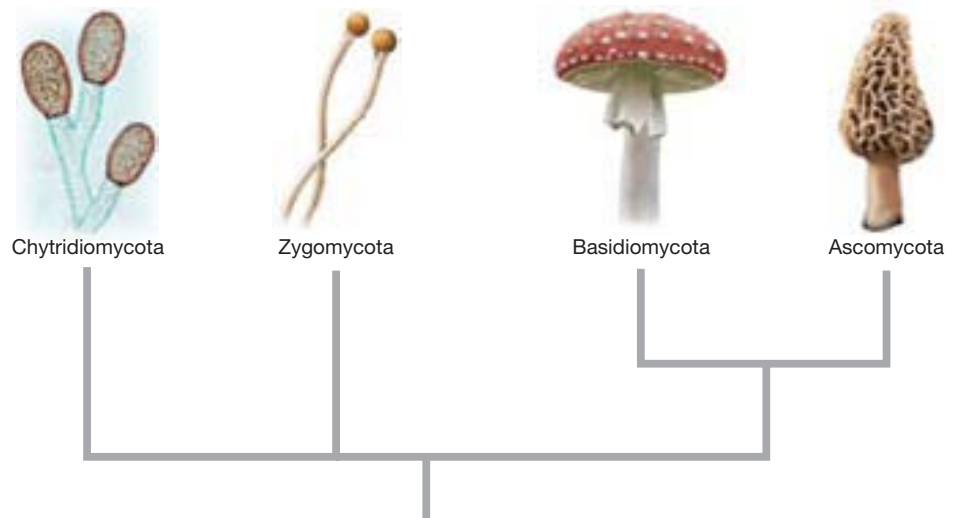
Entre los tres reinos de eucariotas pluricelulares, los hongos y los animales están más estrechamente vinculados entre sí que con las plantas. Es decir, el antepasado común de los hongos y los animales vivió más recientemente que el antepasado común de plantas, animales y hongos (véase la figura 18-6). Una persona que come ensalada de hojas de lechuga con setas está emparentada más cercanamente con la seta de lo que está con la lechuga.

Hay mucha diversidad entre los hongos. Aunque se han descrito cerca de 100,000 especies de hongos, esta cifra representa sólo una fracción de la verdadera diversidad de tales organismos. Cada año se descubren y se describen muchas especies adicionales; los micólogos estiman que el número de especies de hongos que aún no se descubren supera con mucho un millón. Las especies de hongos se clasifican en cuatro *fila*: Chytridiomycota (quitridiomicetos), Zygomycota (cigomicetos), Ascomycota (hongos con saco) y Basidiomycota (hongos de clava) (**FIGURA 22-3**, **tabla 22-1**).

Los quitridiomicetos producen esporas natatorias

A diferencia de otros tipos de hongos, casi todos los quitridiomicetos viven en el agua. Además, los quitridiomicetos (**FIGURA 22-4**

FIGURA 22-3 Árbol evolutivo de los principales grupos de hongos



modernos y les dio origen. El registro de fósiles refuerza esta conclusión, pues los hongos fósiles más antiguos conocidos son quitridiomycetos hallados en rocas de más de 600 millones de años de antigüedad. Los hongos ancestrales muy bien pudieron ser similares en sus hábitos a los quitridiomycetos acuáticos y marinos de nuestros días, de manera que los hongos (como las plantas y los animales) probablemente tuvieron su origen en un medio acuoso antes de colonizar la Tierra.

Casi todas las especies de quitridiomycetos se alimentan con plantas acuáticas muertas u otros residuos en ambientes acuosos, pero algunas especies son parásitos de plantas o animales. Se piensa que uno de estos quitridiomycetos parásitos es una causa importante de la actual mortandad mundial de ranas, que amenaza a muchas especies y, al parecer, ya ha provocado la extinción de varias de ellas. Nadie sabe con exactitud por qué surgió esta enfermedad micótica como causa importante de muerte de las ranas. Una hipótesis sugiere que las poblaciones de ranas sometidas a estrés debido a la contaminación y a otros problemas ambientales podrían ser más susceptibles a las infecciones por quitridiomycetos. (Para mayor información acerca de la disminución de ranas, véase la sección “Guardián de la Tierra: Ranas en peligro” del capítulo 24).

Los cigomicetos se reproducen formando esporas diploides

Los **cigomicetos** viven, por lo general, en el suelo o en material vegetal o animal en descomposición. Entre los cigomicetos hay especies que pertenecen al género *Rhizopus*, causantes de las tan conocidas molestias por la pudrición de la fruta y el moho negro del pan. El ciclo de vida del moho negro del pan, que se reproduce tanto asexual como sexualmente, se representa en la **FIGURA 22-5**. La reproducción asexual de los cigomicetos se inicia con la formación de esporas ha-

ploides en unas estructuras negras llamadas **esporangios**. Estas esporas se dispersan en el aire y, cuando se depositan en un sustrato idóneo (como un trozo de pan, por ejemplo), germinan para formar nuevas hifas haploides.

Si dos hifas de diferentes tipos de cepa de cigomicetos entran en contacto, puede ocurrir una reproducción sexual.



FIGURA 22-4 Filamentos de quítrido

Estos filamentos son del hongo quítrido *Allomyces* que está en plena reproducción sexual. Las estructuras anaranjadas que son visibles en muchos de los filamentos liberan gametos masculinos; las estructuras transparentes liberan gametos femeninos. Los gametos de los quitridiomycetos son flagelados, y estas estructuras reproductoras natatorias contribuyen a la dispersión de los miembros de este filum principalmente acuático.

Tabla 22-1 Principales divisiones de los hongos

Nombre común (filum)	Estructuras reproductoras	Características celulares	Repercusiones en la economía y la salud	Géneros representativos
Quitridiomycetos (Chytridiomycota)	Producen esporas flageladas diploides o haploides	No tienen septos	Contribuyen a la disminución de las poblaciones de ranas	<i>Batrachochytrium</i> (hongo patógeno de las ranas)
Cigomicetos (Zygomycota)	Producen cigosporas sexuales diploides	No tienen septos	Causan la pudrición blanda de la fruta y el moho negro del pan	<i>Rhizopus</i> (causante del moho negro del pan); <i>Pilobolus</i> (hongo del estiércol)
Hongos con saco (Ascomycota)	Forman esporas sexuales en ascas semejantes a sacos	Sí tienen septos	Forman mohos en la fruta; pueden dañar los productos textiles; producen la enfermedad del olmo holandés y la plaga del castaño; incluyen las levaduras y las morillas	<i>Saccharomyces</i> (levadura); <i>Ophiostoma</i> (causante de la enfermedad del olmo holandés)
Hongos de clava (Basidiomycota)	La reproducción sexual comprende la producción de basidiosporas haploides en basidios con forma de clava	Sí tienen septos	Producen tizones y royas en los cultivos; incluyen algunas setas comestibles	<i>Amanita</i> (seta venenosa mushroom); <i>Polyporus</i> (hongo de repisa)

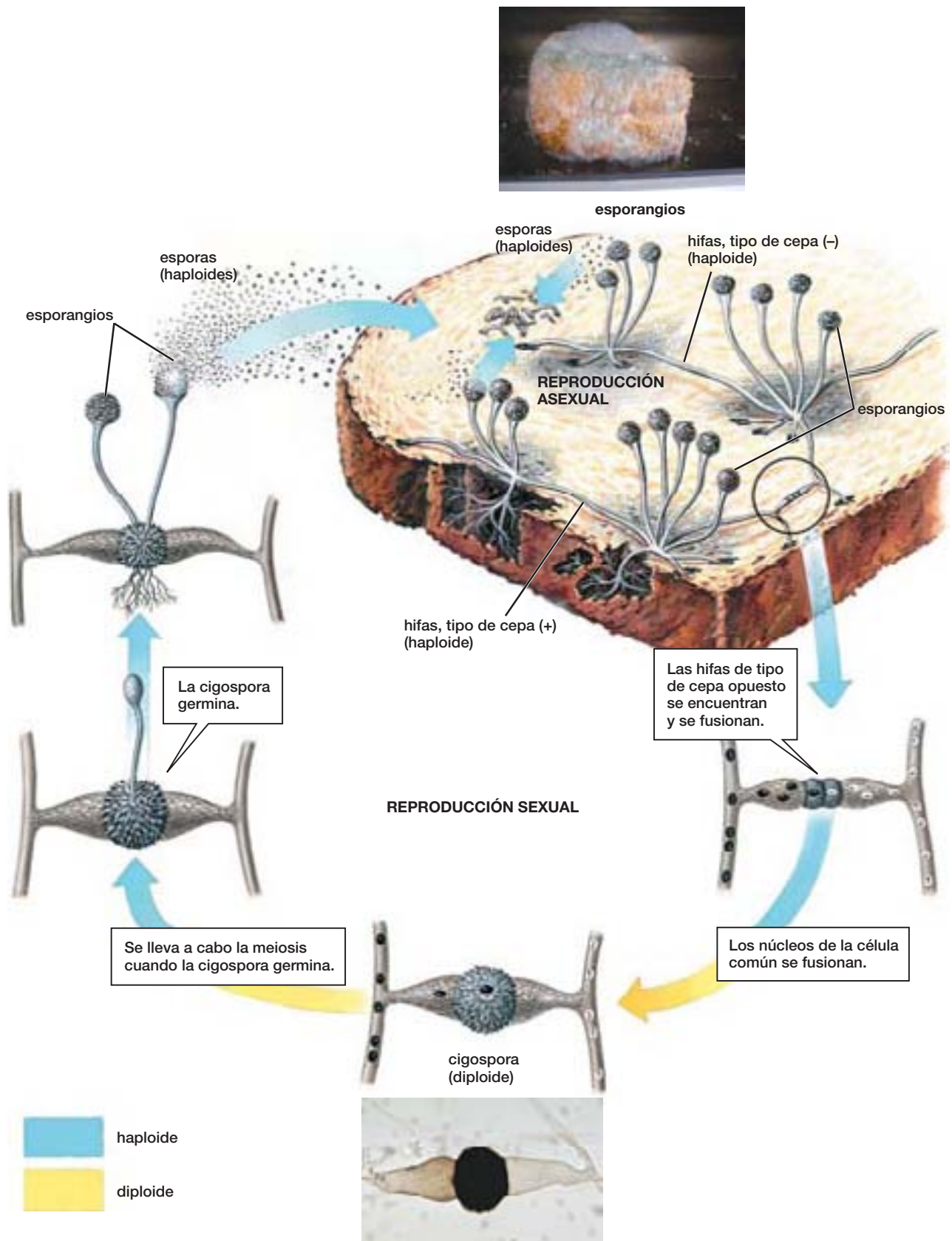


FIGURA 22-5 Ciclo de vida de un cigomiceto

Arriba: Durante la reproducción asexual del moho negro del pan (género *Rhizopus*), las esporas haploides, producidas dentro de los esporangios, se dispersan y germinan en los alimentos como el pan. Abajo: Durante la reproducción sexual, las hifas de diferentes tipos de cepa (designados como + y - en el pan) se ponen en contacto y se fusionan, para producir una cigospora diploide. La cigospora sufre meiosis y germina para producir esporangios. Éstos liberan esporas haploides.

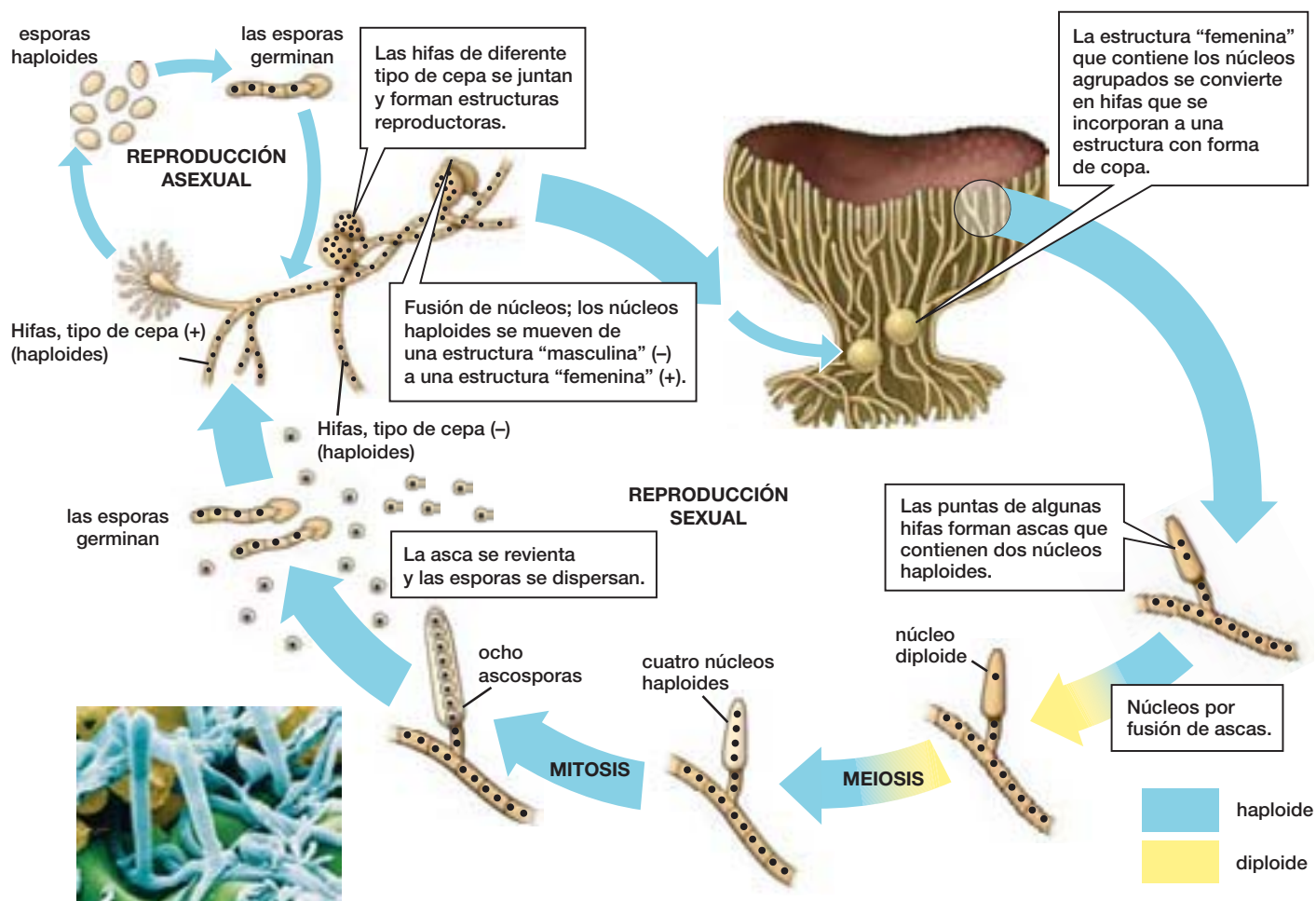


FIGURA 22-6 El ciclo de vida de un ascomiceto común

Parte superior: En la reproducción asexual de los ascomicetos, hifas haploides originan estructuras de tallo que producen esporas haploides. Parte inferior: En la reproducción sexual los núcleos haploides de diferentes tipos de cepa se fusionan para formar cigotos diploides que se dividen y originan ascosporas haploides. Las ascosporas se desarrollan dentro de estructuras llamadas ascas, algunas de las cuales surgen de hifas como las de la fotografía.



a)



b)

FIGURA 22-7 Diversos ascomicetos

a) Cuerpo fructífero del hongo con forma de taza de sombrero escarlata. b) La morilla, un manjar comestible. (Consulta a un experto antes de degustar cualquier hongo silvestre. ¡Algunos son mortíferos!)

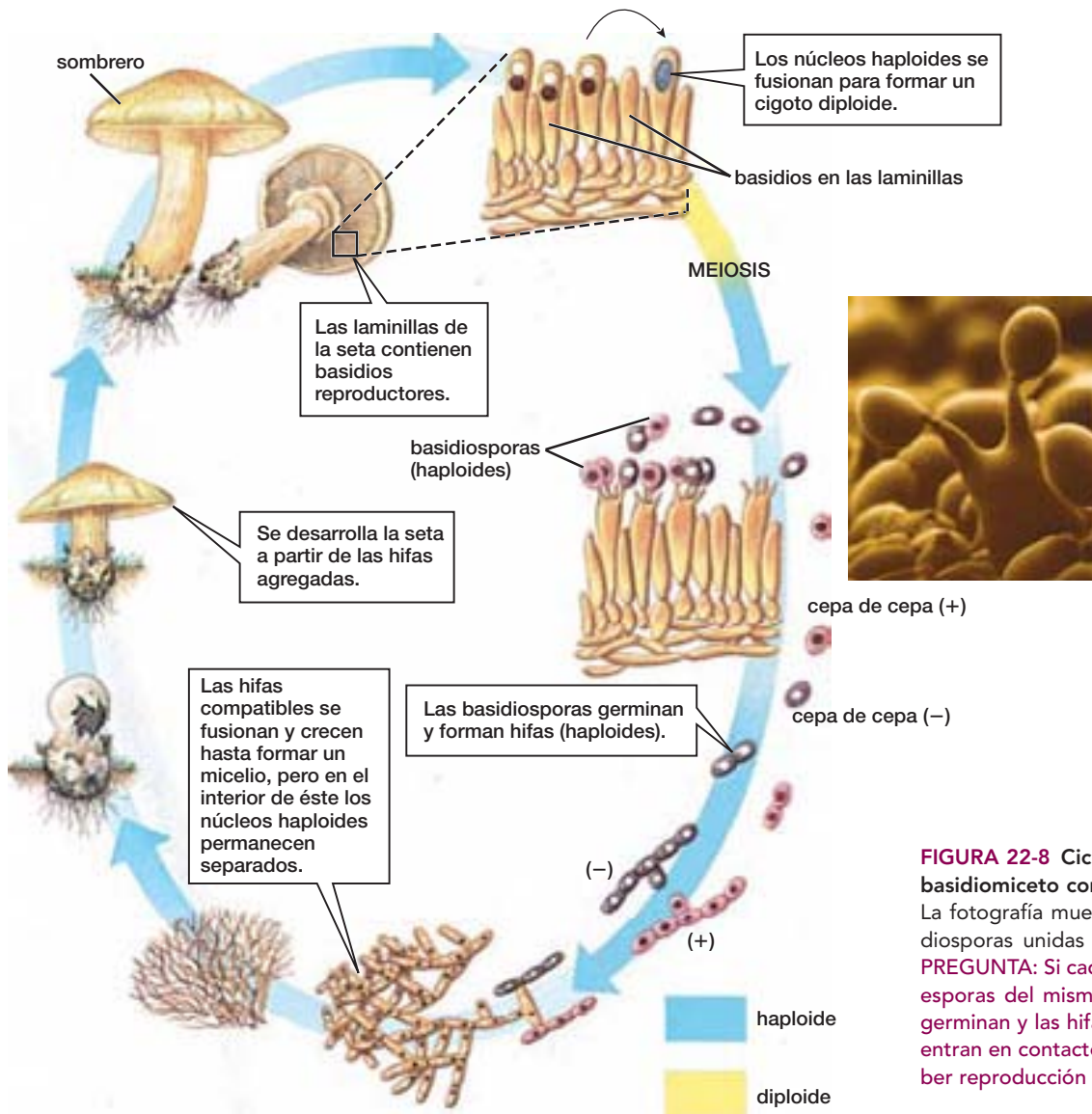


FIGURA 22-8 Ciclo vital de un basidiomiceto común

La fotografía muestra dos basidiosporas unidas a un basidio. **PREGUNTA:** Si cada una de dos esporas del mismo esporangio germinan y las hifas resultantes entran en contacto, ¿podría haber reproducción sexual?

Las dos hifas “se aparean sexualmente” y sus núcleos se fusionan para producir **cigosporas** diploides: las estructuras resistentes de las que este grupo toma su nombre. Las cigosporas pueden permanecer aletargadas durante largos periodos, hasta que las condiciones ambientales sean favorables para su crecimiento. Al igual que las esporas producidas asexualmente, las cigosporas se dispersan y germinan; pero en vez de producir nuevas hifas directamente sufren meiosis. En consecuencia, forman estructuras que contienen esporas haploides, las cuales se transforman en nuevas hifas.

Los ascomicetos forman esporas en una funda semejante a un saco

Los **ascomicetos**, u **hongos con saco**, también se reproducen tanto asexual como sexualmente (FIGURA 22-6). Las esporas asexuales de los hongos con saco se producen en la punta de unas hifas especializadas. Durante la reproducción sexual, las esporas se producen mediante una compleja serie de acontecimientos que se inicia con la fusión de hifas de dos tipos de cepa diferentes. Esta secuencia culmina con la formación de **ascas**, unas estructuras semejantes a sacos que contienen varias esporas y dan nombre a este filum.

Algunos ascomicetos viven en la vegetación forestal en descomposición y forman ya sea hermosas estructuras reproductoras en forma de taza (FIGURA 22-7a) o cuerpos fructíferos corrugados parecidos a setas y que se llaman **morillas** (FIGURA 22-7b). Este filum incluye asimismo muchos de los mohos de colores vistosos que atacan los alimentos almacenados y destruyen la fruta, las cosechas de granos y otras plantas, además de las levaduras (algunos de los pocos hongos unicelulares) y la especie que produce penicilina, el primer antibiótico.

Los basidiomicetos producen estructuras reproductoras con forma de clava

A los **basidiomicetos** se les llama **hongos de clava**, ya que producen estructuras reproductoras en forma de clava. En general, los miembros de este filum se reproducen sexualmente (FIGURA 22-8): hifas de diferentes tipos de cepa se fusionan para formar filamentos, en los cuales cada célula contiene dos núcleos, uno de cada progenitor. Los núcleos mismos no se fusionan hasta que se hayan formado células diploides especializadas, con forma de clava, llamadas **basidios**. Los basidios, a la vez, dan origen a **basidiosporas** reproductoras haploides por meiosis.



a)



b)

FIGURA 22-9 Diversos basidiomicetos

El bejín gigante *Lycoperdon giganteum* puede producir hasta 5 billones de esporas. **b)** Los hongos de repisa, del tamaño de platos para postre, son visibles en los árboles. **c)** Las esporas de los falos hediondos están en el exterior del sombrero mucilaginoso que tiene un olor muy desagradable para los seres humanos, pero que atrae a las moscas, las cuales depositan sus huevecillos en el hongo y, sin proponérselo, dispersan las esporas que se adhieren a su cuerpo. **PREGUNTA:** ¿Las estructuras que se muestran en estas fotografías son haploides o diploides?

La formación de basidios y basidiosporas tiene lugar en cuerpos fructíferos especiales que conocemos como champiñones, bejines, hongos de repisa y falos hediondos (**FIGURA 22-9**). Estas estructuras reproductoras son en realidad agregados densos de hifas que emergen en condiciones idóneas de un micelio subterráneo de gran tamaño. En la cara inferior de los champiñones o setas hay unas laminillas que parecen hojas y donde se producen basidios. Las basidiosporas se liberan por miles de millones desde las laminillas de las setas o a través de aberturas de la parte superior de los bejines, y se dispersan por el viento y el agua.

Si cae en suelo fértil, una basidiospora de seta puede germinar y formar hifas haploides. Estas hifas crecen hacia afuera a partir de la espora original, siguiendo una distribución aproximadamente circular, conforme las hifas más viejas del centro mueren. Periódicamente, el cuerpo subterráneo envía hacia arriba numerosas setas, que surgen en una distribución anular conocida como anillo de hada (**FIGURA 22-10**). El diámetro del anillo de hada indica la edad aproximada del hongo: cuanto más grande sea el diámetro del anillo, más viejo será el hongo que le da origen. Se estima que algunos anillos tienen 700 años de edad. Los micelios de los basidiomicetos pueden alcanzar edades aún mayores. Por ejemplo, los investigadores que descubrieron el *Armillaria gigante* en Oregon estiman que a éste le tomó al menos 2400 años crecer hasta su tamaño actual.



c)

largo plazo se denominan *simbióticas*. En muchos casos el hongo de una relación simbiótica es parasitario y daña a su huésped. No obstante, algunas relaciones simbióticas son mutuamente benéficas.

Los líquenes se componen de hongos que viven con algas o bacterias fotosintéticas

Los **líquenes** son asociaciones simbióticas entre hongos y algas verdes unicelulares o cianobacterias (**FIGURA 22-11**

22.3 ¿DE QUÉ MANERA INTERACTÚAN LOS HONGOS CON OTRAS ESPECIES?

Muchos hongos viven en contacto directo con otras especies durante periodos prolongados. Tales relaciones estrechas y de



FIGURA 22-10 Anillo de hada de setas

Las setas surgen de un micelio micótico subterráneo y forman un anillo de hada, que crece hacia afuera a partir de un punto central donde germinó una sola espora, tal vez siglos antes.

zada por el descubrimiento de que, en los líquenes que incluyen algas simbiotes, las hifas micóticas penetran efectivamente las paredes celulares de las algas, de forma muy semejante a las hifas de los hongos que parasitan plantas.

Miles de especies de hongos (principalmente ascomicetos) forman líquenes (**FIGURA 22-12**), cada una en combinación con un número mucho más reducido de especies de algas o bacterias. Juntos, estos organismos forman unidades tan resistentes y autosuficientes que los líquenes se cuentan entre los primeros seres vivos en colonizar las islas volcánicas de reciente formación. Asimismo los líquenes de brillantes colores han invadido otros hábitat inhóspitos, desde desiertos hasta el Ártico, y crecen incluso en la roca desnuda. Como es de suponer, en ambientes extremos los líquenes crecen con gran lentitud; así, por ejemplo, las colonias árticas se expanden a razón

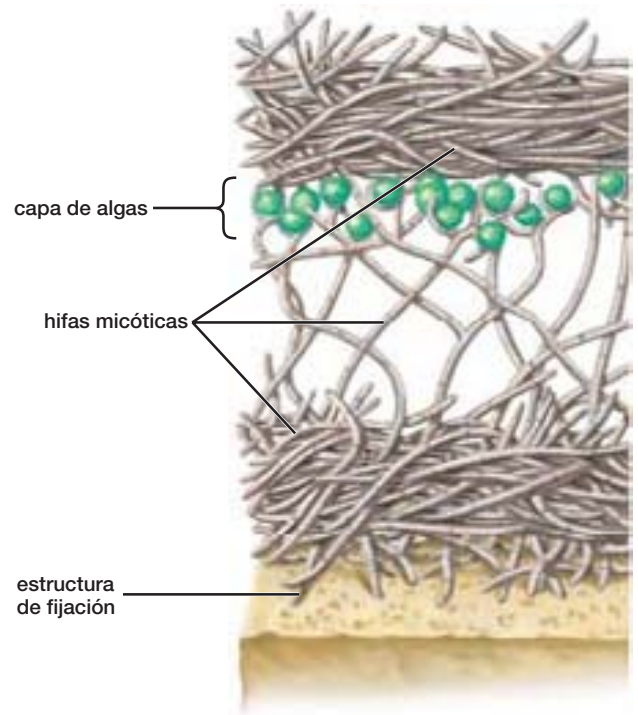


FIGURA 22-11 El líquen: una asociación simbiótica

La mayoría de los líquenes tienen una estructura en capas, limitada en las partes superior e inferior por una capa externa de hifas micóticas. Las estructuras de fijación formadas por hifas micóticas emergen de la capa inferior y anclan el líquen a una superficie, como una roca o un árbol. Una capa de algas donde las algas y los hongos crecen en estrecha asociación reside debajo de la capa superior de hifas.



a)



b)

FIGURA 22-12 Diversos líquenes

a) Un líquen incrustado de vistosos colores, que crece sobre una roca seca, ilustra la tenaz independencia de esta combinación simbiótica de hongo y alga.



FIGURA 22-13 Las micorrizas favorecen el crecimiento de las plantas

Hifas de micorrizas entrelazadas en torno a la raíz de un álamo temblón. Las plantas crecen mucho mejor en asociación simbiótica con estos hongos, que ayudan a poner los nutrientes y el agua a disposición de las raíces.

de 2.5 a 5 centímetros cada 1000 años. Pese a su lento crecimiento, los líquenes persisten durante largos periodos; algunos líquenes del Ártico tienen más de 4000 años de edad.

Las micorrizas son hongos asociados con las raíces de plantas

Las **micorrizas** son importantes asociaciones simbióticas entre hongos y raíces de plantas. Se sabe de más de 5000 especies de hongos micorrícicos (que incluyen representantes de todos los grupos de hongos principales) que crecen en asociación íntima con alrededor del 80 por ciento de todas las plantas con raíces, incluyendo la mayoría de los árboles. Las hifas de los hongos micorrícicos rodean la raíz de la planta e invaden sus células (**FIGURA 22-13**).

Las micorrizas ayudan a las plantas a alimentarse

La asociación entre plantas y hongos beneficia a ambos socios. Los hongos micorrícicos reciben moléculas de azúcar ricas en energía que las plantas producen por fotosíntesis y que pasan de sus raíces al hongo. En cambio, el hongo digiere y absorbe minerales y nutrientes orgánicos del suelo, y pasa algunos de ellos directamente a las células de la raíz. Los experimentos demuestran que el fósforo y el nitrógeno, nutrientes fundamentales para el crecimiento vegetal, están entre las moléculas que las micorrizas llevan del suelo a las raíces. Estos hongos también absorben agua y la transfieren a la planta, lo cual constituye una ventaja para ésta en los suelos arenosos secos.

La vida común entre las micorrizas y las plantas tiene una contribución esencial para la vitalidad de las plantas terrestres. Las plantas que carecen de micorrizas suelen ser más pequeñas y más débiles que las plantas con hongos micorrícicos. De manera que la presencia de micorrizas incrementa la productividad general de las comunidades vegetales en la Tierra y, por ende, aumenta la capacidad para sustentar animales y otros organismos que dependen de las plantas.

Las micorrizas ayudan a las plantas a probar la tierra

Algunos científicos piensan que las asociaciones micorrícicas pudieron haber sido importantes en la invasión de la tierra por las plantas hace más de 400 millones de años. Una rela-

ción así entre un hongo acuático y una alga verde (antepasado de las plantas terrestres) quizás haya ayudado al alga a adquirir el agua y los nutrientes minerales que necesitaba para sobrevivir fuera del agua.

El registro de fósiles es congruente con la hipótesis de que las micorrizas jugaron un papel importante en la colonización de la tierra por parte de las plantas. El fósil más antiguo de los hongos terrestres tiene aproximadamente 460 millones de años de antigüedad, casi la misma edad que los fósiles más viejos de las plantas terrestres. Tales hallazgos sugieren que los hongos y las plantas invadieron la tierra al mismo tiempo y quizá juntos. Además, los fósiles vegetales que se formaron poco después de dicha invasión muestran estructuras de raíces distintivas, parecidas a aquellas que se forman actualmente como respuesta ante la presencia de micorrizas. Esos fósiles muestran que micorrizas totalmente desarrolladas estuvieron presentes muy al principio de la evolución de las plantas terrestres y sugieren que una asociación planta-hongo más sencilla quizás ocurrió incluso antes.

Los endófitos son hongos que viven dentro de los tallos y las hojas de las plantas

La íntima asociación entre hongos y plantas no se limita a las micorrizas de la raíz. También se han encontrado hongos que viven dentro de tejidos que habitan en la superficie terrestre de prácticamente todas las especies vegetales en que se ha buscado su presencia. Algunos de estos **endófitos** (organismos que viven dentro de otro organismo) son parásitos que provocan enfermedades de las plantas; sin embargo, muchos —tal vez la mayoría— son benéficos para el huésped. Los casos mejor estudiados de endófitos micóticos benéficos son las especies de ascomicetos que viven dentro de las células de las hojas de muchas especies de césped. Estos hongos producen sustancias que son desagradables o tóxicas para los insectos y los mamíferos de pastoreo, y ayuda a proteger al césped de tales depredadores.

La protección contra depredadores que brindan los endófitos micóticos resulta tan suficientemente eficaz que los científicos están trabajando arduamente para descubrir una forma de desarrollar pastos que no tengan endófitos. Los caballos, las vacas y otros animales importantes de pastoreo suelen evitar comer césped que contienen endófitos. Cuando sólo está disponible como alimento el césped que contiene endófitos, los animales que lo consumen sufren de mala salud y lento crecimiento.

Algunos hongos son recicladores importantes

Al igual que las micorrizas y los endófitos, algunos hongos juegan un papel importante en el crecimiento y la conservación del tejido vegetal. No obstante, otros hongos juegan un papel similar en su destrucción. Únicos entre los organismos, los hongos pueden digerir tanto lignina como celulosa, las moléculas que forman la madera. Cuando un árbol u otra planta leñosa muere, sólo los hongos son capaces de descomponer sus restos.

Los hongos son los “empleados funerarios” de nuestro planeta, pues consumen no sólo madera muerta sino los “cadáveres” de todos los reinos. Los hongos que son **saprófitos** (que se alimentan de organismos muertos) regresan las sustancias componentes del tejido muerto a los ecosistemas de los cuales provienen. Las actividades digestivas extracelulares de los



FIGURA 22-14 Tizón del maíz

Este basidiomiceto patógeno ocasiona pérdidas por millones de dólares cada año en los cultivos de maíz. No obstante, incluso una plaga como el tizón del maíz tiene sus admiradores. En México, este hongo se conoce con el nombre de *huitlacoche* y se considera una delicia culinaria.

hongos saprofitos liberan nutrientes que las plantas pueden utilizar. Si los hongos y las bacterias desaparecieran repentinamente, las consecuencias serían desastrosas. Los nutrientes permanecerían encerrados en los cuerpos de plantas y animales muertos, el reciclaje de los nutrientes se detendría, la fertilidad del suelo disminuiría rápidamente, y los restos tanto orgánicos como no orgánicos se acumularían. En pocas palabras, el ecosistema se colapsaría.

22.4 ¿CÓMO AFECTAN LOS HONGOS A LOS SERES HUMANOS?

Por lo general, la gente piensa poco en los hongos, salvo quizá cuando aprecia ocasionalmente y por un momento el sabor de los champiñones en una pizza. Sin embargo, los hongos desempeñan un papel importante en la vida humana.

Los hongos atacan plantas que son importantes para las personas

Los hongos son causa de la mayoría de las enfermedades de las plantas y algunas de las plantas que infectan son importantes para los seres humanos. Por ejemplo, los hongos patógenos tienen un efecto devastador en la provisión de alimentos del mundo. Las plagas a vegetales por los basidiomicetos, que llevan los descriptivos nombres de *royas* y *tizones*, son particularmente nocivas y provocan daños por miles de millones de dólares cada año en los cultivos de cereales (FIGURA 22-14). Las enfermedades micóticas influyen asimismo en la apariencia de nuestros paisajes. El olmo americano y el castaño americano, dos especies de árboles que hace tiempo sobresalían en los parques, patios y bosques de Estados Unidos, fueron destruidos en escala masiva por los ascomicetos que causan la enfermedad del olmo holandés y la plaga del castaño. Actualmente pocos estadounidenses recuerdan las gráciles formas de los grandes olmos y castaños, pues casi han desaparecido por completo del paisaje.

Los hongos continúan atacando los tejidos vegetales mucho después de haber sido cosechados para uso humano. Para consternación de los propietarios de viviendas, una multitud de especies de hongos atacan la madera y la pudren. Ciertos mohos ascomicetos secretan las enzimas celulasa y proteasa, que causan importantes daños a los productos textiles de algodón y lana, especialmente en los climas húmedos y calurosos donde prosperan los mohos.

No obstante, los efectos de los hongos en la agricultura y la silvicultura no son todos negativos. Los hongos parásitos que atacan insectos y otras plagas de artrópodos pueden ser un importante aliado en el combate contra las plagas (FIGURA 22-15a). Los agricultores que desean reducir su dependencia de los plaguicidas químicos caros y tóxicos están usando cada vez más los métodos biológicos para el control de plagas, in-



a)



b)

FIGURA 22-15 Un útil hongo parásito

Los hongos patógenos pueden ser útiles para los seres humanos. Por ejemplo, un hongo como a) el *Cordyceps*, una especie que mató a un saltamontes, es utilizado por los granjeros para controlar las plagas de insectos. b) Algunos hongos podrían utilizarse para proteger a los seres humanos contra las enfermedades. Un mosquito portador de la malaria infectado por un *Beauveria* se transforma de un animal saludable (parte superior) en un cadáver incrustado en un hongo en menos de dos semanas.

cluyendo las aplicaciones de “fungicidas”. En la actualidad se usan hongos patógenos para combatir diversas plagas, como termitas, el gorgojo del arroz, la oruga de librea, los áfidos y los ácaros de los cítricos. Además, los biólogos han descubierto que ciertos hongos atacan y matan especies de mosquitos que transmiten la malaria (FIGURA 22-15b). Se planea clasificar estos hongos para luchar contra una de las enfermedades más mortíferas del mundo.

Los hongos producen enfermedades humanas

El reino Fungi incluye especies parásitas que atacan directamente a los seres humanos. Entre las enfermedades micóticas más conocidas están las provocadas por ascomicetos que atacan la piel: pie de atleta, tiña inguinal y sarna. Estas enfermedades, aunque son desagradables, no ponen en riesgo la vida y, por lo general, se tratan eficazmente con ungüentos antimicóticos. Un tratamiento oportuno habitualmente consigue combatir otra enfermedad micótica común: las infecciones vaginales causadas por la levadura *Candida albicans* (FIGURA 22-16). Los hongos también infectan los pulmones cuando la víctima inhala esporas de los hongos causantes de enfermedades como la fiebre de los valles y la histoplasmosis. Al igual que otras infecciones por hongos, cuando se diagnostican oportuna y correctamente, estas enfermedades se pueden combatir con medicamentos antimicóticos; sin embargo, si no se tratan, llegan a convertirse en infecciones sistémicas graves. El cantante Bob Dylan, por ejemplo, enfermó gravemente de histoplasmosis cuando el hongo infectó su pericardio, es decir, la membrana que envuelve el corazón.

Los hongos pueden producir toxinas

Además de su papel como agentes de enfermedades infecciosas, algunos hongos producen toxinas peligrosas para los seres humanos. De particular interés son las toxinas que producen los hongos que crecen sobre los granos y otros alimentos que fueron almacenados en condiciones de excesiva humedad. Por ejemplo, los mohos del género *Aspergillus* producen unos compuestos cancerígenos altamente tóxicos conocidos como aflatoxinas. Algunos alimentos, como los cacahuates, parecen especialmente susceptibles al ataque por *Aspergillus*. Desde que se descubrieron las aflatoxinas en la década de 1960, los cultivadores y procesadores de alimentos han ideado métodos para reducir el crecimiento de *Aspergillus* en las cosechas almacenadas, de manera que se logró disminuir considerable-

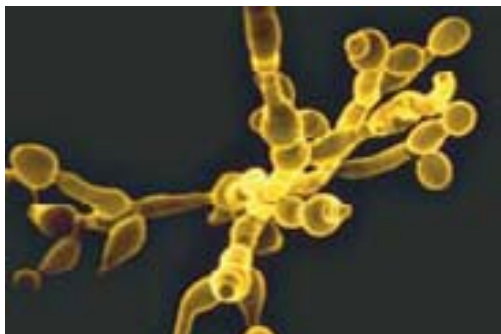


FIGURA 22-16 La insólita levadura

Las levaduras son unos ascomicetos fuera de lo común, normalmente no filamentosos, que se reproducen casi siempre por gemación. La levadura que aquí se muestra es *Candida*, una causa frecuente de infecciones vaginales.

mente la cantidad de aflatoxina en la mantequilla de cacahuete que consumimos.

Un hongo productor de toxinas tristemente célebre es el ascomiceto *Claviceps purpurea*, que infecta las plantas de centeno y causa una enfermedad conocida como cornezuelo del centeno. Este hongo produce varias toxinas que afectan a los seres humanos, cuando el centeno infectado se muele para convertirlo en harina y luego se consume. Esto sucedió con mucha frecuencia en el norte de Europa durante la Edad Media, con efectos devastadores. En ese tiempo, la intoxicación por cornezuelo era generalmente mortal, pero antes de morir, las víctimas experimentaban unos síntomas terribles. Una de las toxinas del cornezuelo es vasoconstrictora, lo cual significa que constriñe los vasos sanguíneos y reduce el flujo de sangre. El efecto puede ser tan intenso que genera gangrena y las extremidades se consumen y caen en pedazos. Otras toxinas del cornezuelo producen síntomas como sensación que-mante, vómito, espasmos convulsivos y alucinaciones vívidas. En la actualidad, las nuevas técnicas agrícolas han permitido eliminar eficazmente la intoxicación por cornezuelo del centeno; aunque permanece un legado en la forma de la droga alucinógena LSD, que es un derivado de un componente de las toxinas del cornezuelo.

Muchos antibióticos se derivan de los hongos

Los hongos también han tenido repercusiones positivas en la salud humana. La era moderna de los medicamentos antibióticos que salvan vidas se inició con el descubrimiento de la penicilina, que es producida por un moho ascomiceto (FIGURA 22-17; véase la figura 1-5). La penicilina todavía se utiliza, junto con otros antibióticos derivados de hongos, como la oleandomicina y la cefalosporina, para combatir enfermedades bacterianas. Otros fármacos importantes también provienen de los hongos, entre ellos la ciclosporina, que se utiliza para suprimir la respuesta inmunitaria durante los trasplantes de órganos y reducir así la tendencia del organismo a rechazar el órgano extraño.



FIGURA 22-17 *Penicillium*

Penicillium que crece sobre una naranja. Las estructuras reproductoras, que recubren la superficie del fruto, son visibles; debajo de ellas, las hifas extraen alimento del interior. El antibiótico penicilina se aisló por primera vez de este hongo. **PREGUNTA:** ¿Por qué algunos hongos producen químicos antibióticos?

GUARDIÁN DE LA TIERRA

El caso de las setas que desaparecen

Los micólogos, es decir, los científicos que estudian los hongos, y los cocineros gastronómicos parecen tener poco en común; no obstante, en tiempos recientes los ha unido una preocupación común: las setas están disminuyendo rápidamente en términos de número, tamaño promedio y diversidad de especies. Aunque el problema se reconoce con más facilidad en Europa, donde la gente recolecta setas silvestres desde hace siglos, los micólogos estadounidenses están alarmados, pues también en Estados Unidos podría estar ocurriendo esa disminución. ¿Por qué están desapareciendo las setas? La recolección excesiva de setas comestibles no es la causa, porque las formas tóxicas están sufriendo el mismo fenómeno. La pérdida es evidente en cualquier tipo de bosques maduros, por lo que los cambios en las prácticas de administración de los bosques no podrían ser la causa. El agente más probable es la contaminación del

aire, porque la pérdida de setas es máxima donde el aire presenta los niveles más altos de ozono, azufre y nitrógeno.

Aunque los micólogos aún no establecen con exactitud cómo daña la contaminación del aire a los hongos, los indicios son claros. En Holanda, por ejemplo, el número promedio de especies de hongos por cada 1000 metros cuadrados ha descendido de 37 a 12 en las últimas décadas. Veinte de las 60 especies estudiadas en Inglaterra están disminuyendo. La preocupación es aún mayor por el hecho de que los hongos más afectados son aquellos cuyas hifas forman asociaciones micorrízicas con las raíces de los árboles. Los árboles con menos micorrizas tienen menor resistencia a las sequías periódicas o a las rachas de frío intenso. Debido a que la contaminación del aire también daña directamente los bosques, la pérdida adicional de las micorrizas podría ser devastadora.

Los hongos hacen importantes aportaciones a la gastronomía

Los hongos hacen una importante contribución a la nutrición humana. Los componentes más evidentes de esta aportación son los hongos que consumimos directamente: champiñones y setas basidiomicetos tanto silvestres como cultivados, y ascomicetos como las morillas y la rara y apreciada trufa (véase la sección: “Conexiones evolutivas: El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos”). El papel de los hongos en la cocina, no obstante, también implica manifestaciones menos visibles. Por ejemplo, algunos de los quesos más famosos del mundo, como el Roquefort, el Camembert, el Stilton y el Gorgonzola, deben sus sabores característicos a los mohos ascomicetos que crecen en ellos mientras maduran. Quizá los contribuyentes micóticos más importantes y omnipresentes al suministro de alimentos, sin embargo, sean los ascomicetos unicelulares (unas pocas especies son basidiomicetos) conocidos como *levaduras*.

El vino y la cerveza se elaboran utilizando levaduras

que las levaduras cumplan su cometido es necesario hacer germinar los granos de cebada (recuérdese que los granos son en realidad semillas). Con la germinación, las plantas producen carbohidratos, por lo que la cebada germinada constituye una excelente fuente de alimento para las levaduras. Al igual que en el caso del vino, la fermentación convierte los azúcares en alcohol, pero los cerveceros atrapan el dióxido de carbono que se forma al mismo tiempo, para dar a la cerveza su característica carbonatación formadora de burbujas.

Las levaduras hacen que el pan se esponje

En la elaboración del pan, el dióxido de carbono es el producto de fermentación más importante. Las levaduras que se agregan a la masa de pan producen tanto alcohol como dióxido de carbono; pero el alcohol se evapora durante el horneado. En cambio, el dióxido de carbono queda atrapado en la masa, donde forma las burbujas que dan al pan su textura ligera y esponjosa (y nos salva de tener que comer emparedados de galleta toda la vida). Así, la próxima vez que usted disfrute de una rebanada de pan francés con queso Camembert y un buen vaso de Chardonnay, o una rebanada de pizza acompañada de una botella muy fría de su cerveza favorita, será bueno agradecerlo en silencio a las levaduras. Nuestra dieta sería sin duda mucho más insípida sin la ayuda que nos brindan nuestros socios micóticos.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos

La selección natural, ejercida a lo largo de millones de años sobre las diversas formas de hongos, ha producido algunas notables adaptaciones que permiten a los hongos dispersar sus esporas y obtener nutrientes.

La trufa, rara y deliciosa

Aunque muchos hongos son apreciados como alimento, ninguno se busca con tanta avidez como la trufa (**FIGURA 22-18**)

ENLACES CON LA VIDA

Recolecta con cuidado

A principios de la década de 1980, los médicos en un hospital de California notaron una curiosa tendencia. En unos cuantos meses se incrementó significativamente el número de pacientes que ingresaban para recibir el tratamiento por envenenamiento, y muchos de éstos murieron. ¿Qué causó ese repentino brote de envenenamiento? La investigación posterior reveló que en la mayoría de los casos las víctimas fueron inmigrantes recientes de Laos o Camboya. Luchando por adaptarse a su nuevo país, se sintieron maravillados al descubrir que los bosques californianos contenían setas que eran muy parecidas a las que colectaban para alimentarse en Asia. Por desgracia, la semejanza era sólo superficial; las setas eran en efecto especies venenosas. La búsqueda de estos inmigrantes para encontrar "alimentos emocionalmente nostálgicos" tuvo consecuencias funestas.

En general, los inmigrantes de países donde los hongos se colectan comúnmente han demostrado ser especialmente susceptibles al envenenamiento con setas tóxicas. Sin embargo, no son las únicas víctimas: cada año varios niños pequeños, recolectores inexpertos e invitados desafortunados a comidas gourmet realizan viajes inesperados al hospital después de ingerir setas silvestres venenosas.

Tal vez resulte divertido y gratificante recolectar setas silvestres, las cuales ofrecen algunos de los sabores más ricos y complejos que el ser humano puede experimentar. Pero si tú decides salir a recolectar, ten mucho cuidado porque algunos de los venenos más mortíferos conocidos están en las setas. En especial destacan por su veneno ciertas especies del género *Amanita*, cuyos sugerentes nombres comunes son sombrero de la muerte y ángel destructor (FIGURA E22-1). Tales nombres se ganaron a pulso, ya que incluso una sola mordida a alguna de estas

setas podría ser mortal. El daño por las toxinas de la *Amanita* es más severo en el hígado, donde se suelen acumular las toxinas. A menudo las víctimas de envenenamiento con *Amanita* logran salvarse únicamente trasplantándoles un hígado. Así que asegúrate de proteger tu salud invitando a un experto a que te acompañe en tus expediciones en busca de setas.



FIGURA E22-1 El ángel destructor

El basidiomiceto *Amanita virosa* produce setas que pueden resultar mortales.



FIGURA 22-18 La trufa

Las trufas, unos ascomicetos poco comunes (cada uno del tamaño de una pequeña manzana), son un manjar gastronómico.

Cuando los cerdos excitados desentierran y devoran la trufa, millones de esporas se dispersan en el aire. Los recolectores de trufas utilizan cerdos con bozal para buscar a su presa. ¡Un buen cerdo trufero puede oler una trufa del subsuelo a 50 metros de distancia! En la actualidad los perros son los asistentes más comunes de los buscadores de trufas.

El método de la escopeta para dispersar esporas

Si uno se acerca lo suficiente a un montón de estiércol de caballo para escudriñarlo, quizá consiga observar las hermosas y delicadas estructuras reproductoras del cigomiceto *Pilobolus* (FIGURA 22-19). No obstante su finura, se trata en realidad de escopetas micóticas. Los bulbos transparentes, rematados con estuches de esporas negros y pegajosos, se extienden a partir de hifas que penetran en el estiércol. Conforme los bulbos maduran, la concentración de azúcar en su interior aumenta y succionan agua por ósmosis. Entre tanto, el bulbo comienza a debilitarse inmediatamente por debajo del sombrero. De improviso, y como un globo inflado en exceso, el bulbo revienta y lanza su estuche de esporas hasta una altura de un metro.

Las esporas arrastradas por el aire quizá se depositen en algunas hojas de césped, porque el *Pilobolus*

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO HONGOS DESCOMUNALES



¿Por qué el hongo *Armillaria* crece tanto? En parte su tamaño se debe a su capacidad para formar rizomorfos, los cuales consisten en hifas agrupadas dentro de una corteza protectora. Las hifas así encerradas llevan nutrimentos a los rizomorfos, y les permiten extenderse grandes distancias por las áreas con insuficiencia de nutrimentos, para obtener nuevas fuentes de alimentos. Los hongos *Armillaria*, entonces, pueden crecer más allá de los límites de una región específica rica en alimento.

Otro factor que puede contribuir con el enorme tamaño del *Armillaria* de Oregon es el clima donde se encuentra. En esta región árida, los cuerpos fructíferos micóticos se

forman sólo rara vez, de manera que el colosal *Armillaria* rara vez produce esporas. En ausencia de esporas que podrían desarrollarse como nuevos individuos, el individuo existente enfrenta poca competencia por los recursos, y está en libertad para crecer y cubrir una área cada vez más grande.

El descubrimiento del espécimen de Oregon es únicamente el último capítulo de una benéfica "guerra de los hongos" a largo plazo, que empezó en 1992 con el descubrimiento de la primera seta enorme, un *Armillaria gallica* de 150,000 m² que crece en Michigan. Desde ese importante descubrimiento inicial, los grupos de investigadores en Michigan, Washington, y Oregon se han enfrascado en una amistosa competencia para encontrar el hongo más grande. ¿Algún

día se romperá el récord existente? Permanece atento.

Piensa en esto Como todo el *Armillaria* de Oregon creció a partir de una sola espora, todas sus células son genéticamente idénticas. Sin embargo, no todas sus partes son fisiológicamente dependientes entre sí, por lo que es poco probable que alguna sustancia recorra los 9 kilómetros cuadrados del micelio. Tampoco hay una epidermis, membrana o corteza que cubra todo el micelio y lo aisle del ambiente como una unidad. ¿La uniformidad genética del hongo es evidencia suficiente para considerarse un solo individuo, o se requiere de una mayor integración fisiológica? ¿Crees que sea válido el título de "el organismo más grande del mundo"?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

22.1 ¿Cuáles son las principales características de los hongos?

Los cuerpos micóticos se componen generalmente de hifas filamentosas, que son multicelulares o multinucleadas, y forman grandes redes entrelazadas llamadas micelios. Los núcleos de los hongos por lo común son haploides. Una pared celular de quitina envuelve las células micóticas.

Todos los hongos son heterótrofos, secretan enzimas digestivas afuera de su cuerpo y absorben los nutrientes que se liberan.

Los hongos se reproducen de formas variadas y complejas. La reproducción asexual se lleva a cabo ya sea por fragmentación del micelio o por formación de esporas asexuales. Las esporas sexuales se forman una vez que los núcleos haploides se fusionan para formar un cigoto diploide, que sufre meiosis para formar esporas sexuales haploides. Las esporas, tanto asexuales como sexuales, producen micelios haploides por mitosis.

Web tutorial 22.1 La estructura y reproducción de los hongos

22.2 ¿Cuáles son los principales grupos de hongos?

Los principales *fila* de los hongos, así como sus características, se resumen en la tabla 22-1.

Web tutorial 22.2 Clasificación de los hongos

22.3 ¿Cómo interactúan los hongos con otras especies?

Un líquen es una asociación simbiótica entre un hongo y algas o cianobacterias. Esta combinación autosuficiente puede colonizar rocas desnudas. Las micorrizas son asociaciones entre hongos y las raíces de casi todas las plantas vasculares. El hongo obtiene sus nutrientes fotosintéticos de las raíces de la planta y, a cambio, lleva agua y nutrientes del suelo circundante al interior de la raíz. Los endófitos son hongos que crecen dentro de las hojas o los tallos de las plantas, y que ayudan a proteger las plantas que los tienen. Los hongos saprofitos son agentes de descomposición sumamente importantes en los ecosistemas. Sus cuerpos filamentosos penetran en los suelos ricos y en el material orgánico en descomposición, y liberan nutrientes por digestión extracelular.

22.4 ¿Cómo afectan los hongos a los seres humanos?

La mayoría de las enfermedades de las plantas se deben a hongos parásitos. Algunos hongos parásitos ayudan a combatir las plagas de insectos en los cultivos. Otros producen enfermedades humanas, como la tiña, el pie de atleta y las infecciones vaginales ordinarias. Algunos hongos producen toxinas que pueden dañar a los seres humanos. Pese a ello, los hongos confieren variedad a las opciones alimentarias humanas; en tanto que la fermentación con hongos permite elaborar vino, cerveza y pan.

TÉRMINOS CLAVE

ascomiceto pág. 429

asca pág. 429

basidio pág. 429

basidiomiceto pág. 429

basidiospora pág. 429

cigomiceto pág. 426

cigospora pág. 429

espora pág. 425

esporangio pág. 426

hifa pág. 424

hongo con saco

pág. 429

hongo de clava pág. 429

líquen pág. 430

micelio pág. 424

micorriza pág. 432

quitridiomicetos

pág. 425

septo pág. 424

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Describe la estructura del cuerpo micótico. ¿En qué difieren las células micóticas de la mayoría de las células vegetales y animales?

¿Qué parte del cuerpo micótico está representada por las setas, los bejines y otras estructuras similares? ¿Por qué sobresalen del suelo dichas estructuras?

¿Cuáles son dos enfermedades de las plantas, causadas por hongos parásitos, que han tenido enormes repercusiones en los bosques de Estados Unidos? ¿A qué *fila* pertenecen estos hongos?

Menciona algunos hongos que ataquen los cultivos. ¿A qué *filum* pertenece cada uno?

5. Describe la reproducción asexual de los hongos.

6. ¿Cuál es el ingrediente estructural principal de la pared celular de los hongos?

7. Señala los principales *fila* de los hongos, describe la característica de la que cada una toma su nombre y cita un ejemplo de cada una.

8. Describe la formación de un anillo de hada en setas. ¿Por qué existe una relación entre el diámetro y la edad del anillo?

9. Describe dos asociaciones simbióticas entre hongos y organismos de otros reinos. En cada caso, explica el efecto de estas asociaciones en cada uno de los socios.

Reproducción animal



El zoológico congelado consiste en muestras de tejido y células sexuales, a menudo de especies en peligro de extinción, preservadas en nitrógeno líquido. (Imagen en recuadro) El último pájaro po'ouli murió en 2004, pero sus células viven en el zoológico congelado.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado

40.1 ¿Cómo se reproducen los animales?

La reproducción asexual no implica la fusión de espermatozoide y óvulo

La reproducción sexual requiere de la unión de un espermatozoide y un óvulo

40.2 ¿Cómo funciona el aparato reproductor humano?

La capacidad para reproducirse se inicia en la pubertad

El tracto reproductor masculino incluye los testículos y las estructuras accesorias

El tracto reproductor femenino comprende los ovarios y las estructuras accesorias

La cópula permite la fecundación interna

De cerca: El control hormonal del ciclo menstrual

Guardián de la salud: Enfermedades de transmisión sexual

40.3 ¿Cómo podemos limitar la fertilidad?

La esterilización es un método anticonceptivo permanente

La anticoncepción y el aborto evitan o ponen fin al embarazo

Guardián de la salud: Reproducción con alta tecnología

Investigación científica: En busca de un anticonceptivo masculino

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado



ESTUDIO DE CASO EL ZOOLOGICO CONGELADO

EN ENERO DE 2000, el último bucardo (una cabra nativa de los Pirineos españoles) que quedaba vivo murió cuando un árbol le cayó encima. En 2004 el último pájaro hawaiano po'ouli (imagen en recuadro) que quedaba en el mundo murió en el Centro de Conservación para Aves de Maui. Pero existe la esperanza de que las futuras generaciones conozcan estas especies extintas. Gracias al "zoológico congelado" de San Diego, sus células, que contienen sus mapas genéticos, se mantienen vivas por un método llamado *criogenia* (el cual permite conservarlas con vida en un estado de profundo congelamiento), que se puso en práctica antes de la extinción de las especies. El zoológico congelado de San Diego alberga colecciones de tejidos, espermatozoides y óvulos de unos 5000 animales que representan unas 300 especies, almacenados en contenedores especiales llenos de nitrógeno líquido a -196°C (-320°F). Muchas de estas especies están en peligro de extinción, es decir, a diferencia del bucardo y el po'ouli, la mayoría de ellas no están extintas. Existen unos 12

zoológicos congelados en el mundo, los cuales brindan la materia prima para una forma única de conservación de la vida silvestre mediante *tecnología reproductiva asistida* (TRA).

Este enfoque de la conservación de la vida silvestre implica técnicas como la inseminación artificial, la fertilización in vitro, la transferencia de embriones entre especies (el uso de una madre sustituta para una especie diferente, pero emparentada) e incluso la clonación. Estas técnicas están rodeadas de controversia y frustración, aunque han conducido a algunas historias de éxito que sirven de inspiración. La inseminación artificial se ha convertido en la piedra angular en los esfuerzos para salvar al hurón de patas negras, el panda gigante y el guepardo. La *fertilización in vitro* (FIV, en la que el espermatozoide y el óvulo se unen en una caja de Petri) es ahora una importante herramienta de conservación. Una ventaja importante de la FIV es que permite transportar los espermatozoides de una especie en peligro de extinción —entre continentes, si es necesario— para fertilizar a la hembra apro-

piada. Esto elimina el riesgo y el trauma que implica transportar animales; también evita la posibilidad real de que, una vez juntos los ejemplares, haya un rechazo hacia la pareja. Los mayores éxitos de la FIV incluyen el primer tigre siberiano "de probeta" en 1990, un gorila en 1996 y el primer panda en 2003. Irónicamente, la pérdida de especies que hace que la TRA sea tan importante es el enorme éxito reproductivo de una sola especie: el *Homo sapiens*. La floreciente población humana amenaza la vida silvestre en todo el mundo, a medida que continuemos usurpando los hábitat de la vida silvestre para obtener alimento, espacios para vivienda y recursos naturales, y en tanto nuestro consumo de energía altere el clima global.

¿Cómo se reproducen los animales, incluidos los seres humanos? ¿Qué opciones tenemos para controlar la reproducción? ¿Cómo ayuda la tecnología reproductiva asistida a las parejas que sufren infertilidad? ¿Se justifican las soluciones de alta tecnología para preservar a las especies en peligro de extinción?

40.1 ¿CÓMO SE REPRODUCEN LOS ANIMALES?

Los animales se reproducen de forma sexual o asexual. En la **reproducción sexual** el animal produce gametos haploides mediante meiosis. En un proceso llamado **fecundación**, dos gametos, por lo regular de progenitores distintos, fusionan sus núcleos para dar origen a una célula diploide, que luego se divide por mitosis para producir un individuo diploide. Puesto que el descendiente recibe genes de ambos progenitores, su genoma no es idéntico al de ninguno de ellos. En contraste, en la **reproducción asexual** sólo interviene un animal que produce descendientes mediante una mitosis repetida de células de alguna parte de su cuerpo, de manera que los descendientes son genéticamente idénticos al progenitor.

Como el ser humano y muchos animales se reproducen sexualmente, tendemos a considerar la reproducción sexual como el método normal y el mejor. Sin embargo, aunque la reproducción sexual produce nuevas combinaciones de genes, la reproducción asexual es mucho más eficiente, pues los individuos pueden efectuarla por sí solos. No debe extrañarnos que muchos animales se reproduzcan asexualmente, al menos parte del tiempo.

La reproducción asexual no implica la fusión de espermatozoide y óvulo

La gemación produce una versión miniatura del adulto

Muchas esponjas y celentéreos, como la hidra y algunas anémonas de mar, se reproducen por **gemación** (FIGURA 40-1). Una versión miniatura del animal, llamada *yema*, crece directamente en el cuerpo del adulto, del cual obtiene nutrientes. Una vez que ha crecido lo suficiente, la yema se separa y se vuelve independiente.

La fisión seguida de regeneración puede producir un nuevo individuo

Muchos animales pueden efectuar **regeneración**, es decir, la capacidad de hacer crecer partes del cuerpo que se han perdido. Por ejemplo, las estrellas de mar regeneran un brazo que pierden por un accidente, en tanto que las lagartijas regeneran la cola que perdieron por el ataque de un depredador. La regeneración es parte de la reproducción en las especies que se reproducen por **fisión**. Varias especies de anélidos y platel-

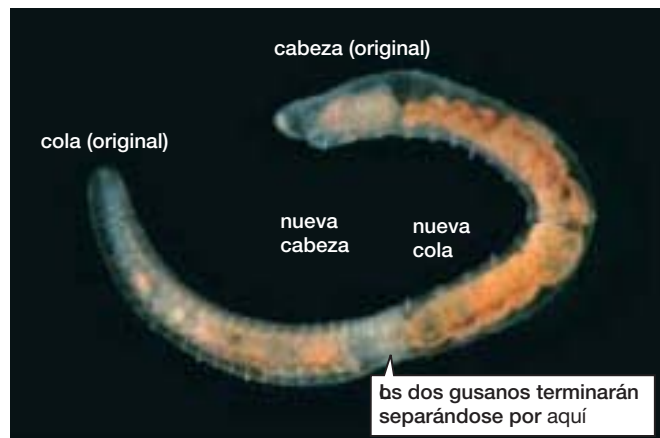


FIGURA 40-2 Fisión seguida de regeneración

Este anélido marino (segmentado) puede reproducirse dividiendo su cuerpo y regenerando cada mitad. **PREGUNTA:** ¿Qué tipo de división celular da origen a las células del cuerpo del descendiente?

mintos se reproducen dividiéndose en dos o más fragmentos, cada uno de los cuales regenera un cuerpo completo (FIGURA 40-2). Unas cuantas especies de estrella de mar quebradiza se reproducen de forma similar. Entre los celentéreos (es decir, anémonas, medusas y sus parientes), algunas especies de coral y algunas anémonas pueden dividirse longitudinalmente en mitades y regenerarse para formar dos nuevos individuos.

En la partenogénesis, los óvulos se desarrollan sin fecundación

Las hembras de algunas especies de animales se pueden reproducir por un proceso llamado **partenogénesis**, en el que óvulos haploides se dividen por mitosis y se desarrollan sin ser fecundados para constituir adultos. La descendencia de algunas especies producida por partenogénesis sigue siendo haploide. Por ejemplo, las abejas macho son haploides, pues nacen de óvulos no fecundados; sus hermanas diploides se desarrollan a partir de óvulos fecundados. Por otra parte, algunos peces, anfibios y reptiles se reproducen por partenogénesis, pero recuperan el número diploide de cromosomas duplicando todos éstos, ya sea antes o después de la meiosis. Todos los descendientes son hembras.

Algunas especies de peces, como ciertos parientes de los *mollies* y los *platys* que tanto se venden en las tiendas de peces tropicales, y algunas lagartijas, como la cola de látigo, común en México y el suroeste de Estados Unidos (FIGURA 40-3), tienen poblaciones que consisten exclusivamente en hembras que se reproducen por partenogénesis. Otros animales, como los áfidos, se pueden reproducir sexualmente o por partenogénesis, dependiendo de factores ambientales como la estación del año o la disponibilidad de alimento (



FIGURA 40-3 Lagartija cola de látigo



FIGURA 40-4 Un áfido hembra en reproducción

En la primavera y principios del verano, cuando abunda el alimento, las hembras de los áfidos se reproducen por partenogénesis. De hecho, el desarrollo del tracto reproductor es tan rápido que las hembras ¡nacen embarazadas! En el otoño, la reproducción es sexual. **PREGUNTA:** ¿Por qué los áfidos se reproducen sexualmente en el otoño?

La reproducción sexual requiere de la unión de un espermatozoide y un óvulo

En vista de la eficiencia obvia de la reproducción asexual, nadie sabe con certeza por qué surgió la reproducción sexual para convertirse en la forma dominante de reproducción. La reproducción sexual tiene una consecuencia importante: la recombinación genética que tiende a crear genotipos novedosos —y, por consiguiente, nuevos fenotipos— que son una fuente importante de variación sobre la cual puede actuar la selección natural.

En los animales se efectúa reproducción sexual cuando un espermatozoide haploide fecunda a un óvulo haploide para generar un descendiente diploide. En casi todas las especies animales, un individuo es macho o hembra. Los sexos se definen por el tipo de gameto que cada uno produce. Las hembras producen **óvulos**: células grandes, inmóviles, que contienen reservas de alimento. Los machos producen **espermatozoides**, que son pequeños, móviles y casi no tienen citoplasma ni reservas alimenticias.

En algunos animales, como la lombriz de tierra y muchos caracoles, un mismo individuo produce espermatozoides y óvulos. Tales individuos se llaman comúnmente **hermafroditas** (por Hermafrodito, un dios griego cuyo cuerpo se unió con el de una ninfa acuática y produjo un ser mitad hombre y mitad mujer). En casi todas las especies hermafroditas, la reproducción implica un intercambio de espermatozoides entre individuos, como ocurre entre las lombrices de tierra (**FIGURA 40-5**). Sin embargo, en algunas especies hermafroditas, un individuo puede fecundar sus propios óvulos, si no hay una pareja disponible. Estos animales, entre los que destacan la solitaria y muchos caracoles de estanque, son relativamente poco móviles y podrían quedar aislados de otros miembros de su especie. En tales circunstancias, la capacidad de autofecundación, sin duda, es una ventaja.

En el caso de las especies con dos sexos y de las hermafroditas que no pueden autofecundarse, la reproducción requiere juntar espermatozoides de un individuo con óvulos de otro, para que haya fecundación. La unión de espermatozoides y óvulos se logra de diversas maneras, dependiendo de la movilidad de los animales y de si se reproducen en el agua o sobre la tierra.



FIGURA 40-5 Las lombrices de tierra intercambian espermatozoides

La fecundación externa se efectúa afuera del cuerpo de los progenitores

En la **fecundación externa**, la unión del espermatozoide y el óvulo se efectúa afuera del cuerpo de los progenitores. Si los animales se reproducen en el medio acuático, los progenitores liberan espermatozoides y óvulos al agua; luego, aquéllos nadan hasta llegar a los óvulos. Este procedimiento se llama **desove**. Puesto que los espermatozoides y óvulos tienen una vida relativamente efímera, los animales que desovan deben coordinar sus comportamientos reproductores, tanto *temporalmente* (el macho y la hembra desovan al mismo tiempo) como *espacialmente* (el macho y la hembra desovan en el mismo lugar). La sincronización puede lograrse mediante señales, comportamientos de cortejo, indicios ambientales o alguna combinación de estos factores.

Casi todos los animales que desovan dependen en algún grado de indicios ambientales. La reproducción suele efectuarse sólo durante ciertas épocas del año; indicios como los cambios en la duración del día generalmente estimulan los cambios fisiológicos que preparan al cuerpo para la reproducción. Sin embargo, se requiere una sincronía más precisa para coordinar la liberación de los espermatozoides y los óvulos. Por ejemplo, muchas especies de coral sincronizan el desove con base en la fase lunar, liberando de manera simultánea paquetes de espermatozoides y óvulos en el agua (**FIGURA 40-6**). Aunque muchos espermatozoides y óvulos conforman cada paquete liberado por estos animales hermafroditas, por lo



FIGURA 40-6 Indicios ambientales podrían sincronizar el desove. En la Gran Barrera de Arrecifes de Australia, miles de corales desovan de manera simultánea, creando un efecto de “ventisca”. El desove en estos corales está vinculado a las fases lunares.



a)



b)

FIGURA 40-7 Los rituales de cortejo sincronizan la liberación de espermatozoides y óvulos

a) Los rituales de cortejo entre peces luchadores siameses (*Betta splendens*) aseguran la fecundación de los óvulos de la hembra, pues el macho y la hembra sueltan espermatozoides y óvulos de forma simultánea. El macho intercepta los óvulos a medida que caen, los escupe hacia su nido de burbujas que flota arriba de ellos y cuida a la descendencia durante sus primeras semanas de vida.

El desove en el caballito de mar requiere que el macho y la hembra orienten sus cuerpos de forma que la hembra pueda depositar sus óvulos en la bolsa del macho. **PREGUNTA:** Además de asegurar la liberación sincronizada de gametos, ¿qué otras ventajas tienen los rituales de cortejo?

regular, no se autofecundan. Los óvulos no están listos para la fecundación inmediatamente, y esta demora les permite mezclarse con los espermatozoides de otros individuos de la misma especie.

Algunos animales comunican su disposición sexual enviando señales visuales, acústicas o químicas. Las señales químicas son muy comunes entre invertebrados inmóviles o poco activos, como los mejillones y las estrellas de mar. Estos animales secretan al agua sustancias llamadas **feromonas**, las cuales son

detectadas por otros miembros de la especie. Normalmente, cuando la hembra está lista para desovar, descarga óvulos y una feromona sexual al agua. Los machos cercanos, al detectar la feromona de apareamiento, liberan rápidamente millones de espermatozoides. Los espermatozoides en sí son atraídos por una sustancia producida por los óvulos de algunos animales, y muy probablemente de casi todos. Algunas “feromonas de óvulo”, que se han detectado en animales tan diversos como las estrellas de mar y el ser humano, ayudan a garantizar la fecundación.

La sincronización temporal, por sí sola, no garantiza una reproducción eficiente. Los corales, las estrellas de mar y los mejillones desperdician cantidades enormes de espermatozoides y óvulos porque los gametos se liberan en puntos relativamente distantes. En algunas especies de animales móviles es posible asegurar la sincronía temporal y espacial, mediante comportamientos de apareamiento. Casi todos los peces, por ejemplo, tienen algún tipo de ritual de cortejo en el que el macho y la hembra se acercan mucho y liberan sus gametos en el mismo lugar y al mismo tiempo. Las danzas de cortejo del caballito de mar y de los peces luchadores siameses son ejemplos exquisitos de ello (**FIGURA 40-7**). La hembra del caballito de mar, cargada de óvulos, se aproxima al macho e inicia una elaborada danza en la que ambos participantes se acercan, oscilan e inclinan la cabeza antes de que sus colas se entrelacen y sus cuerpos se alineen cara a cara. En una inusual inversión de roles sexuales, la hembra inserta un tubo para depositar sus óvulos en la bolsa ubicada en el abdomen del macho. Cuando deposita sus óvulos en la bolsa, el macho libera una nube de espermatozoides desde una abertura en la parte inferior; luego sella los óvulos fecundados en su bolsa. Unas cuantas semanas después, los huevos eclosionan y el macho da a luz a perfectos caballitos de mar en miniatura. Las ranas y los sapos asumen una posición de apareo característica llamada *amplexus* (**FIGURA 40-8**). En las orillas de estanques y lagos, la rana macho se monta en la hembra y presiona los costados de su abdomen. Esto la estimula para que libere óvulos, que el macho fecunda al liberar muchos espermatozoides. Los sapos dorados que aquí aparecen en *amplexus* fueron alguna vez abundantes en los bosques neblinosos de



FIGURA 40-8 Los sapos dorados en *amplexus*

El pequeño macho sujeta con fuerza a la hembra y la estimula para que libere óvulos. Se cree que los sapos dorados se extinguieron.



a)



b)

FIGURA 40-9 La reproducción en tierra requiere de la fecundación interna

a) Un rinoceronte de Sumatra macho, en peligro de extinción, monta a una hembra para aparearse. b) Un grillo mormón hembra introduce un paquete de espermatozoides en su cuerpo.

Costa Rica, pero no se les ha vuelto a ver desde 1989. Su desaparición, en opinión de los científicos, fue provocada por cambios ambientales relacionados con el uso del suelo y el calentamiento global; además, fue tan repentina que nadie pensó en preservar la herencia genética de tal especie en un zoológico congelado, así que ésta se perdió para siempre.

La fecundación interna se efectúa dentro del cuerpo de la hembra

En la **fecundación interna**, los espermatozoides se introducen en el cuerpo de la hembra, donde tiene lugar la fecundación. La fecundación interna es una adaptación importante a la vida terrestre, porque los espermatozoides deben permanecer bañados en líquido hasta que llegan a los óvulos. Incluso en entornos acuáticos, la fecundación interna eleva la probabilidad de alcanzar el éxito, porque los espermatozoides y los óvulos están confinados juntos en un espacio pequeño, en lugar de depender de encuentros dentro de un gran volumen de agua.

La fecundación interna por lo regular se realiza mediante la **cópula**, el comportamiento por el cual el macho deposita espermatozoides directamente en el tracto reproductor de la hembra (**FIGURA 40-9a**). En una variación de la fecundación interna, los machos de algunas especies empaquetan sus espermatozoides en un envoltorio llamado **espermatóforo** (“porta-



FIGURA 40-10 Competencia por las hembras

Al salir del estado de hibernación, masas de serpientes jarreteras macho compiten para aparearse con las hembras.

dor de espermatozoides” en griego). En muchas especies que producen espermatóforos, como algunos escorpiones, saltamontes y salamandras, no se efectúa cópula. El macho simplemente suelta un espermatóforo en el suelo; si una hembra lo encuentra, se fecunda a sí misma insertándolo en su cavidad reproductora, donde se liberan los espermatozoides que contiene (**FIGURA 40-9b**).

Entre los animales que copulan para reproducirse, los machos compiten por las hembras. Esta competencia ha propiciado el desarrollo evolutivo de una amplia variedad de estructuras y comportamientos reproductores seleccionados sexualmente. Un ejemplo espectacular de competencia para el acceso a parejas se da a principios de la primavera en los bosques occidentales de Canadá. Conforme la nieve se derrite y el suelo se calienta, las serpientes jarreteras macho salen de sus guaridas subterráneas donde invernarón en grupos de millares. Posteriormente salen las hembras y se inicia un frenesí de apareamiento. En un mar de miles de cuerpos que se retuercen, cada hembra atrae a docenas o incluso centenares de machos (**FIGURA 40-10**). Sólo uno de ellos logrará copular con ella.

Para que la fecundación ocurra, un óvulo maduro debe estar presente. Muchos caracoles e insectos hembra almacenan espermatozoides dentro de sus cuerpos durante días o incluso meses, lo que garantiza una provisión para cuando los óvulos estén listos. En los mamíferos, los cuales no almacenan espermatozoides, el comportamiento de apareamiento debe estar sincronizado. A menudo la hembra experimenta la **ovulación** (cuando el ovario libera un óvulo) sólo durante ciertos momentos del año y da señales de que está lista para aparearse mediante feromonas y comportamientos. La cópula misma provoca la ovulación en unos cuantos mamíferos, como el conejo. Los zoólogos que intentaban criar un rinoceronte de Sumatra hembra (véase la figura 40-9a), una especie que no se había logrado reproducir en cautiverio durante un siglo, finalmente descubrieron que su ovulación era estimulada por el cortejo; fue así como nacieron dos rinocerontes. Los esperma-

tozoides de rinocerontes de Sumatra, almacenados en un zoológico congelado en Cincinnati, Ohio, algún día ayudarán a recuperar esta especie en peligro crítico de extinción. Sólo existen unos 300 ejemplares en vida silvestre, en parte porque sus cuernos son muy preciados como afrodisíacos.

40.2 ¿CÓMO FUNCIONA EL APARATO REPRODUCTOR HUMANO?

Los seres humanos, al igual que otros mamíferos, tienen sexos separados, copulan y se reproducen por fecundación interna. Las **gónadas** de los mamíferos son órganos en pares que producen células sexuales: espermatozoides y óvulos. Aunque casi todas las especies de mamíferos se reproducen únicamente durante ciertas épocas del año y, por lo tanto, sólo producen espermatozoides y óvulos en ese momento, la reproducción humana no está restringida a ciertas temporadas. Los hombres producen espermatozoides de forma más o menos continua y las mujeres *ovulan* (liberan un óvulo maduro) aproximadamente una vez al mes.

La capacidad para reproducirse se inicia en la pubertad

La maduración sexual tiene lugar en la **pubertad**, una etapa de desarrollo caracterizada por el rápido crecimiento y la aparición de caracteres sexuales secundarios en ambos sexos. Aunque la pubertad comienza por lo general a partir de los 13 años, en ocasiones se inicia a una edad tan temprana como los 8 años o tan avanzada como los 15 años. Durante la pubertad, la maduración del cerebro en ambos sexos hace que el hipotálamo aumente la producción de la **hormona liberadora de gonadotropinas** (GnRH), la cual estimula a la hipófisis ante-

rior para que produzca **hormona luteinizante (LH)** y la **hormona estimuladora de folículos (FSH)**. Estas hormonas estimulan a los testículos para que produzcan más hormona sexual masculina, la **testosterona**, y a los ovarios para que produzcan más hormona sexual femenina, el **estrógeno**. En respuesta al aumento de testosterona, los hombres desarrollan caracteres sexuales secundarios: el **pene** (que deposita los espermatozoides en la vagina) y los **testículos** crecen; aparece el vello en el pubis y las axilas, así como en el rostro; la laringe se aumenta de tamaño (lo que hace la voz más grave); además, aumenta el desarrollo muscular. En respuesta al aumento de estrógeno (y otras hormonas que surgen en la pubertad), en las mujeres crecen las mamas, aparece vello en el pubis y las axilas, y aparece la menstruación. También ocurren cambios en el cerebro, todo lo cual hace que ésta sea una etapa interesante tanto para los adolescentes como para sus padres.

El tracto reproductor masculino incluye los testículos y las estructuras accesorias

El aparato reproductor masculino (tabla 40-1 y FIGURA 40-11) consiste en los **testículos** y las estructuras accesorias que secretan sustancias para activar y nutrir a los espermatozoides, almacenarlos y llevarlos al tracto reproductor femenino.

Los espermatozoides se producen en los testículos

Los testículos, que producen tanto espermatozoides como hormonas sexuales masculinas, se encuentran en el **escroto**, una bolsa que cuelga en el exterior de la cavidad principal del cuerpo. Esta ubicación mantiene a los testículos a una temperatura aproximadamente 1 a 2°C más baja que el centro del cuerpo, lo cual es óptimo para el desarrollo de los espermatozoides. Casi todo el volumen de los testículos está lleno de

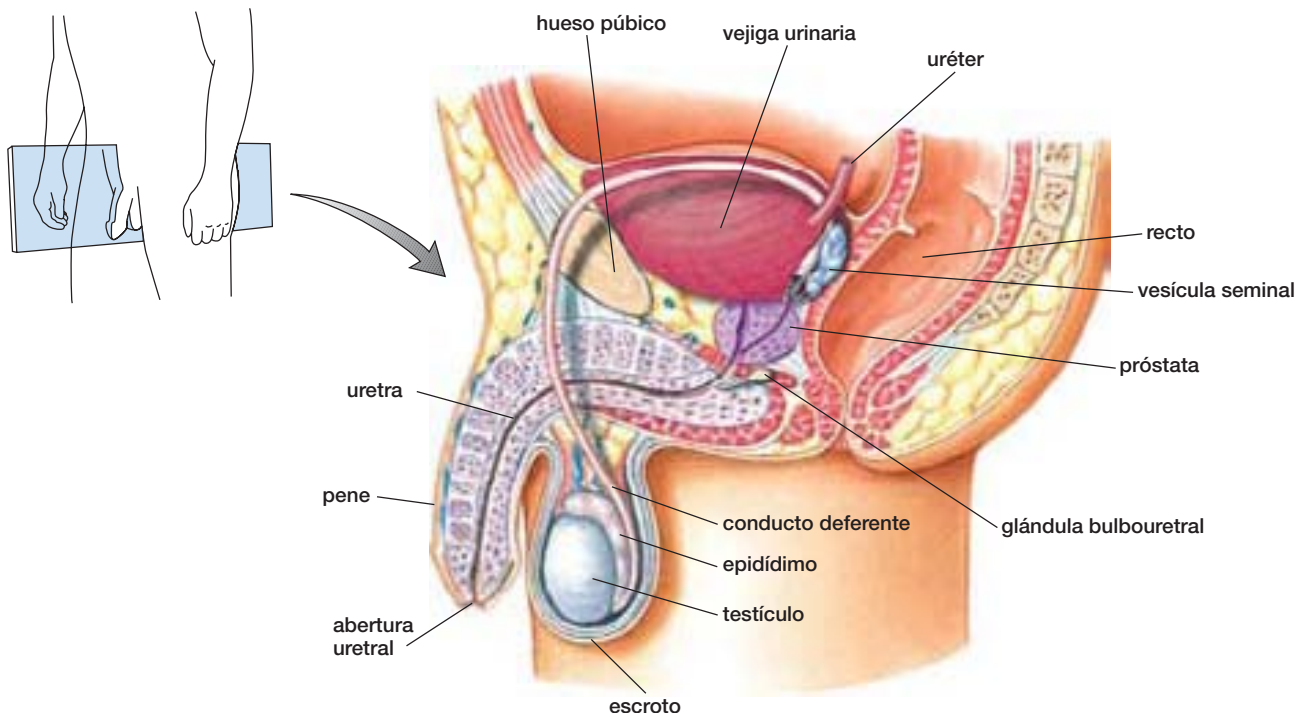
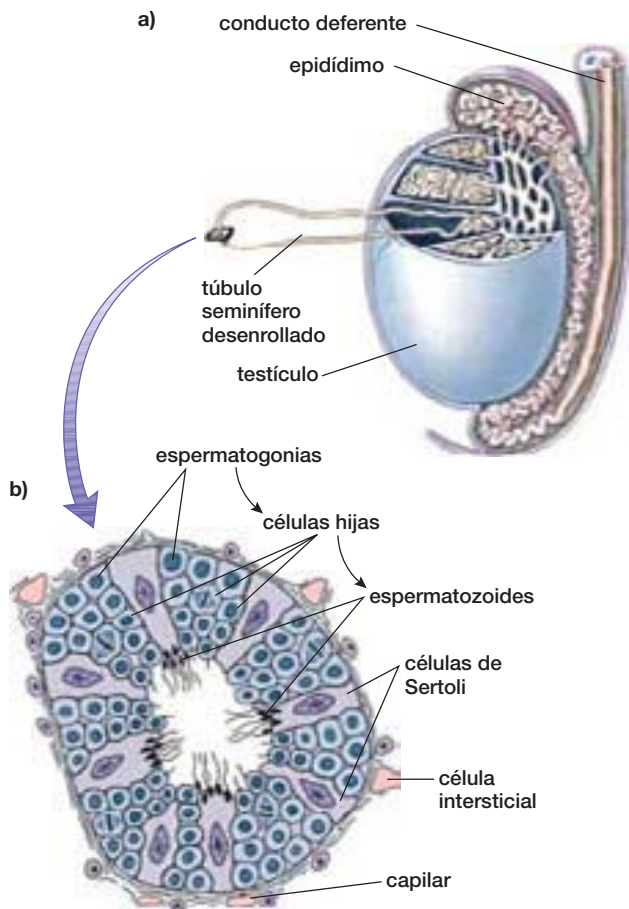


FIGURA 40-11 El tracto reproductor masculino humano

Los testículos penden bajo la cavidad abdominal, en el escroto. Los espermatozoides pasan de los testículos al epidídimo y de ahí, a través del conducto deferente y la uretra, hasta la punta del pene. En el camino, se agregan líquidos de las vesículas seminales, las glándulas bulbouretrales y la próstata.

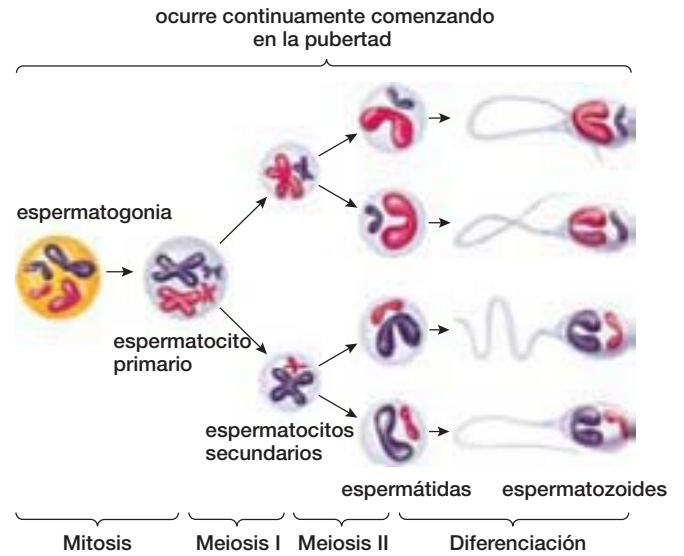
Tabla 40-1 El tracto reproductor masculino

Estructura	Función
Testículos (gónadas masculinas)	Producen espermatozoides y testosterona
Epidídimo y conducto deferente (conductos)	Almacenan espermatozoides; conducen espermatozoides de los testículos al pene
Uretra (conducto)	Lleva el semen del conducto deferente y la orina de la vejiga urinaria a la punta del pene
Pene	Deposita espermatozoides en el tracto reproductor femenino
Vesículas seminales (glándulas)	Secretan líquido que forma el semen
Próstata (glándula)	Secreta líquido que forma el semen
Glándulas bulbouretrales	Secretan líquido que forma el semen

**FIGURA 40-12** Estructuras que intervienen en la espermatogénesis

a) Corte del testículo que muestra la ubicación de los túbulos seminíferos, el epidídimo y el conducto deferente. b) Corte transversal de un túbulo seminífero. Las paredes de los túbulos están recubiertas de células de Sertoli y espermatogonias que experimentan meiosis. Los espermatozoides maduros se liberan hacia la cavidad central. Las células intersticiales producen testosterona.

túbulos seminíferos enrollados y huecos, que es donde se producen los espermatozoides (**FIGURA 40-12a**). En los espacios entre los túbulos hay **células intersticiales**, que sintetizan la hormona masculina testosterona (**FIGURA 40-12b**).

**FIGURA 40-13** Los espermatozoides se producen por meiosis

Las espermatogonias crecen y se diferencian para producir espermatocitos, los cuales experimentan meiosis y luego diferenciación para producir espermatozoides haploides. Aunque por claridad sólo se muestran cuatro cromosomas, en el ser humano el número diploide es 46 y el número haploide 23.

En el interior de cada túbulo seminífero, junto a la pared, están las **espermatogonias**, las células diploides de las cuales surgirán los espermatozoides, y las **células de Sertoli**, mucho más grandes (figura 40-12b). Las espermatogonias se dividen por mitosis, lo que garantiza un abasto constante de ellos y forma células que experimentan **espermatogénesis** para producir espermatozoides haploides (**FIGURA 40-13**).

La espermatogénesis inicia con el crecimiento y diferenciación de espermatogonias para formar **espermatocitos primarios**, que son células diploides grandes. Luego, los espermatocitos primarios sufren meiosis (proceso descrito en el capítulo 11). Al término de la meiosis I, cada espermatocito primario da origen a dos **espermatocitos secundarios** haploides. Cada espermatocito secundario se divide otra vez, durante la meiosis II, para producir dos **espermátidas**, de manera que se obtienen cuatro espermátidas por cada espermatocito primario. Las espermátidas sufren reordenaciones radicales de sus componentes celulares al diferenciarse para convertirse en espermatozoides.

Las espermatogonias, los espermatocitos y las espermátidas están envueltos en pliegues de las **células de Sertoli**, las cuales regulan el proceso de espermatogénesis y nutren a los espermatozoides en desarrollo. Durante la espermatogénesis, los espermatozoides en desarrollo migran hacia la cavidad central del túbulo seminífero, del que salen como espermatozoides maduros (véase la figura 40-12b).

Un espermatozoide humano (**FIGURA 40-14**) es distinto de todas las demás células del cuerpo. Casi todo el citoplasma desaparece para dejar un núcleo haploide que casi llena toda la **cabeza** de la célula espermática. Encima del núcleo hay un lisosoma especializado llamado **acrosoma**. El acrosoma contiene enzimas que se necesitarán para disolver las capas protectoras que rodean al óvulo, de manera que el espermatozoide pueda entrar y fecundarlo. Detrás de la cabeza está el

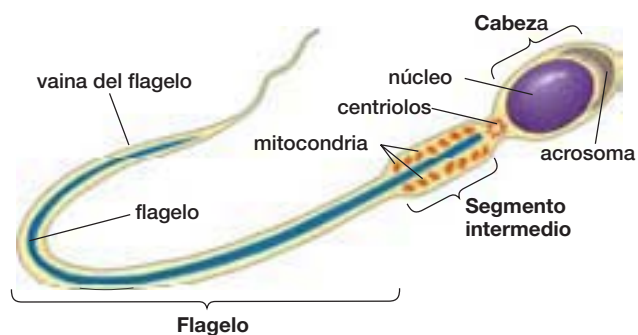


FIGURA 40-14 Espermatozoide humano

Un espermatozoide maduro es una célula equipada únicamente con lo esencial: un núcleo haploide, el acrosoma (que contiene enzimas para digerir las barreras que rodean al óvulo), mitocondrias para producir energía y un flagelo largo para la locomoción.

proporcionan la energía necesaria para mover el *flagelo*. Las sacudidas de la cola, que en realidad es un flagelo largo, impulsan al espermatozoide por el tracto reproductor femenino.

En el ser humano y otros mamíferos, la espermatogénesis no comienza sino hasta la pubertad, cuando el hipotálamo libera GnRH, que estimula a la hipófisis anterior para que produzca LH y FSH. La LH estimula a las células intersticiales de los testículos para que produzcan testosterona (FIGURA 40-15). La testosterona, en combinación con la FSH, estimula a las células de Sertoli para realizar la espermatogénesis. Al igual que muchos procesos fisiológicos, la producción de espermatozoides está regulada por retroalimentación negativa. La testosterona, al estimular la espermatogénesis, también inhibe la liberación de GnRH por parte del hipotálamo y de LH y FSH por parte de la hipófisis, lo que limita la producción posterior de testosterona y la producción de espermatozoides. Las células de Sertoli, cuando son estimuladas por la FSH y la testosterona, no sólo promueven la espermatogénesis, sino que secretan la hormona *inhibina*, que también inhibe la producción de GnRH, LH y FSH (figura 40-15). Este proceso de retroalimentación mantiene la producción de espermatozoides a niveles relativamente constantes a lo largo de la vida reproductiva del hombre.

Las estructuras accesorias producen semen y conducen a los espermatozoides al exterior del cuerpo

Los túbulos seminíferos se fusionan para formar el **epidídimo**, un solo tubo continuo, largo y plegado (véase la figura 40-12a). El epidídimo lleva al **conducto deferente**, que saca los espermatozoides del escroto. Casi todos los cientos de millones de espermatozoides que se producen cada día en el cuerpo de un hombre se almacenan en el conducto deferente y en el epidídimo. El conducto deferente se une a la **uretra**, que conecta la vejiga con la punta del pene. Este camino final común lo comparten, en diferentes momentos, tanto la orina (durante la micción) como los espermatozoides (durante la eyacuación, un reflejo causado por estimulación sexual que expulsa a los espermatozoides por el pene).

El líquido eyaculado del pene, llamado **semen**

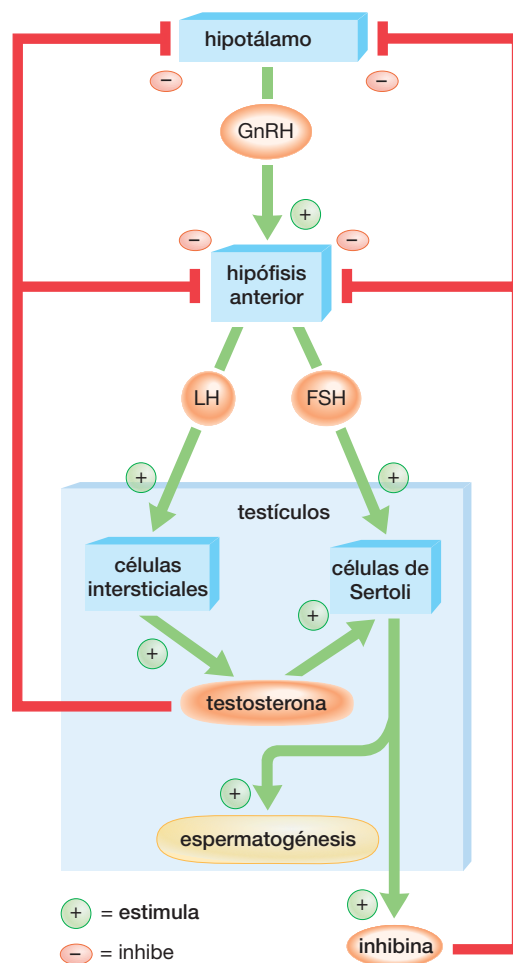


FIGURA 40-15 Control hormonal de la espermatogénesis

La GnRH del hipotálamo estimula a la hipófisis anterior para que libere LH y FSH. La LH estimula a las células intersticiales para que produzcan testosterona. La testosterona y la FSH estimulan a las células de Sertoli y a las espermatogonias para que realicen espermatogénesis. Las células de Sertoli liberan inhibina, la cual, junto con la testosterona, inhibe la liberación ulterior de FSH y LH para establecer un ciclo de retroalimentación negativa que mantiene casi constante la tasa de espermatogénesis y la concentración de testosterona en la sangre. **PREGUNTA: ¿Por qué las inyecciones de testosterona suprimen la producción de espermatozoides?**

por las **vesículas seminales** constituye aproximadamente el 60 por ciento del semen. Este líquido es rico en fructosa, que aporta energía para los espermatozoides; también contiene prostaglandinas (véase el capítulo 37) que estimulan contracciones uterinas, las cuales ayudan a transportar a los espermatozoides por el tracto reproductor femenino. Su pH levemente alcalino protege a los espermatozoides del ambiente ácido de la vagina que, de otra forma, inhibiría la actividad espermática. La **próstata** produce una secreción rica en nutrientes, la cual constituye alrededor del 30 por ciento del volumen del semen e incluye enzimas que aumentan la fluidez de éste después de que es liberado en la vagina, permitiendo que los espermatozoides se desplacen más libremente. Las **glándulas bulbouretrales**

Tabla 40-2 Tracto reproductor femenino

Estructura	Función
Ovarios (gónadas femeninas)	Producen óvulos, estrógeno y progesterona
Fimbria (abertura del conducto uterino)	Sus cilios empujan al óvulo hacia el oviducto
Tubos uterinos	Conducen al óvulo al útero; sitio de la fecundación
Útero	Cámara muscular donde se desarrolla el feto
Cérvix	Cierra el extremo inferior del útero durante el embarazo
Vagina	Receptáculo para el semen; canal de nacimiento

El tracto reproductor femenino comprende los ovarios y las estructuras accesorias

El tracto reproductor femenino está contenido casi en su totalidad dentro de la cavidad abdominal (tabla 40-2 y FIGURA 40-16). Consiste en un par de gónadas, llamadas **ovarios** (FIGURA 40-17a), y estructuras accesorias que reciben a los espermatozoides, los conducen hacia el óvulo y nutren al **embrión** en desarrollo.

Los óvulos se producen en los ovarios

La **ovogénesis**, que es la formación de óvulos, inicia durante el desarrollo fetal con la formación de células precursoras de óvulos llamadas **ovogonias**. Hacia el final del tercer mes de desarrollo del feto, las ovogonias se han dividido por mitosis y han crecido para convertirse en **ovocitos primarios**. Al continuar el desarrollo del feto, se inicia la meiosis en todos los ovocitos primarios, pero se detiene en la profase de la meiosis I. En el momento de nacer, la mujer ya cuenta con un abasto de ovocitos primarios suficiente para toda la vida. Los ovarios contienen inicialmente cerca de dos millones de ovocitos primarios, de los cuales muchos mueren, de forma que al llegar a la pubertad sólo quedan cerca de 400,000. Esa cantidad es más que suficiente, pues sólo unos cuantos ovocitos reanudan la meiosis durante cada mes del periodo reproductivo de la mujer, a partir de la pubertad, que se presenta alrededor de los 13 años, hasta la **menopausia**, alrededor de los 50.

Alrededor de cada ovocito hay una capa de células mucho más pequeñas que nutren a la célula en desarrollo y además secretan hormonas sexuales femeninas. Juntos, el ovocito y estas células accesorias constituyen un **foliculo** (FIGURA 40-17b). Durante el ciclo menstrual, hormonas de la hipófisis estimulan el desarrollo de una docena o más de foliculos, aunque normalmente sólo uno de ellos madura totalmente. El ovocito primario completa su primera división meiótica (que se detuvo durante el desarrollo) y produce un solo **ovocito secundario** y

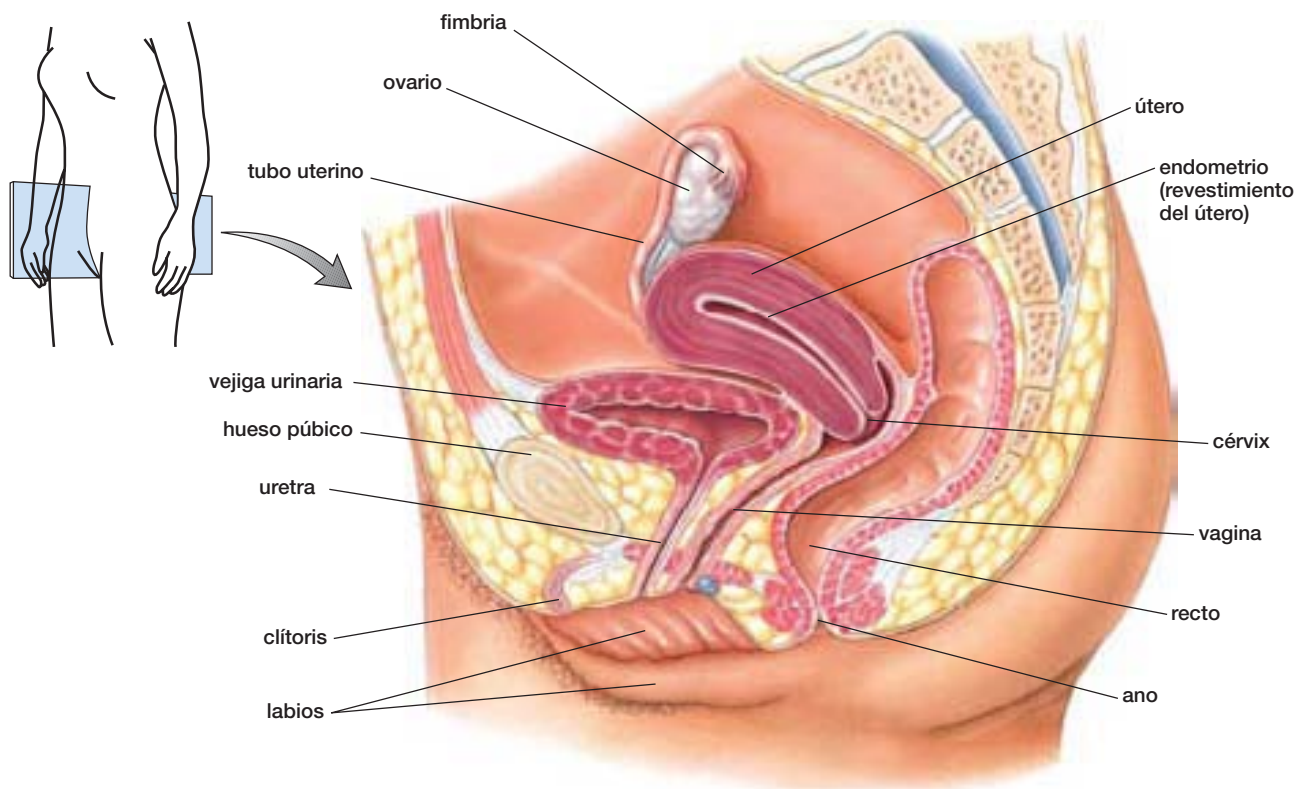


FIGURA 40-16 El tracto reproductor femenino humano

Los óvulos se producen en los ovarios y entran en el tubo uterino. El espermatozoide y el óvulo normalmente se encuentran en el tubo uterino, donde se efectúa la fecundación y el desarrollo inicial. El óvulo fecundado se une al endometrio (el revestimiento del útero), donde continúa el desarrollo. La vagina recibe los espermatozoides y sirve como canal de parto.

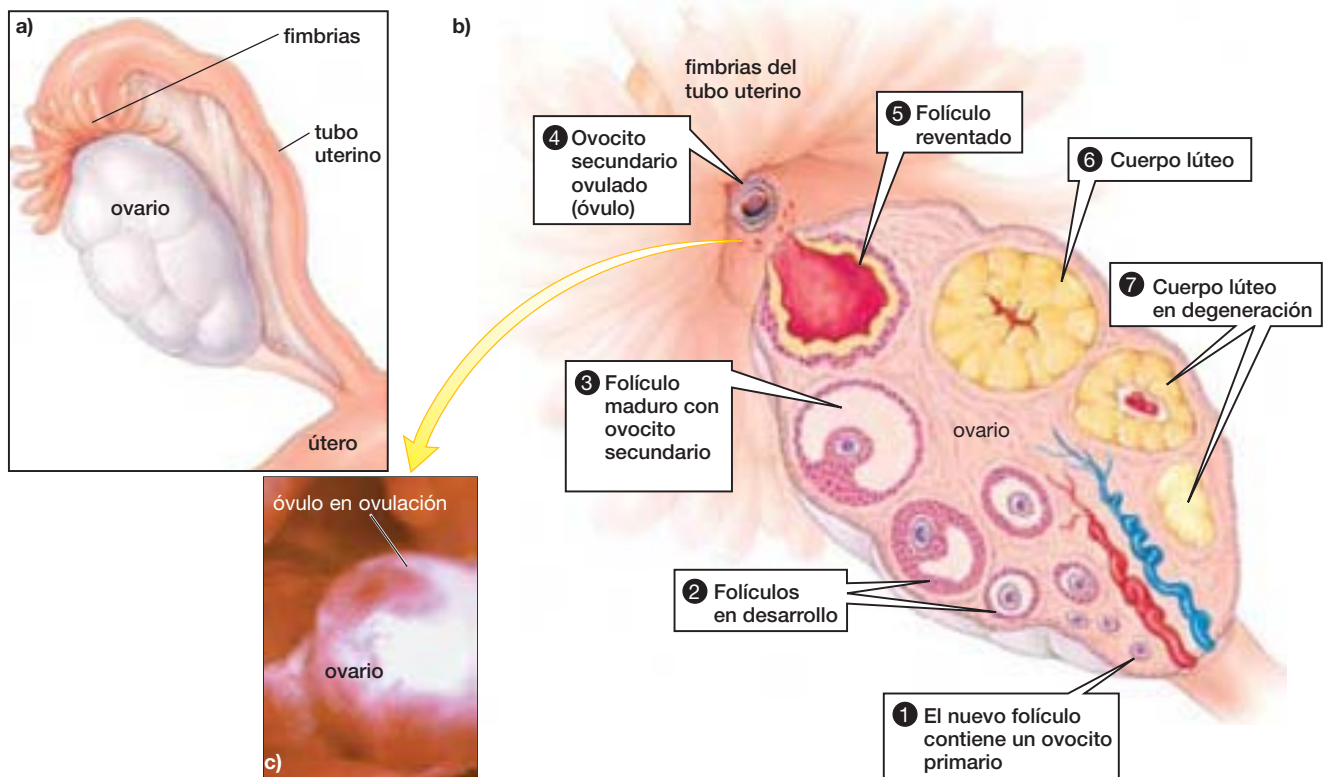


FIGURA 40-17 Estructuras que intervienen en la ovogénesis

a) Vista externa del ovario y el tubo uterino. b) Desarrollo de folículos en un ovario, representado en una secuencia temporal (según el giro de las manecillas del reloj, partiendo del extremo inferior derecho). ① Un ovocito primario comienza a desarrollarse dentro de un folículo. ②, ③ El folículo crece, suministrando tanto hormonas como nutrientes al ovocito en crecimiento. ④ Durante la ovulación, el óvulo irrumpe a través de la pared del ovario, rodeado por algunas células del folículo. ⑤, ⑥, ⑦ Las células del folículo restantes se convierten en el cuerpo lúteo, que secreta hormonas. Si no hay fecundación, el cuerpo lúteo se desintegra después de unos cuantos días. c) Dentro del ovario, un folículo libera un óvulo.

un cuerpo polar

FIGURA 40-18). Mientras tanto, las células accesorias del folículo se multiplican y secretan **estrógeno**. Al madurar el folículo, crece y finalmente irrumpe de la superficie del ovario para liberar el ovocito secundario en un proceso denominado **ovulación** (**FIGURA 40-17c**). Luego, el ovocito secundario viaja por el tubo que sale del ovario, llamado **tubo uterino** (que también se conoce como **oviducto** o **trompa de Falopio**). Por conveniencia, nos referiremos al ovocito secundario ovulado como el **óvulo**. Si el óvulo es fecundado, esto por lo general ocurre en el tubo uterino.

Algunas de las células del folículo acompañan al óvulo, pero casi todas permanecen en el ovario. Estas células crecen y se vuelven glandulares para formar el **cuerpo lúteo** (véase la **FIGURA 40-17b**), el cual secreta tanto estrógeno como una segunda hormona, **progesterona**. Si no hay fecundación, el cuerpo lúteo se desintegra unos cuantos días después.

Un hombre produce continuamente grandes cantidades de espermatozoides. En contraste, la mujer no produce gametos maduros (es decir, no ovula) si su útero no está debidamente preparado para recibir y nutrir al óvulo fecundado. El **ciclo menstrual** asegura que la ovulación se coordine con la preparación del útero, y está regulado por interacciones hormonales entre el hipotálamo, la hipófisis anterior y los ovarios, se describe en “De cerca: El control hormonal del ciclo menstrual”.

Las estructuras accesorias incluyen los tubos uterinos, el útero y la vagina

Cada ovario está alojado en el extremo abierto del tubo uterino (véase la **FIGURA 40-17a**), el cual tiene una orla de “dedos” ciliados llamados **fimbrias** que casi rodean al ovario. Los cilios crean una corriente que impulsa al nuevo óvulo hacia el tubo uterino, adonde los espermatozoides llegan luego de que ocurre la cópula. La fecundación por lo regular se efectúa dentro del tubo uterino. El **cigoto**, como se denomina al óvulo fecundado, baja por el tubo uterino impulsado por cilios batientes y llega al **útero** (también llamado **matriz**). Ahí se desarrollará durante nueve meses. La pared del útero tiene dos capas que corresponden a su doble función: nutrir al embrión en desarrollo y hacer posible el nacimiento del bebé. El revestimiento interior, o **endometrio**, tiene gran cantidad de vasos sanguíneos. Este revestimiento formará la contribución de la madre a la **placenta**, la estructura que transfiere oxígeno, dióxido de carbono, nutrientes y desechos entre la madre y el **feto** (un término que describe las etapas posteriores del desarrollo de los mamíferos), como veremos en el capítulo 41. La pared muscular exterior del útero se expande gradualmente conforme el nuevo ser en desarrollo crece, y luego se contrae con fuerza durante el parto para expulsar al bebé al mundo exterior.

Los folículos en desarrollo secretan estrógeno, que estimula al endometrio para que genere una extensa red de vasos

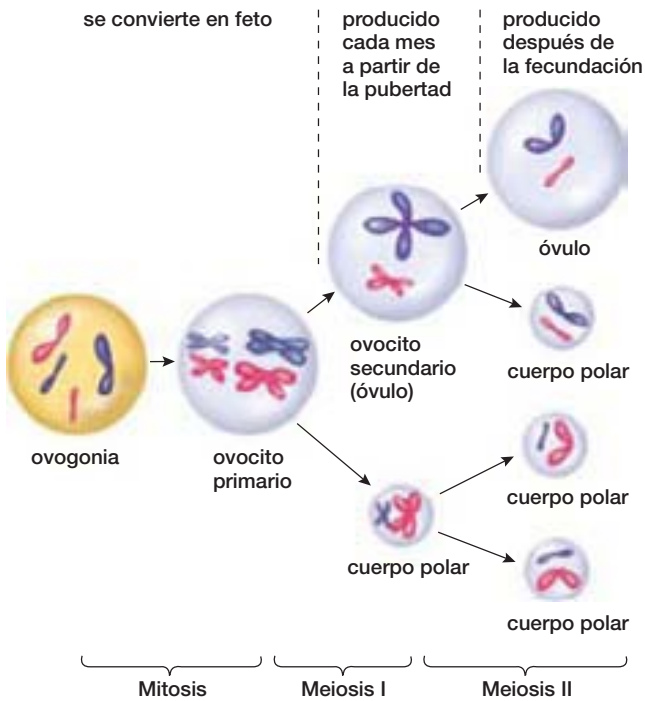


FIGURA 40-18 Los óvulos se forman por meiosis

La ovogonia experimenta mitosis y crece para formar el ovocito primario. En la meiosis I, casi todo el citoplasma está incluido en el ovocito secundario, dejando un pequeño cuerpo polar que contiene cromosomas, pero poco citoplasma. Durante la meiosis II, casi todo el citoplasma del ovocito secundario queda incluido en el óvulo, y un segundo cuerpo polar pequeño desecha los otros cromosomas "sobrantes". El primer cuerpo polar también podría sufrir la segunda división meiótica. En el ser humano, la meiosis II sólo se efectúa cuando un espermatozoide penetra en el óvulo.

sanguíneos y glándulas productoras de nutrimentos. Después de la ovulación, el estrógeno y la progesterona liberados por el cuerpo lúteo promueven el crecimiento ulterior del endometrio hasta formar un grueso envoltorio para el embrión. Así, de ser fecundado un óvulo, encontrará un entorno propicio para el crecimiento. Si el óvulo no se fecunda, el cuerpo lúteo se desintegra, los niveles de estrógeno y de progesterona declinan y el endometrio crecido también se desintegra. El útero se contrae (en ocasiones provocando dolores menstruales) para expulsar el tejido endometrial sobrante. Esto provoca un flujo de tejidos y sangre, que se conoce como **menstruación** (del latín *mensis*, que significa "mes").

El extremo exterior del útero casi está cerrado por el **cérvix** (o cuello de la matriz), un anillo de tejido conectivo que rodea una pequeña abertura. El cervix retiene al bebé en desarrollo en el útero y se expande sólo cuando se inicia el parto. Esto permite que la abertura central se expanda para que el bebé pueda pasar. Más allá del cervix está la **vagina**, que se abre al exterior. La vagina mantiene un pH ácido para reducir la posibilidad de infecciones y sirve como receptáculo para el pene durante el coito y como canal para el nacimiento (véase la figura 40-16).

La cópula permite la fecundación interna

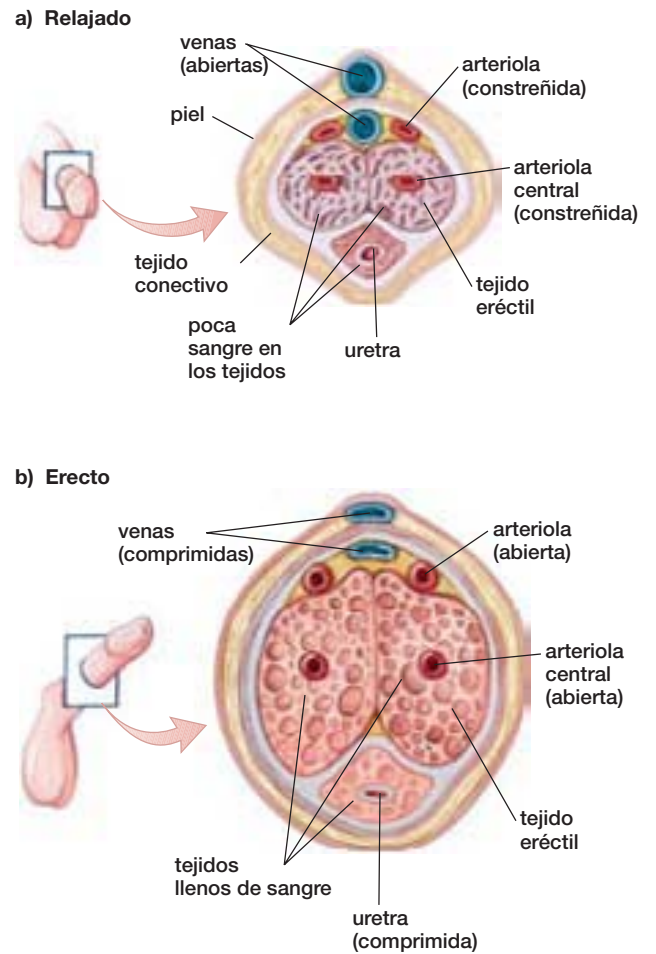


FIGURA 40-19 Cambios en el flujo de sangre dentro del pene causan erección

a) Normalmente, los músculos lisos que rodean a las arteriolas que desembocan en el pene están contraídos y limitan el flujo de sangre. **b)** Durante la excitación sexual, estos músculos se relajan y fluye sangre hacia los espacios dentro del pene. Al hincharse, el pene comprime las venas que salen de él, lo que aumenta la presión interna y hace que éste se alargue y se ponga firme.

entorno del tracto reproductor femenino. Durante la cópula, el pene se inserta en la vagina, donde se liberan los espermatozoides. Estos últimos nadan hacia arriba por el tracto reproductor femenino, desde la vagina, a través de la abertura del cervix al útero y hacia los tubos uterinos. Si la mujer ovuló uno o dos días antes, los espermatozoides se encontrarán con un óvulo en uno de los tubos uterinos. Sólo un espermatozoide logrará fecundar al óvulo e iniciar el desarrollo de un nuevo ser humano.

Durante la cópula, se depositan espermatozoides en la vagina de la mujer

El papel del hombre en la cópula inicia con la erección del pene. Antes de la erección, el pene está relajado (flácido) porque las arteriolas que lo abastecen de sangre están constreñidas y sólo permiten un pequeño flujo de sangre (**FIGURA 40-19a**

El ciclo menstrual es controlado por hormonas del hipotálamo (GnRH), la hipófisis o pituitaria anterior (FSH y LH) y los ovarios (estrógeno y progesterona). El ciclo se inicia con la llegada de la menstruación, ilustrada por la pérdida del endometrio como se muestra en la imagen inferior de la figura E40-1. Desde el punto de vista hormonal, el ciclo menstrual se inicia por la liberación espontánea de la hormona liberadora de gonadotropina (GnRH) por parte de las células del hipotálamo (imagen superior). Esta secreción es continua, a menos que otras hormonas la supriman, en especial la progesterona. El ciclo se inicia en el día 1 (que sigue luego del día 28 del ciclo) y es estimulado por el aumento en GnRH que se presenta alrededor del día 28. Sigamos ahora las descripciones del diagrama relacionando los números con la figura E40-1. (Los números están duplicados en la figura cuando la descripción se aplica a varias imágenes).

- ① La GnRH (imagen superior) estimula a la hipófisis anterior (segunda imagen) para que libere FSH (línea azul) y LH (línea roja). Estos aumentos se observan alrededor del día 28. El endometrio del útero se desprende durante la menstruación (imagen inferior).
- ② La FSH inicia el desarrollo de varios folículos, los cuales secretan estrógeno, dentro de los ovarios. Bajo la influencia combinada de la FSH, la LH y el estrógeno, los folículos crecen y el ovocito primario dentro de cada folículo comienza a desarrollarse. Por lo general, sólo un folículo completa el desarrollo cada mes.
- ③ Al crecer el folículo, secreta cantidades cada vez mayores de estrógeno (línea morada, cuarta imagen). Este estrógeno tiene tres efectos. Primero, promueve el desarrollo continuo del folículo y del ovocito primario que contiene (tercera imagen). Segundo, estimula el crecimiento del endometrio del útero (imagen inferior). Tercero, el estrógeno estimula al hipotálamo para que produzca más GnRH (véase la imagen superior).
- ④ La GnRH estimula un valor máximo de LH (y un pequeño aumento en la FSH) alrededor del día 14 del ciclo. El aumento de LH tiene tres consecuencias importantes. *Primera*, hace que se reanude la meiosis I en el ovocito para formar el ovocito secundario y el primer cuerpo polar.

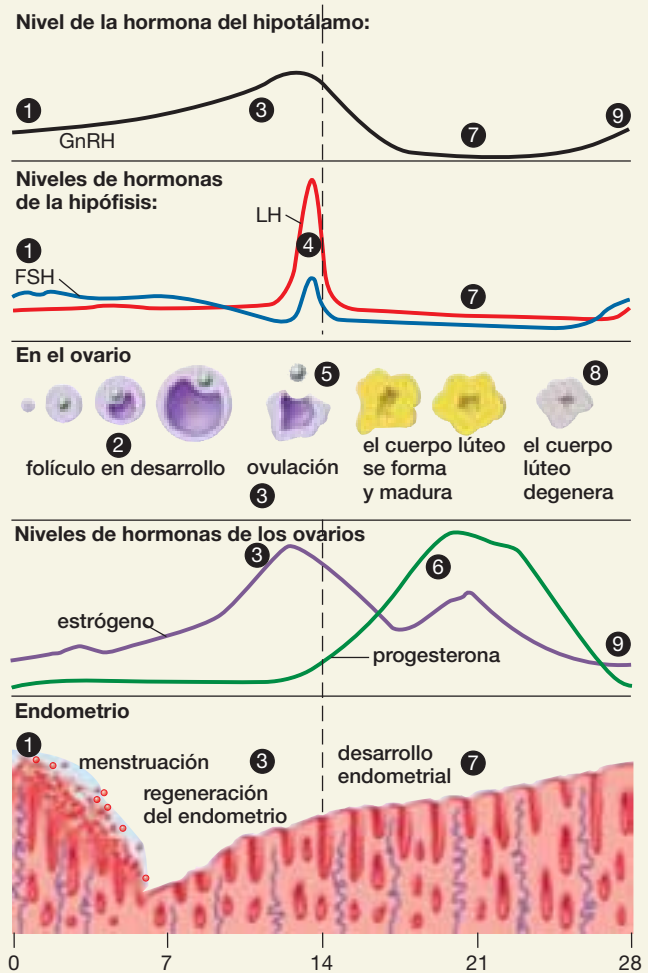


FIGURA E40-1 Control hormonal del ciclo menstrual

El ciclo menstrual es resultado de interacciones entre las hormonas del hipotálamo, la hipófisis anterior y los ovarios. Los números encerrados en círculos se refieren a las interacciones explicadas en el texto.

arteriolas). Al hincharse estos *tejidos eréctiles*, comprimen las venas que drenan el pene (**FIGURA 40-19b**). La presión sanguínea aumenta y provoca una erección. Una vez que el pene se inserta en la vagina, los movimientos estimulan todavía más a los receptores táctiles del pene, que provocan la eyaculación. La *eyaculación* se presenta cuando los músculos que rodean al epidídimo, el conducto deferente y la uretra se contraen y expulsan el semen del pene hacia la vagina. Aunque existe una gran variabilidad, en promedio se eyaculan 3 o 4 mililitros de semen, que contienen unos 300 millones de espermatozoides. El *orgasmo masculino* causa la eyaculación y una sensación intensa de placer y liberación de tensión.

En la mujer la excitación sexual hace que aumente el flujo sanguíneo en la vagina, en un par de pliegues de tejido llamados *labios* y en el *clítoris*, una pequeña estructura situada justo enfrente de la vagina (véase la figura 40-16). El clítoris, que se deriva del mismo tejido embrionario que la punta del pene, se inunda de sangre y presenta erección. La estimulación por parte del pene da como resultado el *orgasmo femenino*,

una serie de contracciones rítmicas de la vagina y el útero acompañadas por sensaciones de placer. El orgasmo femenino no es necesario para la fecundación.

El contacto íntimo durante la cópula crea una situación en la que se pueden transmitir fácilmente organismos patógenos, como se describe en “Guardián de la salud: Enfermedades de transmisión sexual”.

Durante la fecundación, los núcleos del espermatozoide y del óvulo se unen

Tanto los espermatozoides como los óvulos viven apenas unos días, así que la fecundación puede efectuarse sólo si la cópula ocurre dentro del plazo comprendido entre dos días antes y dos días después de la ovulación. Cuando el óvulo sale del ovario, está rodeado por células del folículo. Estas células, que ahora reciben el nombre de *corona radiada*, y una capa interna gelatinosa, la *zona pelúcida* (que significa “área clara”), forman una barrera entre los espermatozoides y el óvulo (**FIGURA 40-20a**). Investigaciones recientes apoyan la

- ⑤ *Segunda*, el incremento de LH hace que el folículo tenga un crecimiento explosivo final que culmina en la ovulación. *Tercera*, transforma el residuo del folículo en el cuerpo lúteo.
- ⑥ El cuerpo lúteo secreta progesterona (línea verde) y estrógeno (línea morada).
- ⑦ La combinación de estrógeno y progesterona inhibe la producción de GnRH y reduce la liberación de FSH y LH impidiendo el desarrollo de más folículos. Simultáneamente, el estrógeno y la progesterona estimulan al endometrio para que desarrolle una red de vasos sanguíneos y glándulas productoras de nutrientes. El endometrio llega a alcanzar un espesor de unos 4 milímetros.
- ⑧ Si no hay embarazo, el cuerpo lúteo comienza a desintegrarse aproximadamente 12 días después de la ovulación. La causa de esta desintegración es el cuerpo lúteo mismo, que secreta la progesterona que, a la vez, detiene la secreción de LH. Como el cuerpo lúteo sólo puede persistir mientras reciba estímulo de la LH (o por una hormona similar liberada por el embrión en desarrollo, como veremos más adelante), prácticamente induce su propia destrucción, en una especie de retroalimentación negativa.
- ⑨ Una vez desaparecido el cuerpo lúteo, los niveles de estrógeno y progesterona se desploman. Privado de la estimulación del estrógeno y la progesterona, el endometrio también muere en unos cuantos días, y su sangre y sus tejidos constituyen el flujo menstrual que se inicia el primer día del nuevo ciclo. El nivel reducido de progesterona en circulación deja de inhibir al hipotálamo, de manera que se reanuda la liberación espontánea de GnRH. Esta liberación estimula, a la vez,

la liberación de FSH y LH (de regreso al paso ①) e inicia el desarrollo de un nuevo conjunto de folículos para recomenzar el ciclo.

Durante el embarazo, el embrión mismo evita que se presenten estos cambios. Poco después de que la esfera de células (formada por el óvulo fecundado al dividirse) se incrusta en el endometrio, comienza a secretar una hormona parecida a la LH, llamada *gonadotropina coriónica* (CG). Esta hormona viaja por el torrente sanguíneo hasta el ovario, donde impide la desintegración del cuerpo lúteo. El cuerpo lúteo sigue secretando estrógeno y progesterona por varios meses, y el endometrio sigue creciendo y nutriendo al embrión. El embrión libera tanta CG que la hormona se excreta en la orina de la madre. De hecho, la mayor parte de las pruebas de embarazo se basan en la detección de CG en la orina para determinar si hay embarazo o no.

Aunque una retroalimentación negativa regula los niveles de la mayoría de las hormonas, los niveles hormonales del ciclo menstrual se regulan por retroalimentación tanto negativa como positiva. Durante la primera mitad del ciclo, las hormonas FSH y LH estimulan a los folículos para que produzcan estrógeno. Los niveles altos de estrógeno *estimulan* la máxima liberación de FSH y LH a la mitad del ciclo (retroalimentación positiva). Durante la segunda mitad del ciclo, el estrógeno y la progesterona *inhiben* la liberación de FSH y LH (retroalimentación negativa). La retroalimentación positiva inicial hace que las concentraciones de hormonas alcancen niveles altos y la retroalimentación negativa posterior vuelve a "apagar" el sistema, a menos que se presente un embarazo.

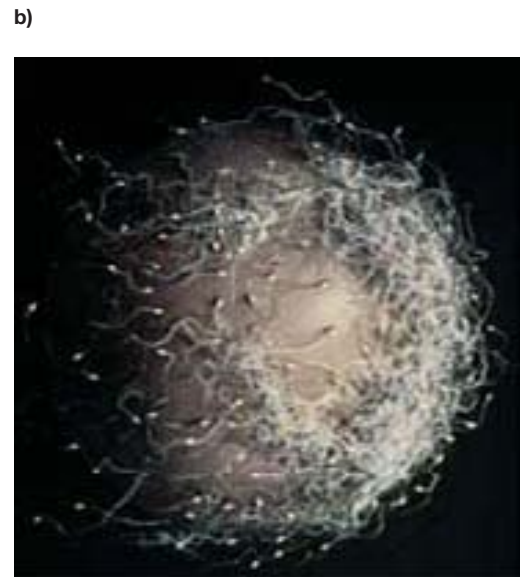
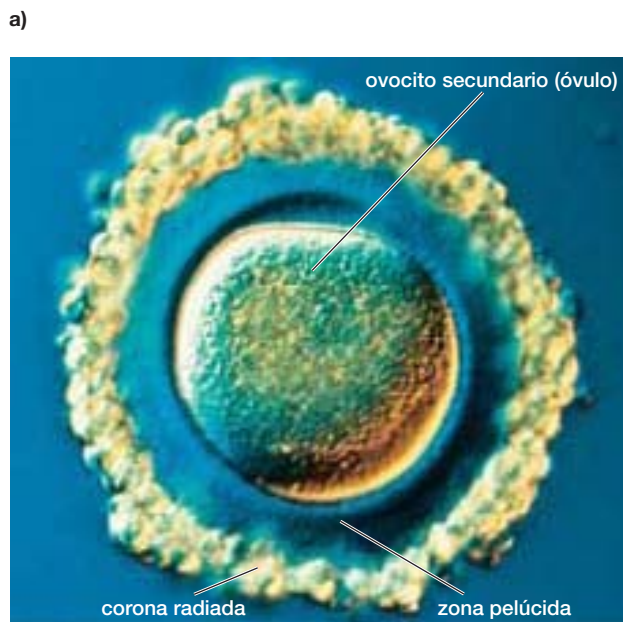


FIGURA 40-20 El ovocito secundario y la fecundación

a) Ovocito secundario humano poco después de la ovulación. Los espermatozoides deben abrirse camino por digestión a través de la corona radiada y la zona pelúcida para llegar al ovocito. b) Espermatozoides rodean al ovocito, atacando sus barreras defensivas. **PREGUNTA:** ¿Por qué el ovocito está tan bien protegido por las barreras circundantes?

Las **enfermedades de transmisión sexual (ETS)** se contraen primordialmente a través del contacto sexual. Causadas por virus, bacterias, protistas o artrópodos que infectan los órganos sexuales y el tracto reproductor, las ETS son un problema de salud grave y cada vez de mayor magnitud en todo el mundo.

INFECCIONES BACTERIANAS

La **gonorrea** es una ETS común, también conocida como blenorragia. La bacteria penetra en las membranas que recubren la uretra, el ano, el cérvix, el útero, los tubos uterinos y la garganta. En el hombre, la inflamación de la uretra hace que la micción sea dolorosa y haya una descarga de pus por el pene; en las mujeres, los síntomas a menudo son leves e incluyen flujo vaginal o micción dolorosa. Aunque la gonorrea puede tratarse con antibióticos, muchas personas infectadas tienen síntomas leves o ningún síntoma, por lo que fácilmente pueden diseminar la enfermedad. La gonorrea puede causar esterilidad al bloquear los tubos uterinos con tejido de cicatrización. La bacteria ataca los ojos de los bebés recién nacidos de madres infectadas y en otros tiempos fue una causa importante de ceguera. En la actualidad, casi todos los recién nacidos reciben de inmediato gotas oftálmicas con antibiótico de forma preventiva para matar a la bacteria.

La **sífilis** penetra en las membranas mucosas de genitales, labios, ano o mamas. Puesto que la bacteria de la sífilis no sobrevive mucho tiempo si se expone al aire, se propaga sólo por contacto íntimo. La sífilis inicia con una llaga en el punto de infección y se puede curar con antibióticos. Si no se trata, las bacterias de la sífilis se diseminan por todo el cuerpo, se multiplican y dañan muchos órganos como la piel, los riñones, el corazón y el cerebro, en algunos casos hasta provocar la muerte. La sífilis se puede transmitir al feto durante el embarazo; la piel, los dientes, los huesos, el hígado y el sistema nervioso central de esos bebés podrían sufrir daños.

La **clamidia** causa inflamación de la uretra en los hombres y de la uretra y el cérvix en las mujeres. En muchos casos no hay síntomas obvios, por lo que la infección no es tratada y se propaga. La bacteria de la clamidia puede infectar y bloquear los tubos uterinos y causar esterilidad. Una infección de clamidia causa inflamación de los ojos en bebés de madres infectadas y es una de las principales causas de ceguera en los países en desarrollo.

INFECCIONES VIRALES

El **síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA)** es causado por el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), como vimos en el capítulo 36. Se contagia primordialmente por actividad sexual, transfusión de sangre infectada y uso de agujas contaminadas, así como de la madre infectada al hijo recién nacido.

El virus VIH ataca al sistema inmunitario y deja a la víctima vulnerable a diversas infecciones, que casi siempre resultan mortales. No hay cura, pero las combinaciones de ciertos fármacos pueden prolongar la vida considerablemente.

El **herpes genital** produce dolorosas vesículas en los genitales y la piel circundante; se transmite primordialmente cuando hay vesículas presentes. El virus del herpes nunca sale del cuerpo y se manifiesta a intervalos impredecibles, posiblemente como respuesta a la tensión. Los medicamentos antivirales reducen la gravedad de los brotes. Las mujeres embarazadas con herpes genital activo pueden transmitir el virus al feto en desarrollo y, en algunos casos, esta enfermedad provoca incapacidad mental o física importantes o parto de un bebé muerto. El herpes también se puede transmitir de la madre al bebé durante el parto.

El **virus del papiloma humano (VPH)** infecta a un 50 por ciento de los individuos sexualmente activos en algún momento de sus vidas. La mayoría no presenta síntomas y se recupera de la infección sin siquiera saber que la tuvo. El virus provoca excrecencias o protuberancias que aparecen en los genitales externos, la vagina, el cérvix o el ano en las mujeres, y en el pene, el escroto, la ingle o los muslos en los hombres. Las verrugas por lo regular desaparecen, o bien, pueden ser extirpadas. El VPH es un problema de salud porque puede provocar cáncer cervical, una enfermedad que cuesta la vida a unas 4000 mujeres cada año en Estados Unidos. En 2006 la Agencia de Fármacos y Alimentos (Food and Drug Administration, FDA) aprobó una vacuna contra las formas de VPH que causan la mayoría de los casos de verrugas genitales y cánceres cervicales. Si se administra a mujeres jóvenes antes de que inicien su vida sexual, la vacuna podría reducir considerablemente los índices de cáncer cervical en el futuro.

INFECCIONES DE PROTISTAS Y ARTRÓPODOS

La **tricomoniasis** es causada por un protista flagelado, que coloniza las membranas mucosas que recubren el tracto urinario y los genitales de hombres y mujeres. Los síntomas son un derrame causado por una inflamación en respuesta al parásito. El protista se propaga mediante el coito, pero también se adquiere usando ropa y artículos de tocador contaminados. Una infección prolongada sin tratamiento produce esterilidad.

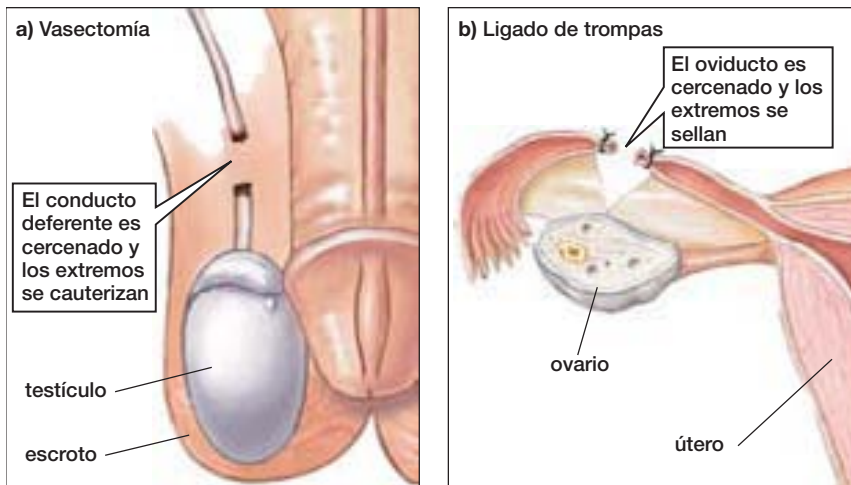
Las **ladillas**, también llamadas *piojos púbicos*, son arácnidos microscópicos (parientes de las arañas) que viven y ponen sus huevecillos en el vello púbico. Sus piezas bucales están adaptadas para penetrar en la piel y succionar sangre y líquidos corporales, proceso que causa intenso escozor. Las ladillas no sólo son irritantes, sino también pueden propagar enfermedades infecciosas. Se controlan con una higiene cuidadosa y tratamientos químicos.

hipótesis de que el óvulo humano libera un atrayente químico que incita a los espermatozoides a acercarse.

En el tubo uterino, cientos de espermatozoides llegan al óvulo, rodean a la corona radiada y liberan enzimas de su acrosoma (**FIGURA 40-20b**). Estas enzimas debilitan tanto la corona radiada como la zona pelúcida y permiten que penetre el espermatozoide, impulsado por las contorsiones de su flagelo, hasta el óvulo. Si no hay suficientes espermatozoides, la cantidad de enzimas liberadas no será suficiente y ninguno de los espermatozoides llegará al óvulo. Ésta podría ser la razón por la que la selección natural ha propiciado que se eyaculen tantos espermatozoides. Quizá uno de cada 100,000 llegará al tubo uterino y, de los que lo logran, uno de cada 20

encontrará al óvulo, de manera que sólo unos cuantos centenares de los 300 millones de espermatozoides que se eyacularon participarán en el ataque contra las barreras que rodean al óvulo.

Cuando el primer espermatozoide por fin entra en contacto con la superficie del óvulo, las membranas plasmáticas del óvulo y el espermatozoide se fusionan y la cabeza de este último se introduce en el citoplasma de aquél. Al entrar el espermatozoide, inicia dos cambios vitales en el óvulo: primero, vesículas cercanas a la superficie del óvulo liberan en la zona pelúcida sustancias que la refuerzan e impiden que otros espermatozoides ingresen en el óvulo; segundo, el óvulo sufre una segunda división meiótica y por fin produce un gameto haploide.

**FIGURA 40-21 Esterilización**

a) La vasectomía implica extirpar un tramo corto del conducto deferente y cauterizar los extremos cortados. Esto impide que los espermatozoides salgan del cuerpo. b) El ligado de trompas en la mujer implica eliminar una pequeña porción del oviducto y ligar los extremos; esto impide que los espermatozoides lleguen al ovocito y que éste llegue al útero.

La fecundación se lleva a cabo cuando los núcleos haploides del espermatozoide y el óvulo se fusionan para formar un núcleo diploide, el cual contiene todos los genes de un nuevo ser humano.

Anomalías en el aparato reproductor masculino o femenino pueden impedir la fecundación. Por ejemplo, un oviducto bloqueado impide que los espermatozoides lleguen al óvulo. Asimismo, los hombres que producen menos de 20 millones de espermatozoides por mililitro de semen por lo regular no pueden fecundar el óvulo de una mujer durante el coito porque son muy pocos los espermatozoides que llegan a él. Si los espermatozoides son normales en sus demás aspectos, estos hombres pueden tener hijos por *inseminación artificial*, en la que una gran cantidad de su semen se inyecta directamente en la vagina o útero durante la ovulación. En la actualidad, algunas parejas buscan ayuda de alta tecnología como la *fecundación in vitro* (véase “Guardián de la salud: Reproducción con alta tecnología”).

40.3 ¿CÓMO PODEMOS LIMITAR LA FERTILIDAD?

Durante casi toda la evolución humana, la mortalidad infantil fue elevada y la selección natural favoreció a las personas que producían suficientes hijos como para compensar esa alta tasa de mortalidad. En la actualidad, aunque la generalidad de los seres humanos no necesita tener muchos hijos para asegurar que unos cuantos sobrevivan hasta la edad adulta, aún conservamos los impulsos reproductores. Como resultado, cada año se agregan casi 74 millones de nuevos habitantes a nuestro superpoblado planeta, y el control de las tasas de natalidad se ha convertido en una necesidad ecológica. En el nivel individual, el control de la natalidad permite a las personas planear su familia para ofrecer las mejores oportunidades a sí mismas y a sus hijos.

Históricamente, no ha sido fácil limitar la fertilidad. En el pasado, algunas culturas emplearon técnicas tan ingeniosas como estrambóticas, como tragar espuma de la boca de un camello o colocar estiércol de cocodrilo en la vagina. Sin embargo, desde la década de 1970 se han desarrollado varias técnicas eficaces para la **anticoncepción**

elección de un método anticonceptivo siempre debe hacerse con base en una consulta con un profesional de la salud que esté capacitado para brindar mayor información y la mejor asesoría.

La esterilización es un método anticonceptivo permanente

A la larga, el método anticonceptivo que menor esfuerzo requiere es la **esterilización**, en la que se interrumpe el camino que han de recorrer los espermatozoides o el óvulo (**FIGURA 40-21**). En los hombres, el conducto deferente que sale de cada testículo se corta y luego los extremos se cauterizan (es decir, se sellan con calor) en una operación llamada *vasectomía*. Se seguirán produciendo espermatozoides, pero éstos no podrán llegar al pene durante la eyaculación. La cirugía se realiza con anestesia local y no se necesita suturar; no se conocen efectos de la vasectomía sobre la salud ni sobre el desempeño sexual. En un procedimiento novedoso, es posible colocar una abrazadera en el conducto deferente con un pequeño dispositivo de plástico.

La operación de *ligado de trompas de Falopio* o *salpingoclasia*, un poco más compleja, esteriliza a la mujer al cortar sus tubos uterinos u oviductos. Seguirá habiendo ovulación, pero los espermatozoides no podrán llegar al óvulo, ni éste podrá llegar al útero. Una alternativa consiste en insertar unas pequeñas estructuras con forma de resorte en cada oviducto a través de la vagina y el útero. El procedimiento no requiere de incisiones y sólo se aplica anestesia local. El resorte hace que el oviducto forme un tejido de cicatriz que bloquea el paso tanto de espermatozoides como de óvulos. En general, la esterilización es permanente, aunque un cirujano podría realizar una operación delicada y costosa para reconectar los conductos deferentes o los oviductos.

La anticoncepción y el aborto evitan o ponen fin al embarazo

La mayoría de los métodos anticonceptivos temporales evitan la ovulación o crean una barrera entre los espermatozoides y los óvulos. La **tabla 40-3** resume estos métodos.

Como hemos visto, la ovulación se pone en marcha mediante un incremento en el nivel de LH a la mitad del ciclo. Una forma obvia de impedir la ovulación es suprimir la liberación de LH proporcionando un abasto continuo de estrógeno

Tabla 40-3 Técnicas anticonceptivas no permanentes

Método	Técnica y mecanismo	Porcentaje de falla ¹	Protección contra ETS
Métodos hormonales: evitan la ovulación			
Píldora anticonceptiva	Píldora que contiene estrógeno y progesterona sintética (píldora combinada) o sólo progesterona (minipíldora). Se debe tomar diariamente.	0.1% al 3%	Ninguna
Parche anticonceptivo²	Un parche que se adhiere a la piel; contiene estrógeno y progesterona sintéticos. Se reemplaza semanalmente.	< 1%	Ninguna
Inyección para el control de la natalidad	Inyección de progesterona sintética que impide la ovulación. Se repite a intervalos de tres meses.	0.3%	Ninguna
Anillo vaginal	Anillo de plástico flexible impregnado con estrógeno y progesterona sintéticos. Se inserta en la vagina alrededor del cérvix; se reemplaza cada cuatro semanas.	0.3% al 8%	Ninguna
Métodos de barrera: evitan que los espermatozoides y los óvulos se encuentren			
Abstinencia	Decidir no tener actividad sexual.	0%	Excelente
Condón (masculino)	Vaina delgada y desechable de látex que se coloca sobre el pene antes del coito. Impide que los espermatozoides entren en la vagina. Es más efectivo si se lubrica con espermicida.	3% al 15%	Buena
Condón (femenino)	Bolsa de poliuretano lubricada que se inserta en la vagina; impide que los espermatozoides entren en el cérvix. Es más efectivo si se lubrica con espermicida.	5% al 21%	Probablemente buena (se dispone de pocos datos)
Esponja	Esponja desechable suave, con forma de domo, impregnada de espermicida que se inserta en la vagina; actúa durante 24 horas.	9% al 20% (los porcentajes de falla se duplican después de dar a luz)	Deficiente
Diafragma/capuchón cervical	Barreras flexibles reutilizables, con forma de domo, hechas de caucho o un material similar; se coloca espermicida en el domo y el dispositivo se instala sobre el cérvix antes del coito.	6% al 14%	Deficiente
Espermicida	Espuma espermicida que se coloca en la vagina antes del coito, como barrera química para los espermatozoides.	6% al 26%	Deficiente
Ritmo	Consiste en medir la temperatura corporal e identificar los cambios en el moco cervical para calcular el momento de la ovulación y evitar el coito durante el período fértil.	2% al 20% (pocas veces se efectúa correctamente)	Ninguna
Mecanismos de acción múltiple			
DIU (dispositivo intrauterino)³	Pequeño dispositivo de plástico tratado con hormonas o cobre, que un médico coloca en el útero a través del cérvix.	0.6% al 2%	Ninguna
“Píldora del día siguiente” (anticoncepción de emergencia)³	Dosis concentrada de las hormonas presentes en las píldoras anticonceptivas; se toma dentro de las 72 horas siguientes a la relación sexual.	25%	Ninguna

¹Porcentaje de mujeres que se embarazan al año. Las cifras baja y alta, respectivamente, indican las diferencias entre el uso consistente y correcto y el uso de una forma más típica, que no siempre es consistente o correcta.

²El parche es tan eficaz como la píldora y tiene mayor probabilidad de usarse adecuadamente; sin embargo, para las mujeres que pesan más de 90 kg, es menos eficaz.

³Aunque evitar la fecundación parece el principal mecanismo, los científicos no descartan que, en algunos casos, estos dos últimos métodos eviten la implantación después de la fecundación.

y progesterona. Ésta es la base de las píldoras anticonceptivas. En la actualidad se dispone de otras formas de presentación para el estrógeno y la progesterona, generalmente en forma sintética (véase la tabla 40-3).

Los *métodos de barrera* son más eficaces cuando se utilizan con espermicida (una sustancia que extermina los espermatozoides). El diafragma y el capuchón cervical son tapas de caucho que embonan bien sobre el cérvix e impiden que los espermatozoides entren en el útero. Los condones para el hombre y la mujer, que también ayudan a protegerse contra las enfermedades de transmisión sexual, evitan que los espermatozoides se depositen en la vagina. Existen técnicas menos confiables, como el uso de espermicidas y el *método del ritmo*

(la abstinencia de relaciones sexuales durante la ovulación). El método del ritmo tiene un alto porcentaje de falla por la falta de exactitud en la determinación del ciclo menstrual, que varía un poco de un mes a otro. El coito interrumpido (retirar el pene de la vagina justo antes de la eyaculación) y la ducha vaginal (expulsión de espermatozoides de la vagina por lavado antes de que hayan ingresado en el útero) no son formas confiables de evitar la concepción.

Otra técnica anticonceptiva es el uso del *dispositivo intrauterino (DIU)*, un pequeño dispositivo en forma de T que el médico inserta en el útero a través del cérvix. Las investigaciones indican que la principal forma en que funciona el DIU es evitando la fecundación. Recubrimientos de cobre o de



Aunque algunas tecnologías de reproducción asistida podrían utilizarse para salvar a ciertas especies animales de la extinción, la mayoría se emplea para ayudar a las parejas que sufren de infertilidad a tener hijos. Para las mujeres que no ovulan regularmente, existen fármacos de la fertilidad (que provocan la liberación de FSH y LH adicionales), lo que da por resultado múltiples ovulaciones. Como consecuencia de este procedimiento, la tasa de nacimientos múltiples —que suponen mayores riesgos tanto para la madre como para los bebés— ha aumentado drásticamente (**FIGURA E40-2**).

Mediante la inyección *intracitoplásmica de espermatozoides* (ICSI, por las siglas de *intracytoplasmic sperm injection*), incluso los hombres cuyos espermatozoides no son capaces de nadar y fertilizar al óvulo pueden tener hijos propios. En la ICSI, se extraen espermatozoides prematuros de los testículos y luego se inyectan directamente en el citoplasma del óvulo con la ayuda de una micropipeta (**FIGURA E40-3**).

En todo el mundo viven unos tres millones de personas que fueron concebidas en un recipiente de vidrio por medio de la *fertilización in vitro* (FIV, que literalmente significa “fecundación en vidrio”). Primero, la mujer recibe inyecciones diarias de fármacos para estimular múltiples ovulaciones. Luego, los cirujanos insertan una aguja larga y hueca en cada folículo maduro y extraen el ovocito por succión. Por lo regular, se colocan muchos ovocitos en un plato de vidrio al que se añaden espermatozoides recién obtenidos, y se incuban de uno a siete días. Luego, unos cuantos de estos embriones incipientes se toman con un tubo y se depositan muy suavemente en el útero. Trasplantar múltiples embriones eleva la tasa de éxito de la implantación, pero también eleva la probabilidad de que haya nacimientos múltiples, los cuales implican un riesgo mucho mayor que los partos individuales. Para las parejas que tienen trastornos genéticos graves, es posible retirar una célula de un embrión FIV para analizarla en busca de defectos en el DNA (**FIGURA E40-4**) antes de hacer la implantación en el útero.

Usando la tecnología de clasificación de los espermatozoides, los padres ahora pueden aumentar sus probabilidades de



FIGURA E40-2 Séptuples

hormonas en diferentes DIU y la reacción del útero a este objeto extraño crean un ambiente hostil para los espermatozoides, lo que interfiere con su avance por el oviducto.

La píldora “de la mañana siguiente” contiene hormonas similares a las de las píldoras anticonceptivas, pero en mayores dosis. Esta forma de *anticoncepción de emergencia* es más

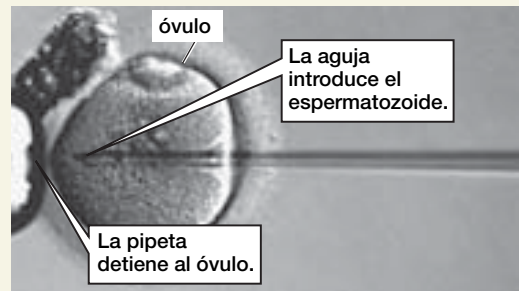


FIGURA E40-3 Un espermatozoide es inyectado en un óvulo. Un óvulo, sostenido por una pipeta, es inyectado con un solo espermatozoide que se coloca directamente en su citoplasma. Observa la corona radiada que rodea al óvulo. **PREGUNTA:** ¿Por qué el espermatozoide debe inyectarse en el óvulo, en vez de simplemente ponerlo en contacto con éste?

tener un niño o una niña. Los espermatozoides que portan un cromosoma X tienen un 2.8 por ciento más de DNA que los que portan un cromosoma Y. Esta diferencia sirve de base para elegir una muestra de espermatozoides e incrementar el porcentaje de espermatozoides X o Y, los cuales luego se colocan directamente en el útero de la madre. Esto es importante si los padres son portadores de trastornos vinculados con el sexo, aunque algunos utilizan esta técnica como una forma de equilibrar los hijos de uno y otro sexo en sus familias. Enriquecer las muestras de espermatozoides a favor de los espermatozoides X ha tenido mayor éxito.

En el mundo de la reproducción asistida, una viuda podría quedar embarazada con los espermatozoides de su esposo fallecido, previamente almacenados a temperaturas bajo cero. Hace poco, una mujer, cuyos ovarios no podían producir óvulos, tuvo gemelos. Sus hijos provinieron de óvulos donados que se habían conservado en congelación durante dos años. Una madre sustituta puede tener el hijo o la hija de una mujer a la que se extirpó el útero o que simplemente no quiere pasar por un embarazo. El óvulo y el espermatozoide que produjeron el feto que crece dentro de la madre sustituta quizá provengan de la pareja que la contrató, aunque también es posible que tanto el óvulo como el espermatozoide provengan de personas sin parentesco. De esta forma, existe la posibilidad de que en la actualidad un bebé tenga ¡hasta cinco “progenitores”!

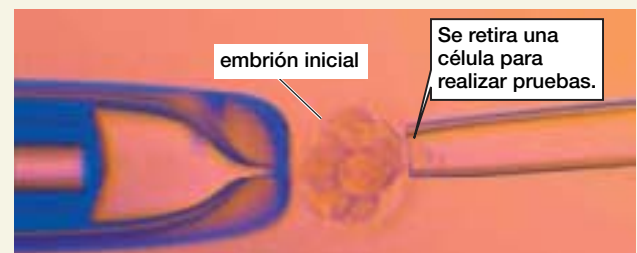


FIGURA E40-4 Una célula es extraída del embrión para efectuar pruebas genéticas

efectiva si se toma dentro de un plazo no mayor a las 72 horas posteriores a la relación sexual. Estas píldoras funcionan de diversas formas: podrían detener o retrasar la ovulación, interferir con la formación del cuerpo lúteo, interferir con el avance de los espermatozoides a través del oviducto, o evitar que el embrión se implante después de la fecundación.

Los únicos métodos temporales de control de la natalidad disponibles para los hombres son el condón y la abstinencia. Una razón es que los hombres producen unos 100 millones de espermatozoides al día, por lo que, incluso en el caso de que se terminara al 95 por ciento de ellos, quedarían suficientes para provocar un embarazo no deseado. Además, la investigación sobre los métodos anticonceptivos para los hombres se ha quedado rezagada en comparación con los métodos para las mujeres, en parte porque las principales empresas farmacéuticas creyeron que el mercado era demasiado pequeño para justificar los enormes gastos que implicarían la investigación, la producción y el lanzamiento al mercado de estos nuevos fármacos. Pero encuestas recientes en todo el mundo han mostrado que los hombres están dispuestos a asumir una mayor responsabilidad frente a la anticoncepción. Existen tres posibilidades para desarrollar métodos anticonceptivos no permanentes para hombres.

Bloqueo de conductos deferentes: Decenas de miles de hombres en China utilizan tapones de silicón que se colocan en el conducto deferente para bloquear la liberación de espermatozoides. En India se están haciendo pruebas clínicas en seres humanos con una sustancia (RISUG) que bloquea parcialmente el vaso deferente y daña los espermatozoides que logran pasar. Los tapones de silicón se retiran quirúrgicamente y el RISUG se disuelve con una solución que se inyecta en el vaso deferente.

Métodos hormonales: Administrar testosterona evita la formación de espermatozoides al impedir la liberación de LH y FSH mediante retroalimentación negativa (véase la figura 40-15). Un prometedor anticonceptivo a base de hormonas para los hombres (ahora en la fase de pruebas clínicas) combina inyecciones de testosterona, cada 4 o 6 semanas, con un implante de progesterona sintética que suprime la posterior liberación de FSH y LH.

Fármacos no hormonales: Se están realizando pruebas en animales para un fármaco que bloquea una proteína en el epidídimo que normalmente activa la capacidad de los flagelos de los espermatozoides para nadar. Con sus flagelos inmovilizados, los espermatozoides no serán capaces de nadar hacia el óvulo. Un segundo enfoque es una "vacuna" que hace que el organismo produzca anticuerpos para una proteína (*eppin*), la cual resulta crucial para producir espermatozoides funcionales. En los monos esta vacuna causó esterilidad temporal, que pudo mantenerse estable mediante inyecciones periódicas.

Aunque estos fármacos y otros en proceso de desarrollo no estarán disponibles en Estados Unidos todavía durante varios años, prometen diversificar las opciones de anticonceptivos masculinos en el futuro.

El aborto sustrae al embrión del útero

El aborto no se considera un método de anticoncepción ya que pone fin al embarazo, en vez de evitarlo. Por lo general, implica dilatar el cérvix y retirar al embrión mediante succión. La mayoría de los abortos se practican durante los tres primeros meses del embarazo. De manera alternativa, el aborto puede ser inducido durante las primeras siete semanas de embarazo mediante el fármaco RU-486 (mifepristone),

que se une a los receptores de progesterona y bloquea las acciones de esta hormona, la cual resulta esencial para conservar el endometrio durante el embarazo.

Quizá hayas notado que las técnicas de control natal están diseñadas principalmente para las mujeres. ¿Por qué? ¿Se están desarrollando anticonceptivos para el hombre? Para descubrirlo, lee la sección "Investigación científica: En busca de un anticonceptivo masculino".

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO



EL ZOOLOGICO CONGELADO



Aunque la tecnología reproductiva asistida (TRA) está encaminada a salvar especies en peligro de extinción, no resulta atractiva para todos los conservacionistas. Algunos sostienen que la única forma apropiada de preservar una especie es mantener suficientes hábitat naturales para dar sustento a una población en desarrollo lo bastante grande como para mantenerse a sí misma y conservar una diversidad genética razonable. Los defensores de la TRA están de acuerdo con lo anterior, pero apoyan los esfuerzos de alta tecnología como una acción paralela a la preservación de los hábitat, en particular para los animales en peligro crítico de extinción. El doctor Oliver Ryder, genetista y director del zoológico congelado de San Diego, explica: "[El zoológico congelado] representa un legado genético, un banco de DNA. En el futuro, los científicos tendrán mejores herramientas, pero no tendrán acceso a más genes". La doctora Betsy Dresser, quien preside el Centro Audubon para la

investigación de especies en peligro de extinción en Nueva Orleans, describe la TRA como "una red de seguridad". "Si congelamos 200 o 300 embriones, es más que sufi-

ciente para evitar que una población se extinga". Dresser, quien trabaja para desarrollar técnicas de transferencia de embriones entre especies que permitirán a las leonas



FIGURA 40-22 Un tigre de probeta

servir como madres sustitutas del tigre siberiano en peligro de extinción (**FIGURA 40-22**), afirma: "No quiero ver tigres sólo en los libros de texto algún día. Ni quiero que la gente que viva aquí dentro de 100 años mire hacia atrás y diga '¡Dios mío, tenían esa tecnología y dejaron que esos animales se extinguieran!'" Los partidarios de la TRA prevén un futuro en el que los hábitat naturales se hayan recuperado y estén protegi-

dos, de manera que las poblaciones de especies en peligro crítico de extinción que se criaron en los zoológicos (manteniendo tanta diversidad genética como sea posible) puedan ser liberadas para prosperar y reproducirse en sus ambientes naturales.

Piensa en esto Los tejidos congelados del último bucardo que quedaba en el mundo y del último po'ouli son la única esperanza de

que la Tierra algún día albergará estas especies únicas. Pero sólo la clonación producirá un nuevo bucardo o un nuevo po'ouli. Los animales producidos por clonación serán genéticamente idénticos y sufrirán otros problemas que se han presentado ya en los ejemplares clonados (véase el capítulo 11). ¿Se debería invertir dinero y el esfuerzo de los científicos para tratar de hacer resurgir estas especies? Argumenta tu respuesta.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

40.1 ¿Cómo se reproducen los animales?

Los animales se reproducen sexual o asexualmente. En la reproducción sexual, los núcleos de los gametos haploides, por lo regular de dos progenitores distintos, se unen y producen un descendiente genéticamente diferente de cualquiera de los progenitores. La reproducción asexual, ya sea por gemación, fisión o partenogénesis, produce descendientes genéticamente idénticos al progenitor.

Durante la reproducción sexual, el gameto masculino (un espermatozoide móvil y pequeño) fecunda el gameto femenino (un óvulo grande y sin movimiento). Algunas especies son hermafroditas, pues producen tanto espermatozoides como óvulos, pero la mayoría de las especies tienen sexos separados. La fecundación puede tener lugar fuera del cuerpo de los animales (fecundación externa) o dentro del cuerpo de la hembra (fecundación interna). La fecundación externa debe efectuarse en agua para que los espermatozoides puedan nadar hacia el óvulo. La fecundación interna normalmente se realiza mediante la cópula, en la que el macho deposita espermatozoides directamente en el tracto reproductor de la hembra.

40.2 ¿Cómo funciona el aparato reproductor humano?

El tracto reproductor masculino consiste en un par de testículos, que producen espermatozoides y testosterona, y estructuras accesorias que llevan los espermatozoides al tracto reproductor de la hembra y secretan líquidos que activan el nado de los espermatozoides al tiempo que suministran energía. En el hombre, las hormonas FSH y LH, producidas por la hipófisis anterior, estimulan la espermatogénesis y la producción de testosterona. Estos dos procesos son casi continuos; se inician en la pubertad y perduran hasta la muerte.

El tracto reproductor femenino consiste en un par de ovarios, que producen óvulos además de las hormonas estrógeno y progesterona, y estructuras accesorias, que conducen los espermatozoides hacia el óvulo, además de recibir y nutrir al embrión durante el desarrollo prenatal. En la mujer, la ovogénesis, la producción de hormonas y el desarrollo del endometrio varían según un ciclo menstrual de un mes. El ciclo se controla con hormonas del hipotálamo (GnRH), la hipófisis anterior (FSH y LH) y los ovarios (estrógeno y progesterona).

Durante la cópula, el hombre eyacula semen en la vagina de la mujer. Los espermatozoides se desplazan por la vagina y el útero hasta el tubo uterino u oviducto, donde suele efectuarse la fecundación. El óvulo no fecundado está rodeado por dos barreras, la corona radiada y la zona pelúcida. Enzimas liberadas por el acrosoma en la cabeza del espermatozoide digieren estas capas y permiten al espermatozoide llegar al óvulo. Sólo un espermatozoide entra en el óvulo y lo fecunda.

La capacidad para reproducirse se inicia en la pubertad, cuando la hormona GnRH producida por el hipotálamo provoca la liberación de FSH y LH por parte de la hipófisis anterior. Estas hormonas, a la vez, estimulan a las glándulas sexuales para que produzcan testosterona (en el caso de los hombres) y estrógeno (en las mujeres), los cuales inducen el desarrollo de caracteres sexuales secundarios y la producción de espermatozoides y óvulos, respectivamente.

Web tutorial 40.1 El aparato reproductor masculino

Web tutorial 40.2 El aparato reproductor femenino

40.3 ¿Cómo podemos limitar la fertilidad?

La anticoncepción puede lograrse mediante la abstinencia o la esterilización; esta última consiste en cortar los conductos deferentes en el hombre (vasectomía) o los tubos uterinos en la mujer (ligado de trompas). También es posible bloquear los oviductos insertando un dispositivo con forma de resorte, el cual provoca que se forme tejido de cicatrización. Entre las técnicas anticonceptivas temporales están las que impiden la ovulación mediante estrógeno y progesterona; por ejemplo, las píldoras anticonceptivas, los parches anticonceptivos, el anillo vaginal y las inyecciones de hormonas. Los métodos de barrera, que impiden que los espermatozoides y el óvulo se junten, incluyen el diafragma, el capuchón cervical, la esponja y el condón, acompañados de espermicidas. Los espermicidas, por sí solos, son menos eficaces. El coito interrumpido y las duchas vaginales son técnicas poco efectivas. El método del ritmo, que tiene un alto porcentaje de falla, requiere abstinencia en los días cercanos a la ovulación. Los dispositivos intrauterinos impiden que los espermatozoides lleguen al óvulo. La anticoncepción de emergencia (o "píldora del día siguiente") tiene varios mecanismos de acción. El aborto causa la expulsión del embrión en desarrollo.

TÉRMINOS CLAVE

acrosoma *pág. 821*
anticoncepción *pág. 829*
célula intersticial *pág. 821*
células de Sertoli *pág. 821*

ciclo menstrual *pág. 824*
cigoto *pág. 824*
clamidia *pág. 828*
clítoris *pág. 826*

cópula *pág. 819*
corona radiada *pág. 826*
cuerpo lúteo *pág. 824*
cuerpo polar *pág. 824*

embrión *pág. 823*
endometrio *pág. 824*
enfermedad de transmisión sexual (ETS) *pág. 828*

- escroto** *pág. 820*
espermátida *pág. 821*
espermatozoides primarios *pág. 821*
espermatozoides secundarios *pág. 821*
espermatozoides *pág. 819*
espermatogénesis *pág. 821*
espermatogonias *pág. 821*
espermatozoides *pág. 817*
esterilización *pág. 829*
estrógeno *pág. 820*
fecundación *pág. 816*
fecundación externa *pág. 817*
fecundación interna *pág. 819*
feromona *pág. 818*
feto *pág. 824*
fisiología *pág. 816*
folículo *pág. 823*
gemación *pág. 816*
glándula bulbouretral *pág. 822*
gónada *pág. 820*
gonorrea *pág. 828*
hermafrodita *pág. 817*
herpes genital *pág. 828*
hormona estimuladora de folículos (FSH) *pág. 820*
hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) *pág. 820*
hormona luteinizante (LH) *pág. 820*
labios *pág. 826*
ladillas *pág. 828*
menstruación *pág. 825*
ovario *pág. 823*
ovocito primario *pág. 823*
ovocito secundario *pág. 823*
ovogénesis *pág. 823*
ovogonias *pág. 823*
ovulación *pág. 819*
óvulo *pág. 817*
partenogénesis *pág. 816*
pene *pág. 820*
placenta *pág. 824*
progesterona *pág. 824*
próstata *pág. 822*
pubertad *pág. 820*
regeneración *pág. 816*
reproducción asexual *pág. 816*
reproducción sexual *pág. 816*
semen *pág. 822*
sífilis *pág. 828*
síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA) *pág. 828*
testículo *pág. 820*
testosterona *pág. 820*
tricomoniasis *pág. 828*
tubo uterino *pág. 824*
túbulo seminífero *pág. 821*
uretra *pág. 822*
útero *pág. 824*
vagina *pág. 825*
vesícula seminal *pág. 822*
virus del papiloma humano (VPH) *pág. 828*
zona pelúcida *pág. 826*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Menciona las ventajas y desventajas de la reproducción asexual, la reproducción sexual, la fecundación externa y la fecundación interna, dando un ejemplo de animal que utilice cada mecanismo.

Compara las estructuras del óvulo y del espermatozoides. ¿Qué modificaciones estructurales tienen los espermatozoides que facilitan el movimiento, el uso de energía y la digestión?

¿Qué papel desempeña el cuerpo lúteo en el ciclo menstrual? ¿En las primeras etapas del embarazo? ¿Qué determina su supervivencia después de la ovulación?

Elabora una tabla de enfermedades de transmisión sexual comunes. Incluye el nombre de la enfermedad, la causa (organismo o virus), los síntomas y el tratamiento.

5. Menciona en orden las estructuras por las que un espermatozoides pasa en su camino desde los túbulos seminíferos del testículo hasta el tubo uterino de la hembra.

6. Menciona las tres glándulas accesorias del tracto reproductor masculino. ¿Qué funciones tienen las secreciones que producen?

7. Elabora un diagrama del ciclo menstrual y describe las interacciones de las hormonas secretadas por el hipotálamo, la hipófisis y los ovarios que originan el ciclo.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Comenta el método de control de la natalidad más eficaz o apropiado para cada una de estas parejas: la pareja A, que tiene relaciones sexuales tres veces a la semana, pero no quiere tener hijos nunca; la pareja B, que tiene relaciones una vez al mes y quizás quiera tener hijos algún día; y la pareja C, que tiene relaciones tres veces a la semana y quiere tener hijos algún día.
2. Un anticonceptivo hipotético que bloquea los receptores de FSH y LH ¿sería útil en los hombres? ¿Cómo funcionaría? ¿Qué efectos colaterales podría tener?
3. Piensa en todas las opciones de que una pareja dispone para tener hijos, como la fecundación *in vitro* empleando los óvulos y espermatozoides propios, la fecundación *in vitro* empleando óvulos o espermatozoides de un donador, e inseminación de una madre

sustituta con espermatozoides del esposo. Piensa en otras más. ¿Qué problemas éticos presentan estas diversas opciones? ¿Qué problemas legales y médicos podrían surgir?

4. Los fármacos de fertilidad han elevado considerablemente la incidencia de partos múltiples. Cuando más de dos embriones comparten el útero, la incidencia de partos prematuros y problemas del desarrollo aumenta considerablemente. El costo de cuidar a varios bebés prematuros es muy alto. Cuando los fármacos de fertilidad producen múltiples embriones, el médico puede eliminar selectivamente algunos de ellos en las primeras etapas del desarrollo, de manera que los demás tengan una mejor oportunidad de desarrollarse plena y normalmente. En vista de lo anterior, comenta las implicaciones éticas de tomar fármacos de fertilidad.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Estabrook, B. "Staying Alive". *Wildlife Conservation*, junio de 2002. La tecnología reproductiva asistida ofrece esperanza para salvar especies en peligro de extinción.

Khamisi, R. "Sperm bounce Back After Male Contraception". *New Scientist*, 28 de abril de 2006. Ensayos clínicos muestran una rápida recuperación en la producción de espermatozoides después de que los hombres dejan de tomar anticonceptivos hormonales.

Kingsland, J. "Sperm Warfare". *New Scientist*, 10 de enero de 2004. La investigación en torno a anticonceptivos masculinos apunta a los espermatozoides.

Lanza, R. P., Dresser, B. L. y Damiani, P. "Cloning Noah's Ark". *Scientific American*, noviembre de 2000. Para algunas especies en peligro de extinción, la clonación podría ofrecer la mejor oportunidad de supervivencia.

Milius, S. "Battle of the Hermaphrodites". *Science News*, 16 de septiembre de 2006. Dos sexos en un cuerpo desarrollan comportamientos reproductivos interesantes.

Ness, E. "How to Breed a 2,000-pound Rhino". *Discover*, noviembre de 2001. El rinoceronte de Sumatra, en peligro de extinción, se reprodujo en cautiverio por primera vez en un siglo; sólo sobreviven unos 300 en vida silvestre.

Ojcius, D. M., Darville, T. y Bavoil, P. M. "Can Chlamydia Be Stopped?" *Scientific American*, mayo de 2005. La clamidia es la principal causa de ceguera susceptible de prevención en el mundo; nuevos avances podrían controlarla.

Riddle, J. M. y Estes, J. W. "Oral Contraceptives in Ancient and Medieval Times". *American Scientist*, mayo-junio de 1992. ¿Cómo controlaban su fertilidad las mujeres antes de que existiera la medicina moderna?

Whelan, J. "Reproduction Revolution: Sex for Fun, IVF for Children". *New Scientist*, 20 de octubre de 2006. Este artículo explora las opciones reproductivas de la alta tecnología.

Wright, K. "Male Contraception". *Discover*, octubre de 2002. El autor explora los desafíos y avances en el desarrollo de anticonceptivos masculinos.

Desarrollo animal



John, quien como adulto lucha con los efectos del síndrome de alcoholismo fetal (SAF), ha ayudado a su madre adoptiva Teresa Kellerman a advertir a las mujeres acerca de los riesgos de beber alcohol durante el embarazo. (Imagen en recuadro) Debbie ahora se arrepiente de haber bebido alcohol estando embarazada de su hija Sabrina, cuyo sistema nervioso resultó dañado.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal

41.1 ¿En qué difieren el desarrollo indirecto y el directo?

Durante el desarrollo indirecto, los animales sufren un cambio radical en la forma de su cuerpo

Los animales recién nacidos que tienen un desarrollo directo parecen adultos en miniatura

41.2 ¿Cómo procede el desarrollo animal?

Con la segmentación del cigoto se inicia el desarrollo

La gastrulación forma tres capas de tejidos

Las estructuras adultas se desarrollan durante la organogénesis

41.3 ¿Cómo se controla el desarrollo?

Cada célula contiene todos los planos genéticos del organismo

Investigación científica: La promesa de las células madre

La transcripción genética se regula con precisión durante el desarrollo

41.4 ¿Cómo se desarrollan los seres humanos?

Durante los primeros dos meses, la diferenciación y el crecimiento son muy rápidos

La placenta secreta hormonas y permite el intercambio de materiales entre la madre y el embrión

El crecimiento y el desarrollo continúan durante los últimos siete meses

El desarrollo culmina con el parto y el alumbramiento

Las hormonas del embarazo estimulan la secreción de leche

Guardián de la salud: La placenta sólo brinda una protección parcial

El envejecimiento es inevitable

Enlaces con la vida: ¿Por qué el parto es tan difícil?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal



ESTUDIO DE CASO

LOS ROSTROS DEL SÍNDROME DE ALCOHOLISMO FETAL

“LA SENSACIÓN DE CULPABILIDAD ES TREMENDA... lo hice una y otra vez... no sé cómo decírselo. Era algo que pude haber evitado”. Debbie, la joven madre de este caso, tiene siete hijos. A su hija Cory le diagnosticaron **síndrome de alcoholismo fetal (SAF)**, el tipo de daño más severo causado por el alcohol. Cuando Cory tenía tres años era hiperactiva, pero hablaba como si tuviera un año de edad. Los médicos creen que Sabrina (imagen en recuadro), la hija más pequeña de Debbie también es víctima de ese síndrome porque su carita muestra los rasgos característicos del SAF. A los siete meses de edad, mostraba debilidad y comenzaba a tener convulsiones; además, no podía ingerir alimentos sólidos porque no era capaz de cerrar el labio superior alrededor de la cuchara. Cuando Debbie bebía alcohol durante el embarazo, su hijo en desarrollo sufría los efectos. John (foto de ini-

cio del capítulo) es un joven adulto con el síndrome de alcoholismo fetal; su madre consumía alcohol cuando estaba embarazada y estaba bajo los efectos etílicos cuando dio a luz.

Los daños causados a los hijos cuando las madres sufren la enfermedad del alcoholismo son irreversibles. John tuvo la suerte de ser adoptado por una mujer verdaderamente admirable, Teresa Kellerman, quien realiza una importante labor educativa al advertir a la gente acerca de los peligros de consumir alcohol durante el embarazo. “Si uno no interviene, los chicos terminan sin hogar y sin trabajo, se vuelven drogadictos o son arrestados, tienen hijos no deseados, viven en la calle o mueren prematuramente”, dice Kellerman, quien fundó el Centro de Recursos Comunitarios para el Síndrome de Alcoholismo Fetal, en Tucson, Arizona. La madre de Sabrina empezó su rehabilita-

ción y tiene toda la intención de permanecer sobria y de ser una buena madre para todos sus hijos. Pero aun así, ni John, ni Sabrina, ni los miles de niños que nacen cada año con este síndrome tienen la más mínima probabilidad de sobrevivir si carecen de una estrecha supervisión. Decenas de miles de niños que presentan un daño menor a causa del alcoholismo de sus madres seguirán vivos, pero nunca desarrollarán todo su potencial.

¿Cómo resulta dañado un niño en desarrollo cuando la madre bebe alcohol estando embarazada? ¿Qué rasgos característicos buscan los médicos para diagnosticar el SAF? ¿Hay alguna cantidad de alcohol que una mujer pueda beber sin ningún riesgo durante el embarazo? ¿Existe un periodo en el desarrollo fetal durante el cual una mujer embarazada puede ingerir alcohol sin riesgo?

Los biólogos especializados en el desarrollo continúan investigando los asombrosos pormenores de cómo una sola célula —un cigoto formado a partir de la unión del espermatozoide y el óvulo— se transforma en un organismo tan complejo. Puesto que las células del embrión proliferan por medio de la mitosis, cada célula tiene un genoma idéntico. ¿Qué sustancias químicas hacen que las células genéticamente uniformes se transformen en diferentes componentes de los huesos, la sangre y el cerebro? A medida que los científicos adquieren más conocimientos, aumenta el optimismo acerca de que algún día será posible incrementar nuestra capacidad para dirigir la diferenciación celular y que, con el tiempo, se desarrollarán técnicas para reemplazar las células dañadas de los individuos enfermos o con discapacidades. Aquí exploramos los tipos y las etapas del desarrollo animal, un poco de lo que se conoce acerca de la diferenciación celular y las formas en las cuales las sustancias extrañas pueden interferir con este delicado proceso.

41.1 ¿EN QUÉ DIFIEREN EL DESARROLLO INDIRECTO Y EL DIRECTO?

Cuando pensamos en el desarrollo, con frecuencia vienen a nuestra mente las imágenes de un recién nacido. Es indudable que sus proporciones son distintas, pero los bebés son, en todos los aspectos importantes, versiones en miniatura de los humanos adultos. Las personas y otros mamíferos, así como las aves y los reptiles, nacen como “adultos en miniatura”, gracias a un proceso denominado **desarrollo directo**. Sin embargo, para la mayoría de las especies animales, la norma es el *desarrollo indirecto*.

Durante el desarrollo indirecto, los animales sufren un cambio radical en la forma de su cuerpo

En el **desarrollo indirecto**, el animal joven difiere de manera significativa del adulto y experimenta cambios radicales du-

rante el desarrollo, como cuando un gusano se transforma en mariposa. El desarrollo indirecto ocurre en la mayoría de los invertebrados —incluidos los insectos y equinodermos— y en los vertebrados anfibios. Los animales con desarrollo indirecto comúnmente producen grandes cantidades de huevecillos, y cada uno de ellos tiene sólo una pequeña cantidad de reserva de alimento llamada **vitelo** o **yema**, que nutre al embrión en desarrollo durante su transformación en un organismo, sexualmente inmaduro, llamado **larva** (FIGURA 41-1). Debido a que se produce sólo una pequeña cantidad de vitelo y a que la cría generalmente se vale por sí misma después de salir del huevo, el desarrollo indirecto no exige demasiado de la madre. Esto le permite producir grandes cantidades de crías, la mayoría de las cuales no llegan a la edad adulta. El empleo de este método de reproducción se ilustra por los depósitos de corales que se muestran en la figura 40-6.

Algunos animales en estado larvario no solamente se ven muy diferentes de los animales adultos, sino que también habitan en ambientes totalmente distintos. Además, la mayoría de las larvas se alimentan de organismos diferentes en relación con los adultos. Esta adaptación elimina la competencia entre los adultos y sus crías. Por ejemplo, la larva acuática de la libélula se alimenta de organismos acuáticos, como los renacuajos; pero la libélula adulta, que es terrestre, se alimenta de insectos (FIGURA 41-1b). Con el tiempo, la larva experimenta un cambio radical en la forma de su cuerpo, conocida como **metamorfosis**, para convertirse en un adulto sexualmente maduro.

Aunque tendemos a considerar la forma adulta como el “verdadero animal” y el estado larvario como la “etapa de preparación”, la mayor parte de la vida de algunos animales, especialmente los insectos, transcurre en la forma larvaria. Algunos tipos de moscas de mayo (también conocidas como moscas efímeras) pasan un año o más como larvas acuáticas, luego sufren metamorfosis para salir del agua dulce de arroyos, estanques y lagos en grandes enjambres. Las moscas de

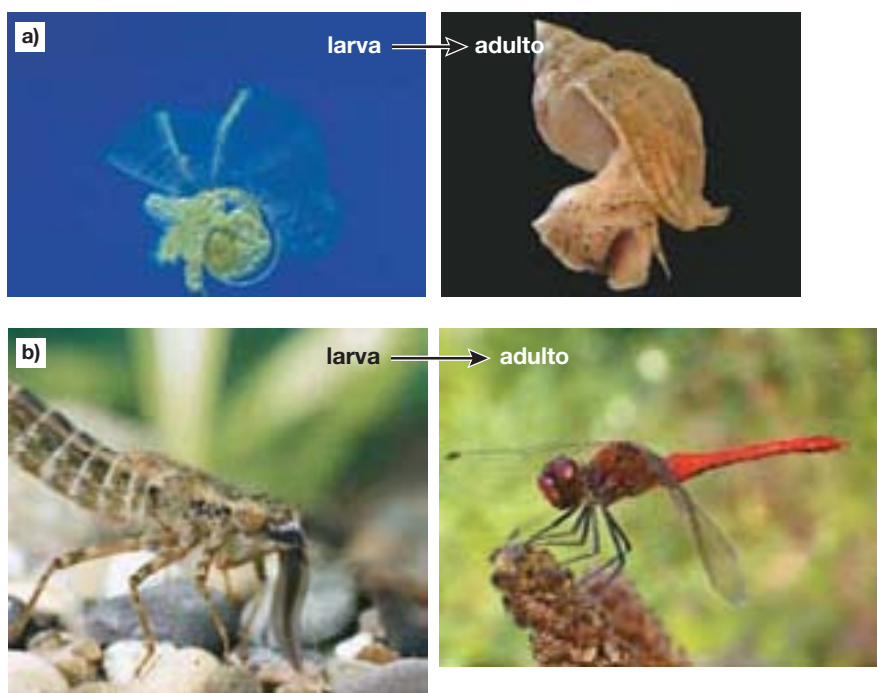


FIGURA 41-1 Desarrollo indirecto

Muchos moluscos marinos, como este caracol común, experimentan un desarrollo indirecto en el cual la larva casi microscópica es muy diferente del adulto en cuanto a tamaño, apariencia y estilo de vida. **b)** La larva de la libélula es acuática y se alimenta de renacuajos (como se muestra aquí) y de pececillos, mientras que la forma adulta es terrestre y se alimenta de otros insectos. **PREGUNTA:** Explica algunas ventajas y desventajas del desarrollo indirecto.

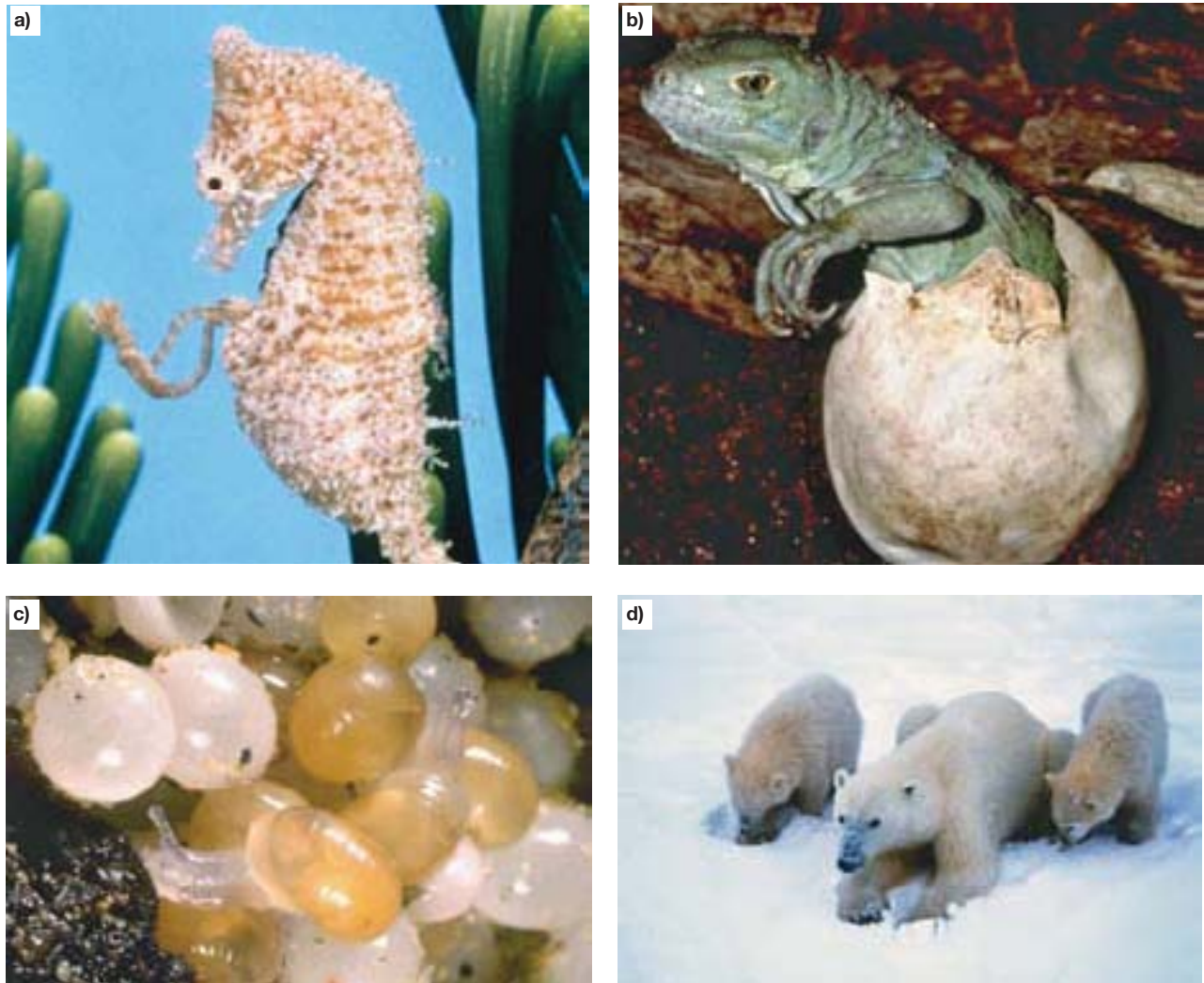


FIGURA 41-2 Desarrollo directo

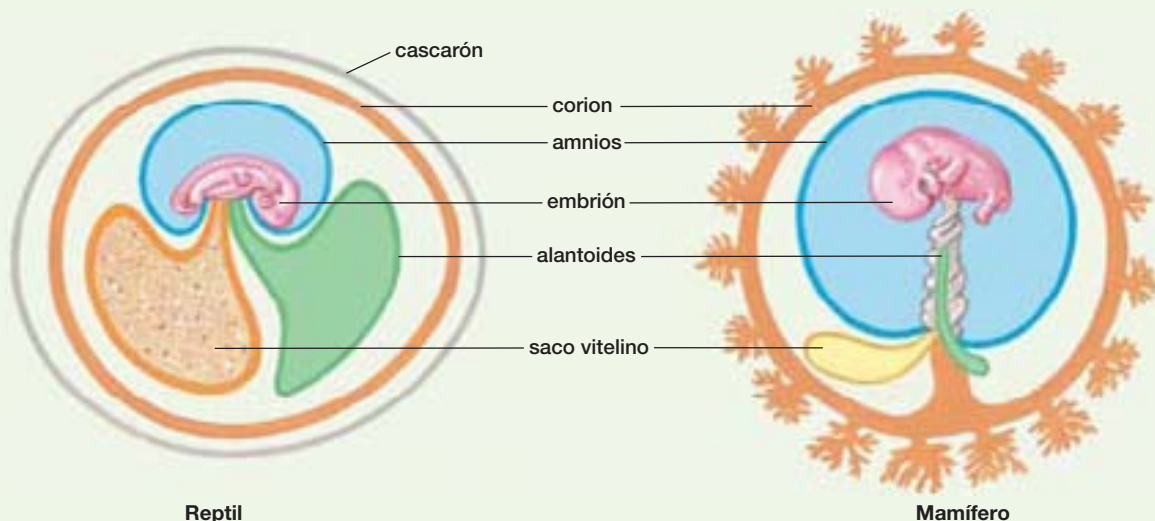
Las crías de los animales con desarrollo directo se parecen mucho a sus progenitores desde el momento en que nacen. Todos se alimentan por medio del vitelo (yema del huevo) o por nutrimentos en la sangre de la madre. **a)** Un caballito de mar macho alimenta a las crías que se han desarrollado de los huevecillos ricos en vitelo, colocados en su bolsa por la hembra. **b)** Los lagartos nacen de huevos grandes llenos de vitelo. **c)** Los caracoles nacen de huevos pequeños ricos en vitelo, **d)** Las madres de los mamíferos alimentan a sus crías en desarrollo dentro de sus cuerpos. **PREGUNTA:** Explica algunas ventajas y desventajas del desarrollo directo.

mayo adultas viven desde unas cuantas horas hasta algunos días. No se alimentan, y su única ocupación es aparearse y poner huevecillos. Cada hembra deposita miles de ellos sobre el agua; de los huevecillos salen larvas que continúan su ciclo.

Los animales recién nacidos que tienen un desarrollo directo parecen adultos en miniatura

Otros animales, incluidos diversos grupos como caracoles de tierra, reptiles, aves y mamíferos, experimentan un desarrollo directo, en el cual el recién nacido es una versión en miniatura del individuo adulto, aunque sexualmente inmaduro (**FIGURA 41-2**

Tabla 41-1 Membranas embrionarias de los vertebrados



Reptil

Mamífero

Embrión de reptil

Embrión de mamífero

Membrana	Embrión de reptil		Embrión de mamífero	
	Estructura	Función	Estructura	Función
Corion	Membrana que reviste el interior del cascarón	Actúa como superficie respiratoria; regula el intercambio de gases y agua entre el embrión y el aire	Aportación fetal a la placenta	Provee la superficie para el intercambio de gases, nutrimentos y desechos entre el embrión y la madre
Amnios	Bolsa que rodea al embrión	Encierra al embrión en líquido	Bolsa que rodea al embrión	Encierra al embrión en líquido
Alantoides	Bolsa conectada al tracto urinario del embrión; membrana rica en capilares que reviste el interior del corion	Almacena desechos (especialmente orina); actúa como superficie respiratoria	Bolsa membranosa que sale del intestino; varía en tamaño	Puede almacenar desechos metabólicos; proporciona los vasos sanguíneos del cordón umbilical
Saco vitelino	Membrana que rodea el vitelo	Contiene vitelo como alimento; digiere el vitelo y transfiere nutrimentos al embrión	Bolsa membranosa, pequeña y llena de líquido	Ayuda a absorber nutrimentos de la madre; forma células sanguíneas; contribuye al cordón umbilical

Reptiles, aves y mamíferos producen membranas extraembrionarias similares

Los anfibios fueron los primeros vertebrados en habitar en tierra firme, pero su reproducción está íntimamente vinculada con el agua, donde depositan los huevos y donde sus crías en estado larvario crecen y experimentan la metamorfosis para convertirse en adultos. La vida completamente terrestre de los vertebrados no fue posible sino hasta que la evolución produjo el **huevo amniótico** con cascarón. Esta innovación, que aloja al embrión en un espacio protegido lleno de líquido, surgió primero en los reptiles y persiste hasta ahora en ese grupo y en sus descendientes: las aves y los mamíferos. Permite a estos grupos completar su desarrollo para adquirir la forma adulta en su “estanco privado”. El huevo amniótico está formado de cuatro membranas, llamadas **membranas extraembrionarias**: *corion*, *amnios*, *alantoides* y *saco vitelino*. El **corion** reviste el cascarón y hace posible el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre el embrión y el ambiente externo del huevo. El **amnios** encierra al embrión en un ambiente acuoso; la **alantoides**

almacenado, o “yema de huevo”. Aunque los huevos de la mayoría de los mamíferos casi no contienen vitelo, existen las cuatro membranas extraembrionarias como remanentes del programa genético de desarrollo de los reptiles. La **tabla 41-1** compara las estructuras y funciones de estas membranas extraembrionarias de los reptiles y mamíferos.

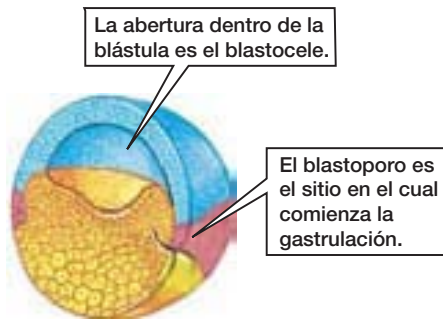
41.2 ¿CÓMO PROCEDE EL DESARROLLO ANIMAL?

La transformación a partir del óvulo fecundado —una sola célula— a un embrión multicelular diferenciado se realiza de una forma suave y continua mediante un maravilloso proceso. El desarrollo real es continuo y fluido; las etapas descritas son sólo “fotografías instantáneas” con fines ilustrativos. Las etapas iniciales son *segmentación*, *gastrulación*, *organogénesis* y *crecimiento*,

ectodermo mesodermo endodermo

**a) La blástula antes de la gastrulación.**

Todavía no se forman los tres tipos de tejido embrionario. Los colores indican el destino de las células después de iniciada la diferenciación en la gástrula.

**b) Las células migran al inicio de la gastrulación.**

Las células que inmigran forman las capas de endodermo y mesodermo de la gástrula; las células que permanecen en la superficie forman el ectodermo.

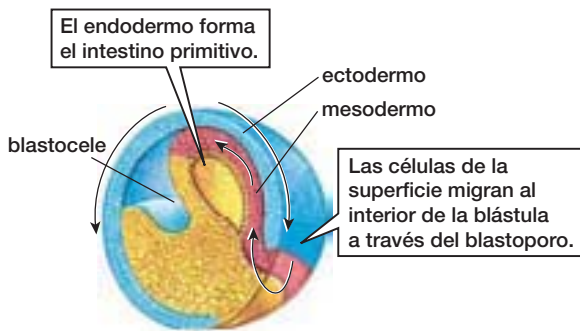
**c) Diferenciación del mesodermo.**

FIGURA 41-3 La blástula de una rana se convierte en gástrula

Con la segmentación del cigoto se inicia el desarrollo

La formación de un embrión se inicia con la **segmentación**, una serie de divisiones mitóticas de la célula grande del huevo fecundado o *cigoto*. No hay crecimiento entre las divisiones mitóticas, así que al progresar la segmentación, el citoplasma disponible en el cigoto grande se divide en células aun más pequeñas. Finalmente, se forma una esfera sólida de células pequeñas, la **mórula**

lulas se transforman en la cubierta externa de una estructura hueca llamada **blástula**. El espacio dentro de la blástula se denomina *blastocele* (**FIGURA 41-3a**).

Los detalles de la segmentación difieren según las especies. El patrón se determina primordialmente por la cantidad de vitelo presente, porque éste obstruye la *citocinesis* (división del citoplasma). Los huevos del erizo de mar que casi no contienen vitelo se dividen de forma simétrica, pero los huevos con gran cantidad de vitelo, como los de gallina, no se dividen en toda su extensión. No obstante, siempre se produce una blástula hueca; en los reptiles y las aves, está aplanada en la parte superior del vitelo.

La gastrulación forma tres capas de tejidos

En el siguiente paso del desarrollo, se forma una invaginación, llamada **blastoporo**, a un lado de la blástula. Las células de la blástula migran hacia dentro a través del blastoporo, como si tomáramos una pelota grande casi desinflada y la presiónáramos con el dedo (**FIGURA 41-3b**). Estas células forman tres capas de tejido embrionario. La migración de las células y la diferenciación que produce un embrión de tres capas se llama **gastrulación**, y el embrión resultante se conoce como **gástrula** (**tabla 41-2**). Las células de la invaginación, cada vez más profunda, se convertirán en el tracto digestivo y los órganos asociados; por ahora constituyen el **endodermo** (del griego, “piel interior”). Las células que permanecen en el exterior, que formarán la epidermis y el sistema nervioso, constituyen el **ectodermo** (“piel exterior”). Mientras tanto, algunas células migran entre el endodermo y el ectodermo, formando una tercera capa final, el **mesodermo** (“piel intermedia”). El mesodermo da origen a los músculos, el esqueleto (incluido el **notocordio**, un cilindro firme de sostén que se encuentra en cierta etapa de todos los cordados) y el sistema circulatorio (**FIGURA 41-3c**).

Las estructuras adultas se desarrollan durante la organogénesis

Gradualmente, el ectodermo, mesodermo y endodermo se reordenan para formar los órganos característicos de la especie animal por medio de un proceso llamado **organogénesis** (véase la tabla 41-2). En algunos casos, las estructuras adultas son “esculpidas” por el exceso de células muertas producidas durante el desarrollo embrionario. Algunas células están programadas para morir en momentos precisos durante el desarrollo; la muerte de las células está controlada al menos por dos mecanismos que funcionan en diferentes tejidos. Algunas

Tabla 41-2 Derivación de tejidos adultos a partir de capas celulares embrionarias

Capa embrionaria	Tejido adulto
Ectodermo	Epidermis de la piel, cabello, revestimiento de la boca y nariz, glándulas de la piel, sistema nervioso
Mesodermo	Dermis de la piel, músculos, esqueleto, sistema circulatorio, gónadas, riñones, capas externas de los tractos digestivo y respiratorio
Endodermo	Revestimiento de los tractos digestivo y respiratorio, hígado, páncreas



FIGURA 41-4 Una rana toro pierde su cola

células mueren durante el desarrollo a menos que reciban una “señal de supervivencia”. Los vertebrados embrionarios, por ejemplo, tienen muchas más neuronas motrices para los músculos esqueléticos en su médula espinal que los animales adultos. Estas neuronas sobreviven sólo si logran formar sinapsis con las células del músculo esquelético; las neuronas adicionales mueren.

En otros casos, se forman estructuras de embrión y luego desaparecen porque reciben una “señal de muerte” en alguna etapa del desarrollo. Por ejemplo, todos los vertebrados pasan por etapas embrionarias en las cuales tienen cola y membranas entre los dedos de las manos y los pies. En el ser humano, estas etapas pueden verse claramente en los embriones de seis semanas (véase la figura 41-12). Dos semanas después, las células de las membranas mueren para revelar dedos separados, mientras que la cola sufre una regresión conforme sus células mueren (véase la figura 41-13). En las ranas, la cola se pierde durante la metamorfosis de la larva o renacuajo. En este caso, la hormona tiroidea, que desencadena la metamorfosis, también estimula a las células de la cola para que produzcan enzimas, las cuales terminan por digerirla por completo (**FIGURA 41-4**).

41.3 ¿CÓMO SE CONTROLA EL DESARROLLO?

Piensa por un momento en el milagro biológico que transformó una sola célula —un cigoto— en el individuo que eres. Los biólogos emplean términos prosaicos para describir esta increíble serie de sucesos. **Desarrollo** es el proceso por medio del cual un organismo pasa de óvulo fecundado a adulto. **Diferenciación** es la especialización de las células embrionarias que las convierte en diferentes tipos de células, como musculares, cerebrales, entre muchas otras. ¿Cómo se diferencian las células unas de otras durante el desarrollo? Sabemos que el cigoto contiene todos los genes necesarios para dirigir la construcción del organismo entero. ¿Se pierde alguno de estos genes durante la diferenciación celular?

Cada célula contiene todos los planos genéticos del organismo

A principios de la década de 1950, los embriólogos norteamericanos Thomas King y Robert Briggs comenzaron a realizar experimentos que posteriormente continuaría el embriólogo británico John Gurdon. Trasplantaron el núcleo de una célula diferenciada tomada del intestino de un renacuajo a un óvulo de rana no fecundado, cuyo núcleo se había extirpado (**FIGURA 41-5**

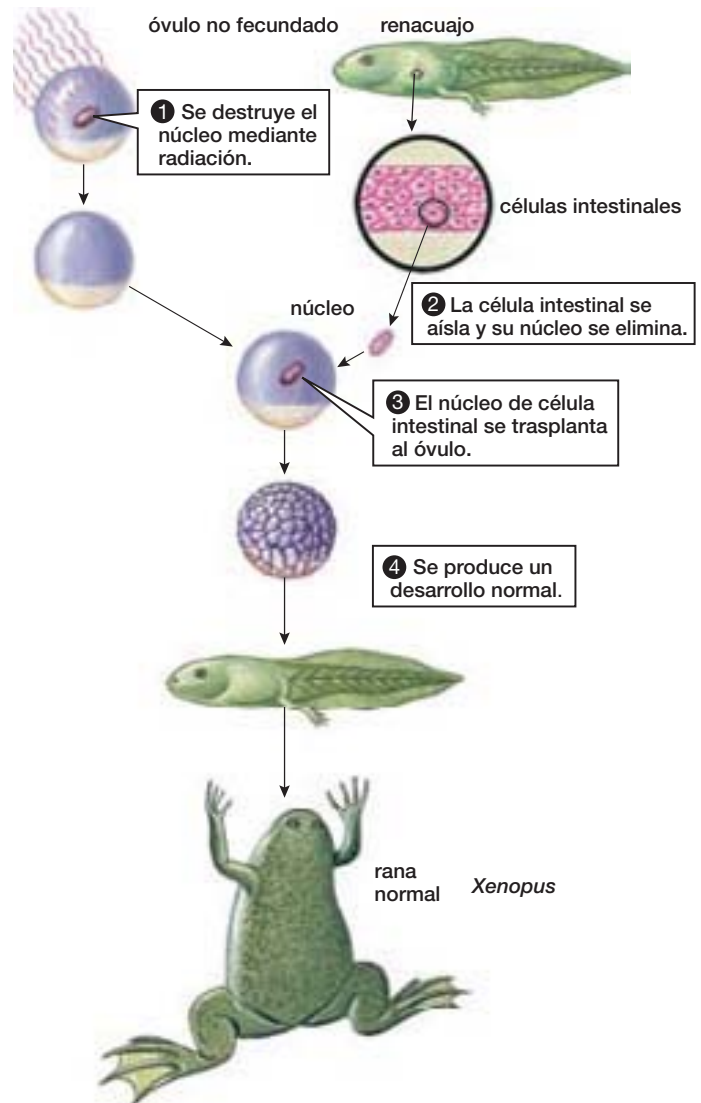


FIGURA 41-5 Las células conservan todos sus genes durante la diferenciación

Los investigadores destruyeron el núcleo del óvulo no fecundado de una rana, luego trasplantaron el núcleo de una célula intestinal de un renacuajo al óvulo. El “huevo” resultante se desarrolló para dar origen a una rana normal, lo que demuestra que las células intestinales conservan todos los genes necesarios para el desarrollo del organismo entero. **PREGUNTA:** En este experimento, ¿el trasplante del núcleo de cualquier célula de una rana adulta habría dado por resultado un desarrollo normal?

hubiera resultado imposible de lograr si se hubieran perdido los genes durante la diferenciación. Estos experimentos apoyaron la hipótesis de que cada célula diferenciada de un animal contiene la información genética necesaria para el desarrollo de todo el organismo. El conocimiento de que todas las células conservan los genes para producir un organismo adulto completo se emplea en la tecnología de células madre, como se describe en “Investigación científica: La promesa de las células madre”. Ahora sabemos que las células de diferentes partes de un organismo difieren porque se activan distintos genes que se transcriben a RNA mensajero y se traducen en proteínas.

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

La promesa de las células madre

La capacidad de una sola célula para dar origen a los 200 o más tipos diferentes de células en un organismo adulto es una de las maravillas de la vida. Cada núcleo de una célula contiene toda la información genética para un organismo, y el hecho de que una célula llegue a ser muscular, ósea o cerebral está determinado por factores complejos en el ambiente celular que establecen cuáles genes son activos. Estos factores causan la *diferenciación* de la célula, es decir, asumen una forma y una función especializada. Una **célula madre** o **célula troncal** aún no se ha diferenciado, de manera que continúa dividiéndose y tiene el potencial para dar origen a más de un tipo de célula. Existen muchas esperanzas en torno a las implicaciones médicas de la tecnología de las células madre. Las víctimas de infartos al miocardio, accidentes cerebrovasculares, lesiones de la columna vertebral y enfermedades degenerativas desde la artritis hasta la enfermedad de Parkinson resultarían beneficiadas si los tejidos dañados pudieran regenerarse.

Las **células madre embrionarias (ESC)**, por las siglas de *embryonic stem cells* se derivan de la masa celular interna del blastocisto (véase la figura 41-10), un cúmulo de aproximadamente 100 células. En 1998, el doctor James Thomson y sus colaboradores de la Universidad de Wisconsin aislaron por primera vez las ESC humanas, las cultivaron en cajas de Petri y luego las diferenciaron en una variedad de tejidos humanos, como se ilustra en la **FIGURA E41-1**. La ventaja de las ESC es que pueden producir cualquier tipo de célula del cuerpo. Sin embargo, como el blastocisto es un embrión humano en una etapa temprana, algunos legisladores de Estados Unidos están debatiendo en torno a los problemas éticos que implica la asignación de fondos para las investigaciones sobre las células ESC.

Las investigaciones recientes han demostrado que la mayoría de los tejidos de un individuo adulto, incluidos los músculos, la piel, el hígado, el cerebro, el corazón y la sangre, contienen al menos pequeñas cantidades de células madre, llamadas **células madre adultas (ASC)**, por las siglas de *adult stem cells*. De hecho, las células madre de la médula ósea, la cual produce tanto glóbulos rojos como blancos, se han empleado durante décadas en trasplantes para tratar enfermedades como la leucemia. Aunque los científicos alguna vez pensaron que las células ASC podían diferenciarse sólo en unos cuantos tipos de células, los investigadores han sido capaces de transformarlas en más variedades de las que inicialmente se creyó posible. El descubrimiento reciente de que la placenta es rica en células madre sanguíneas ha creado gran entusiasmo entre los investi-

gadores, quienes abrigan la esperanza de que las células de esta fuente abundante podría estimularse para formar una variedad de tejidos además de la sangre.

Los tejidos que se derivan de las células madre de un individuo conservan los marcadores genéticos que hacen que los rechace el sistema inmunitario de un receptor diferente, si no se emplean fármacos inmunosupresores. Anticipándose a los nuevos adelantos de la terapia con células madre, algunos padres han solicitado que una muestra de la placenta del recién nacido se conserve por medio de la criogenia, de manera que se tengan disponibles células madre con la composición genética exacta del niño con el fin poder reparar cualquier tejido dañado a lo largo de su vida. En un futuro, los investigadores esperan emplear las técnicas de la ingeniería genética para modificar las proteínas superficiales celulares, de forma que las células madre cultivadas de un individuo puedan emplearse en otras personas sin que surjan problemas de rechazo.

La **clonación terapéutica** —que implica insertar un núcleo celular de un donador adulto, que necesita una reparación tisular, en un óvulo cuyo núcleo ha sido removido— permitiría crear células madre embrionarias que no se rechazarían. Como no se puede descartar que este proceso, si se desarrolla lo suficiente, pudiera utilizarse para producir un clon del donador, aún se encuentra en un estado de controversia.

Un escenario ideal sería estimular las células madre quiescentes (inactivas) que residen en el tejido dañado para que se reproduzcan. Por ejemplo, las células madre del músculo cardíaco podrían estimularse para que remplazaran el tejido muerto debido a un infarto del miocardio. De manera alternativa, los médicos podrían obtener células madre de una persona lesionada, tomándolas de un tejido como la médula ósea, donde abundan, y luego tratarlas con factores de diferenciación específicos e inyectarlas en la parte del cuerpo dañada. De forma ideal, ahí se reproduciría y remplazaría el tejido perdido.

Además de su enorme potencial para restaurar el tejido dañado y combatir las enfermedades, las células madre algún día podrán cultivarse en grandes cantidades y emplearse para probar nuevos fármacos. Los medicamentos que dañan a estas células embrionarias posiblemente dañen también al embrión en desarrollo, por lo que no deberían administrarse a mujeres embarazadas. Las células madre cultivadas podrían utilizarse también para investigar los procesos increíblemente complejos que controlan el desarrollo humano.

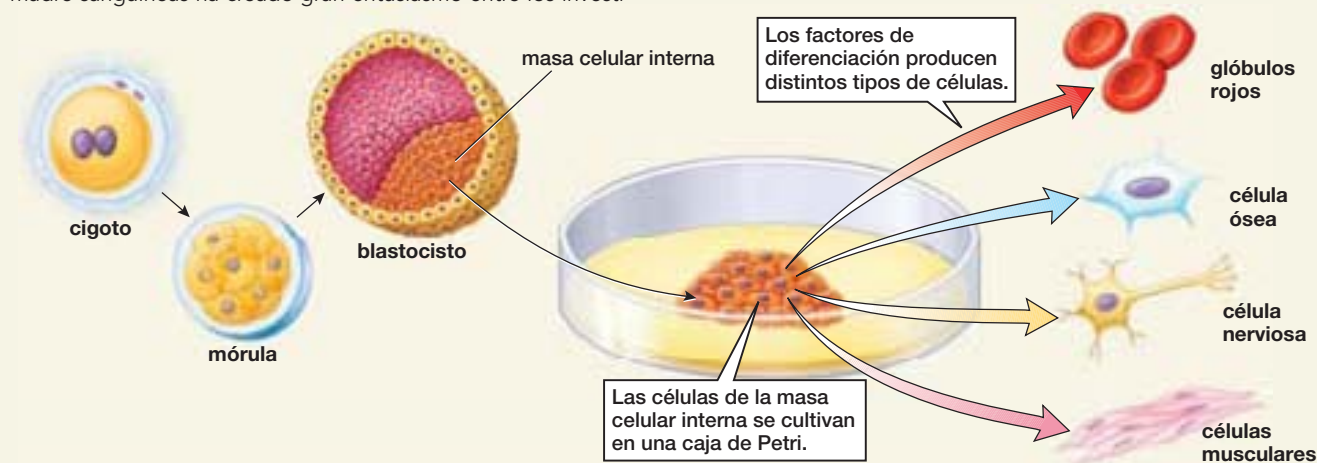


FIGURA E41-1 Cultivo de células madre de un blastocisto

La transcripción genética se regula con precisión durante el desarrollo

¿Cómo “decide” una célula que formará parte de un hueso, un músculo o del intestino? En cualquier célula, en un momento dado, sólo se emplea o transcribe una porción de sus genes. Recordarás del capítulo 10 que la *transcripción* es la producción del RNA mensajero utilizando un gen como patrón. La combinación particular de genes que se transcribe en una célula determina la forma, estructura y actividad bioquímica de esa célula. La diferenciación durante el desarrollo se lleva a cabo por medio de un proceso llamado **inducción**. La inducción es el proceso por medio del cual se estimulan células específicas para que sigan una ruta de desarrollo específica; por ejemplo, para que sean musculares u óseas bajo la influencia de mensajeros químicos producidos por otras células. Durante la inducción, los conjuntos de genes se activan de manera selectiva en grupos diversos de células, haciendo que adopten diferentes formas y asuman distintas funciones. En general, las moléculas que controlan la transcripción son proteínas (o proteínas combinadas con sustancias como las hormonas esteroides), que se enlazan a genes específicos y bloquean o promueven la transcripción.

En muchos invertebrados, varias sustancias que regulan los genes se concentran en diferentes partes del citoplasma del huevo, conforme éste se desarrolla. Al dividirse el cigoto, cada una de las células hijas recibe diferentes sustancias reguladoras de los genes; de esta forma, las células hijas tomarán distintas rutas de desarrollo. En contraste, cada una de las células producidas por la segmentación de los cigotos de vertebrados para formar la blástula puede dar origen a un individuo completo si tales células se separan, como ocurre en el caso de los gemelos humanos idénticos.

El destino general del desarrollo de la mayoría de los embriones de los anfibios se forma durante la gastrulación. En los embriones de los anfibios se forman células de inducción en el punto de invaginación cuando la blástula se transforma en gástrula. Esta área, llamada *labio dorsal del blastoporo*, controla el destino de las células que la rodean, como lo demostraron Hans Spemann y Hilde Mangold al llevar a cabo experimentos de trasplantes en la década de 1920 (FIGURA 41-6).

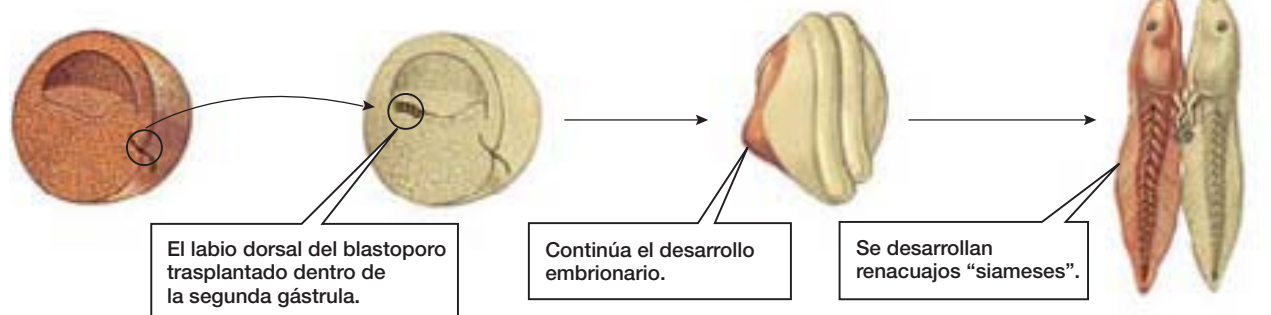
La migración celular puede ser guiada por contacto con las proteínas superficiales

Las células, guiadas por sustancias químicas, migran en el interior del embrión en desarrollo (véase la figura 41-3). El proceso por medio del cual las células llegan a sus sitios adecuados, como en la espina dorsal o un músculo del brazo, es tema de investigaciones profundas. Los receptores de proteínas superficiales asociadas con tipos de células específicos pueden responder a rutas químicas específicas trazadas por las células más próximas. Estas rutas químicas atraen a las células por medio de receptores específicos para que migren por ellas. Aunque aún no se comprenden del todo los mecanismos exactos, la producción de proteínas específicas para el tipo de célula y de caminos por los que esas células migran depende de la transcripción de genes específicos como resultado de la inducción.

Los segmentos del gen homeobox son importantes reguladores del desarrollo

¿Cómo “saben” las diferentes partes de un organismo cuáles genes deben expresar? Aún continúa la búsqueda de la respuesta a esta pregunta aparentemente sencilla; pero el *ho-*

a) El labio dorsal del blastoporo trasplantado induce la formación de un segundo renacuajo.



b) Futuras células de piel trasplantadas son inducidas a formar tejido neural.

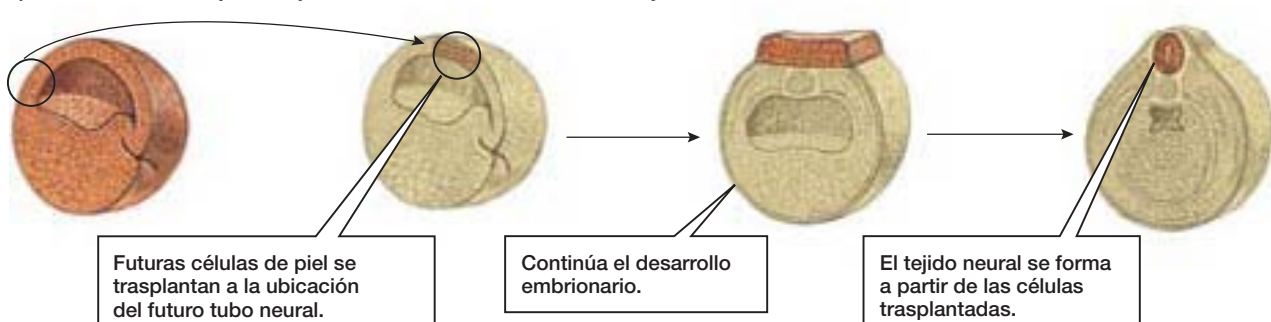




FIGURA 41-7 Los segmentos de gen homeobox regulan el desarrollo

Debido a una mutación en un gen homeobox, esta mosca de la fruta tiene patas perfectamente formadas en el lugar donde deberían estar las antenas.

meobox, descubierto en la mosca de la fruta a principios de la década de 1980, ofrece una pista importante. Los **homeoboxes** son secuencias cortas de DNA que se encuentran dentro de genes más grandes. Estas secuencias de DNA codifican las secuencias de los aminoácidos dentro de ciertas proteínas. Se han descubierto cientos de segmentos de gen homeobox, y muchos están implicados de alguna forma en el desarrollo inicial. Ligeras diferencias entre los homeoboxes les confieren funciones diversas, como dirigir la formación de las diferentes partes del cuerpo. Los científicos sostienen la hipótesis de que la secuencia de aminoácidos codificada por el segmento homeobox de ciertos genes permite a las proteínas codificadas por esos genes unirse con el DNA. La investigación sugiere que las proteínas de enlace del DNA con los segmentos homeobox son un tipo especial de *factor de transcripción*, una sustancia química que se enlaza a un gen y provoca que éste se “encienda” o se transcriba. Los factores de transcripción con los segmentos homeobox son especiales porque funcionan como reguladores maestros, que actúan sobre todos los genes necesarios para producir una parte específica del cuerpo, como una extremidad. Además, su acción es permanente, causando que los genes afectados se “enciendan” de forma permanente en las células y en su descendencia, comprometiéndolas para siempre a ser parte de una pata, ala u ojo. Si debido a una mutación se altera el segmento de homeobox, éste podría ordenar a una pata que aparezca donde debería aparecer la antena de una mosca de la fruta (**FIGURA 41-7**).

Los investigadores hicieron el inquietante descubrimiento de que secuencias de DNA homeobox muy similares están presentes en los animales, incluidas las esponjas, medusas, gusanos planos, insectos, ratones y seres humanos. Segmentos homeobox relacionados también se han encontrado en hongos y plantas. Si las secuencias de genes se conservan relativamente inalteradas durante quizá más de 500 millones de años









de evolución, ello sugiere que desempeñan un papel importante, como podríamos predecir para un gen regulador maestro que especifica la forma en que se desarrolla el cuerpo de un animal.






41.4 ¿CÓMO SE DESARROLLAN LOS SERES HUMANOS?

El desarrollo humano es controlado por los mismos mecanismos que controlan el desarrollo de otros animales. De hecho, nuestro desarrollo refleja notablemente nuestra herencia evolutiva. La **FIGURA 41-8** presenta un resumen del desarrollo embrionario y fetal del ser humano.

Durante los primeros dos meses, la diferenciación y el crecimiento son muy rápidos

El óvulo emite sustancias químicas que atraen a los espermatozoides, lo que aumenta sus oportunidades de ser fecundado. Un óvulo humano por lo regular se fecunda en el oviducto de la mujer y experimenta algunas divisiones en su trayecto hacia el útero, un viaje que toma aproximadamente cuatro días (**FIGURA 41-9**). Primero se forma una mórula, una esfera sólida de células, a medida que el cigoto comienza a dividirse. Aproximadamente seis días después de la fecundación, la mórula se convierte en una esfera hueca de células, el **blastocisto** (la versión de una blástula en los mamíferos; **FIGURA 41-10**). Dentro del blastocisto hay una región gruesa, la **masa de células internas** (figura 41-10; véase también la figura 41-9a). Dentro del útero, el blastocisto se introduce en el endometrio, un proceso llamado **implantación**. La capa celular externa se convierte en el corion, el cual será la aportación embrionaria a la placenta; la masa de células internas se convertirá en el embrión y en las otras tres membranas extraembrionarias.

semana 1	semana 2	semana 3	semana 4	semana 5	semana 6
cigoto a blastula tardía		embrión			
 <p>cigoto</p>	 <p>blastocisto</p>	 <p>1.5 a 2.5 mm</p>	 <p>3 a 5 mm</p>	 <p>7 a 9 mm</p>	 <p>8 a 11 mm</p>
 <p>mórula</p>	 <p>blastocisto tardío</p>	<p>Ocurre la gastrulación; se forman el notocordio y el principio del tubo neural; el corazón late.</p>	<p>El tubo neural se cierra; se forman yemas de brazos, cola y hendiduras branquiales.</p>	<p>Se comienzan a formar los ojos; se forman yemas de piernas; el encéfalo crece.</p>	<p>Se forman los pabellones auriculares y dedos con membranas; desaparecen la cola y las hendiduras branquiales.</p>

semana 7	semana 8	semana 10	semana 12	semana 16
embrión		feto		
 <p>1.7 a 2.0 cm</p>	 <p>2.3 a 2.8 cm</p>	 <p>3.2 a 4.4 cm</p>	 <p>5 a 7.6 cm</p>	 <p>10.2 a 12.7 cm</p>
<p>Se forman dedos del pie con membranas; los huesos comienzan a endurecerse; la espalda se endereza; se forman los párpados.</p>	<p>Se empiezan a formar todos los órganos principales y los genitales masculinos; los brazos se pueden doblar; se distinguen los dedos; toman forma los rasgos faciales y las orejas.</p>	<p>Después de 8 semanas el embrión se llama feto. Se forman los glóbulos rojos; se separan los dedos de los pies; se acaban de desarrollar los párpados; están presentes las partes principales del cerebro; las manos pueden formar puños.</p>	<p>El cuello está bien delineado; están presentes todos los órganos, al igual que los genitales masculinos o femeninos; se mueven los brazos y las piernas; empiezan a formarse los dientes; se detectan los latidos cardíacos por medios electrónicos.</p>	<p>Ocurren movimientos para chupar y deglutir; el hígado y el páncreas comienzan a funcionar. El cuerpo crece en relación con la cabeza; los órganos principales continúan su desarrollo. La madre siente los movimientos; el feto pesa unos 140 gramos.</p>





semana 20	semana 24	semana 30	semana 36
feto			
 <p>15.2 a 17.8 cm</p>	 <p>20.3 a 22.9 cm</p>	 <p>38.1 a 40.6 cm</p>	 <p>40.6 a 48.3 cm</p>
<p>El feto se chupa el dedo; los brazos y piernas golpean; el cuerpo puede cambiar de posición. Se forman las uñas, se deposita grasa bajo la piel; aparecen cejas y pestañas.</p>	<p>El cerebro continúa su desarrollo, se desarrolla el sentido del oído; los ojos se pueden mover. El feto presenta hipo, puede entornar los ojos, sonreír y fruncir el ceño. El feto tiene pelo en la cabeza. Aparecen las huellas dactilares y del pie. Pesa entre 500 y 700 gramos.</p>	<p>Continúa el desarrollo del cerebro; los ojos se abren y se cierran y pueden ver la luz; el feto da patadas y se estira; ocurren los movimientos respiratorios, pero los pulmones no han madurado. Los huesos están presentes, sólo que son flexibles. El bebé podría sobrevivir si nace en este momento.</p>	<p>Los ojos se abren y se cierran según los ciclos de sueño y vigilia; aumenta la grasa corporal; los pulmones y otros órganos funcionan. El infante puede aspirar y orientarse hacia la luz. Pesa entre 2.3 y 2.7 kg, y ya no se le considera prematuro si nace en este momento. El término completo es de 38 semanas.</p>

FIGURA 41-8 Desarrollo del embrión humano

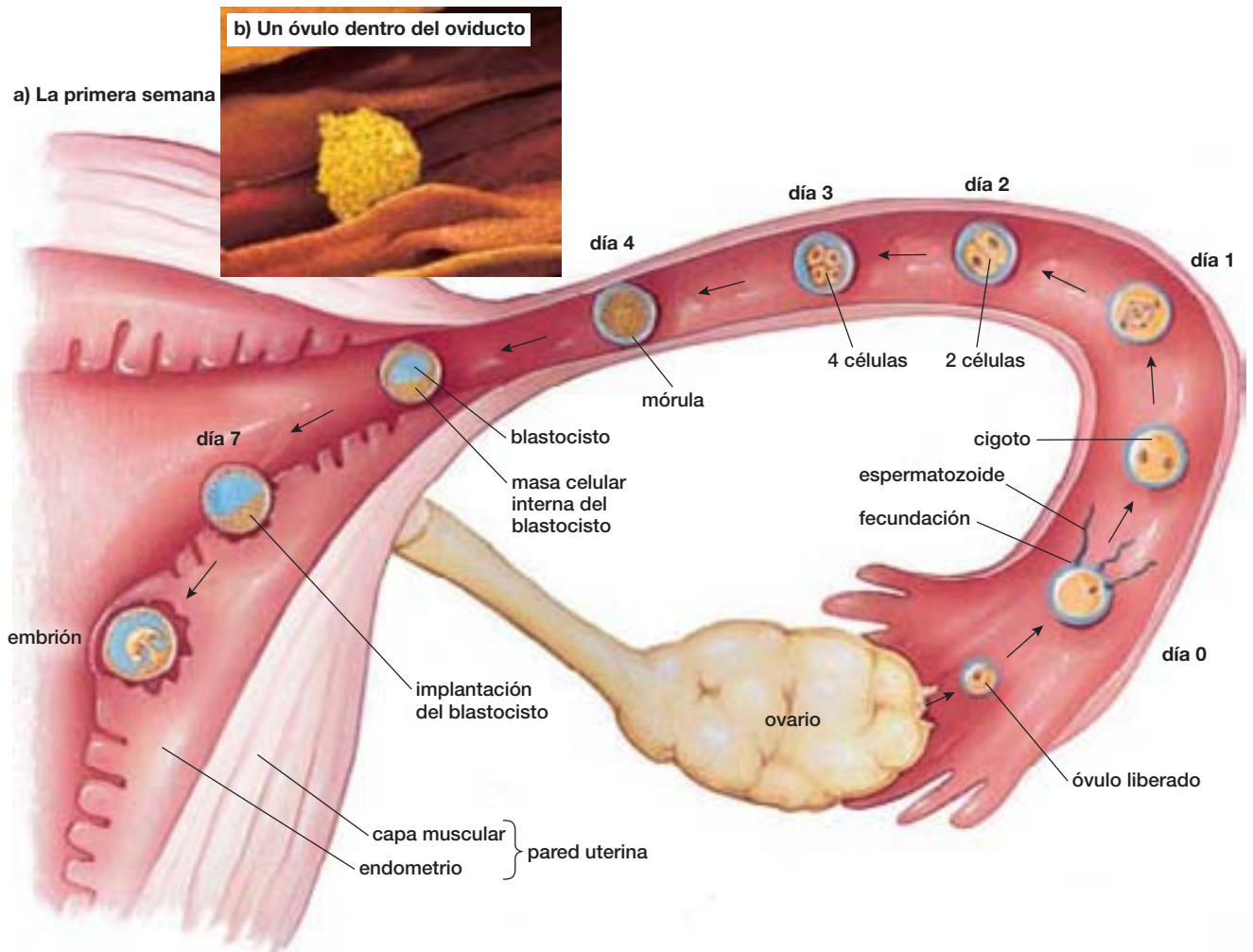


FIGURA 41-9 El recorrido del óvulo

a) El óvulo es fecundado en el tubo del útero (oviducto) y, al dividirse para formar una mórula, viaja hacia el útero; ahí, el blastocisto hueco se implanta en el endometrio y continúa el desarrollo. **b)** Fotografía del óvulo, rodeado de células del folículo de la corona radiada, que viaja dentro del oviducto hacia el útero.

Después de la implantación, la masa interior de células crece y se divide para formar dos bolsas llenas de líquido separadas por una doble capa de células llamada **disco embrionario** (figura 41-10b). Una bolsa, delimitada por el amnios, forma la cavidad amniótica. Con el tiempo, el amnios encerrará al embrión en el ambiente acuoso necesario para el desarrollo. El saco vitelino forma la segunda cavidad, aunque en la mayoría de los mamíferos (los que forman placenta, llamados *mamíferos placentarios*

bución del embrión para la placenta, extiende pequeñas prolongaciones llamadas **vellosidades coriónicas** hacia el endometrio del útero. Los vasos sanguíneos embrionarios invaden las vellosidades coriónicas, llevando la sangre bombeada por el corazón del embrión, el cual comienza a latir aproximadamente en el día 22. A medida que el embrión crece durante la cuarta semana (**FIGURA 41-11**), el endodermo forma un tubo —el intestino embrionario—, que se convertirá en el tracto digestivo. El cordón umbilical se forma a partir del tallo vitelino y el tallo corporal. El *tallo vitelino* conecta el saco vitelino con el intestino embrionario (un “remanente” evolutivo en los mamíferos del papel que desempeña el vitelo en la nutrición de los embriones de peces, aves y reptiles). El embrión está conectado al corion por medio del *tallo corporal* que incluye la alantoides y los vasos sanguíneos embrionarios. Dentro del embrión, el ectodermo forma estructuras que se convertirán en el cerebro y la espina dorsal. Para la cuarta semana, el embrión se pliega hacia el interior dentro de la cavi-

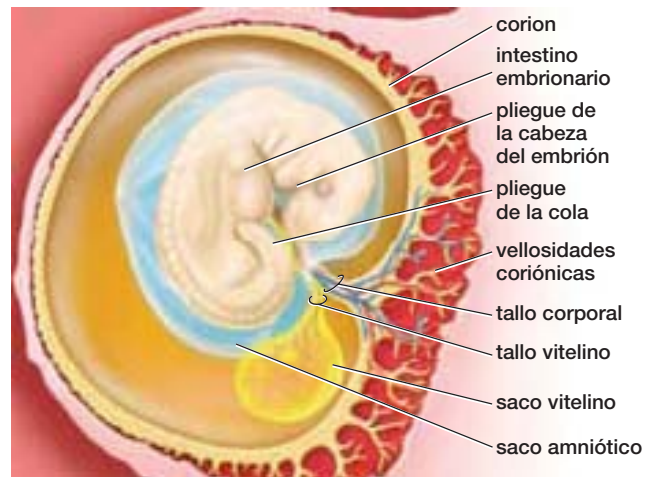
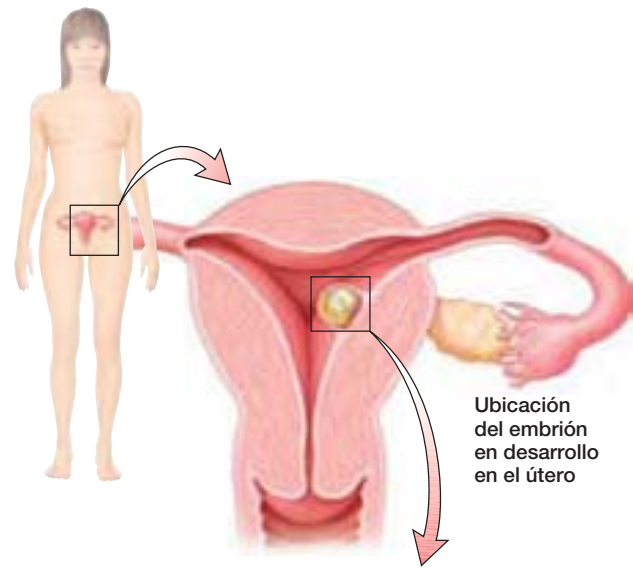
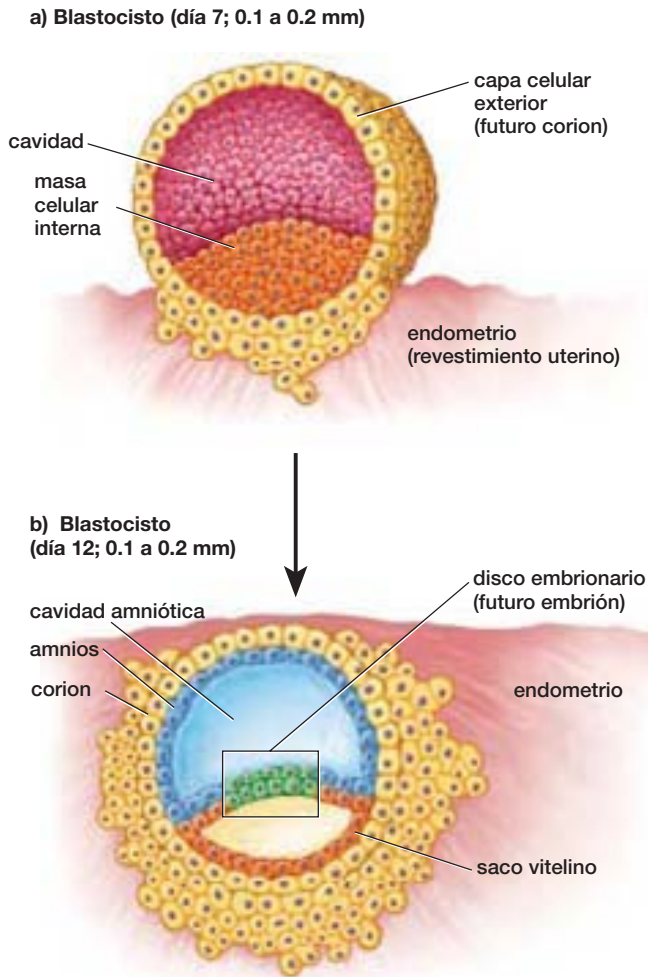


FIGURA 41-10 Un implante de blastocisto

Al meterse en el revestimiento uterino, la capa celular exterior del blastocisto forma el corion, la contribución embrionaria a la placenta. **b)** El blastocisto penetra profundamente en el endometrio. La masa celular interna forma el amnios, el saco vitelino y el disco embrionario (futuro embrión).

FIGURA 41-11 Embrión humano de cuatro semanas

El endodermo forma el intestino embrionario (futuro tracto digestivo), el cual está conectado al saco vitelino por el tallo vitelino. El tallo corporal lleva la sangre embrionaria a las vellosidades coriónicas.

dad uterina, rodeado completamente por el amnios. Está unido a la placenta por el *tallo umbilical* (el futuro cordón umbilical; véase la figura 41-11). Se distingue claramente la cola.

Durante la sexta semana, el embrión muestra con claridad sus características ancestrales de cordado (véase el capítulo 24 para más información sobre los cordados), pues para entonces ha desarrollado un notocordio, una cola prominente y *hendiduras faríngeas* (surcos en la parte posterior de la cabeza, que son equivalentes a las branquias desarrolladas que conservan los peces y algunos anfibios cuando son adultos; **FIGURA 41-12**). Estas estructuras desaparecen en las semanas que siguen. Aunque su longitud es de unos 2.5 centímetros, el embrión ya tiene los principios rudimentarios de ojos y un cerebro que se desarrolla rápidamente.

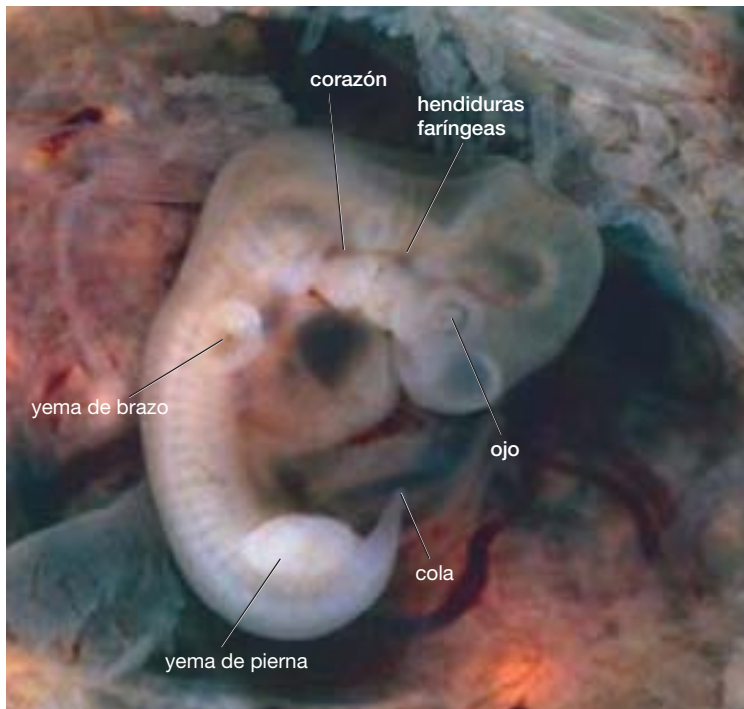
Cuando se acerca el final del segundo mes, se han formado casi todos los órganos principales (**FIGURA 41-13**). Aparecen las gónadas y se desarrollan en testículos u ovarios. Se secretan las hormonas sexuales: los testículos secretan testosterona y los ovarios, estrógeno. Estas hormonas afectarán el futuro

desarrollo de los órganos embrionarios, no solamente los reproductores, sino también ciertas regiones cerebrales. Después del segundo mes de desarrollo, el embrión recibe el nombre de **feto** y va adquiriendo una apariencia humana.

Los primeros dos meses del embarazo son una etapa de rápida diferenciación y crecimiento del embrión, y durante ese periodo existe un peligro considerable. Aunque el embrión es vulnerable durante todo su desarrollo, los órganos que están creciendo con rapidez son los más sensibles a las sustancias tóxicas, como las drogas (incluido el alcohol y la nicotina) y ciertos medicamentos que pudiera consumir la madre.

La placenta secreta hormonas y permite el intercambio de materiales entre la madre y el embrión

Durante la segunda semana del embarazo, el blastocisto se introduce en el revestimiento engrosado del útero y obtiene nutrientes del endometrio (véase la figura 41-10). La capa externa del blastocisto forma el corion, el cual comienza a pe-

**FIGURA 41-12** Embrión humano de seis semanas

Al iniciarse la sexta semana, la cabeza abarca cerca de la mitad del embrión humano. Se forman las yemas de piernas y brazos; se observan claramente la cola y las hendiduras faríngeas.

**FIGURA 41-13** Embrión humano de ocho semanas

El embrión ha adquirido apariencia humana y recibe el nombre de feto.

netrar en el endometrio con las *vellosidades coriónicas* en forma de dedos. Durante la tercera semana, la **placenta** comienza a formarse a partir de esta compleja red de tejidos del embrión y el endometrio del útero. La placenta desempeña dos funciones principales: secreta hormonas y permite el intercambio selectivo de materiales entre la madre y el feto.

Al desarrollarse durante los dos primeros meses del embarazo, la placenta comienza a secretar estrógeno y progesterona. El estrógeno estimula el crecimiento del útero de la madre

y las glándulas mamarias; la progesterona también estimula las glándulas mamarias e inhibe las contracciones prematuras del útero.

La placenta también regula el intercambio de materiales entre la sangre de la madre y la del feto, y no deja que se mezclen una con otra. Las vellosidades coriónicas contienen una densa red de capilares fetales y están bañadas por depósitos de sangre materna (**FIGURA 41-14**). El oxígeno se difunde; los nutrientes pasan por difusión o mediante transporte activo

de la sangre materna a los capilares del feto, para llegar después al feto por medio de la vena umbilical fetal. Las arterias umbilicales transportan el dióxido de carbono y los desechos, como la urea, del feto hacia la madre. El dióxido de carbono se libera de los pulmones de la madre, y la urea del feto se excreta a través de los riñones de la mamá.

Las membranas de los capilares y las vellosidades coriónicas, al permitir el intercambio por difusión, actúan como barreras para algunas proteínas grandes y la mayoría de las células. A pesar de esto, algunos organismos patógenos y muchas sustancias químicas dañinas, como el alcohol y la nicotina, logran penetrar la barrera de la placenta, como se describe en “Guardián de la salud: La placenta sólo brinda una protección parcial”.

El crecimiento y el desarrollo continúan durante los últimos siete meses

El feto continúa creciendo y desarrollándose durante otros siete meses. Aunque el resto del cuerpo trata de “alcanzar” a la cabeza en cuanto a tamaño, el encéfalo continúa desarrollándose rápidamente y la cabeza sigue siendo grande en relación con el resto del cuerpo. Casi todas las células nerviosas que se forman durante la vida humana se desarrollan durante la etapa embrionaria; por eso, el encéfalo en desarrollo es un blanco tan sensible para el alcohol y otras drogas que se consumen durante el embarazo. A medida que crecen la columna vertebral y el cerebro, comienzan a generar tipos específicos de comportamientos. Al iniciarse el tercer mes del embarazo, el feto empieza a moverse y a responder a los estímulos. Aparecen algunos comportamientos instintivos, como el

de succión, que permitirá al bebé alimentarse con la leche materna tan pronto como nazca. Las estructuras que necesitará el feto cuando salga del útero, como pulmones, estómago, intestinos y riñones, aumentan de tamaño y se vuelven funcionales en forma gradual, aunque no se utilizarán sino hasta después del nacimiento. Casi todos los fetos de 32 semanas de edad o más pueden sobrevivir fuera del vientre materno si reciben asistencia médica; las medidas heroicas que se toman a menudo salvan a los infantes que nacen a edad tan temprana como las 26 semanas, pero los fetos más maduros tienen mayores oportunidades de sobrevivir y de tener buena salud.

El desarrollo culmina con el parto y el alumbramiento

Por lo regular, durante los últimos meses del embarazo, el feto se acomoda con la cabeza hacia abajo en el útero, y la coronilla descansa contra el cérvix (que lo sostiene hacia arriba). El proceso del nacimiento por lo general comienza alrededor del término del noveno mes (FIGURA 41-15). El nacimiento es el resultado de una compleja interacción entre el estiramiento del útero causado por el crecimiento del feto y las hormonas fetales y maternas, lo que finalmente inicia el parto (contracciones del útero que dan como resultado el alumbramiento, es decir, la expulsión del feto por el útero).

A diferencia de los músculos esqueléticos, los músculos uterinos pueden contraerse de manera espontánea, y el estiramiento intensifica esa tendencia. A medida que el bebé crece, estira los músculos uterinos, los que ocasionalmente se contraen semanas antes del alumbramiento. Se desconocen los estímulos exactos que desencadenan el alumbramiento humano. El feto que cumple con su término completo sin du-

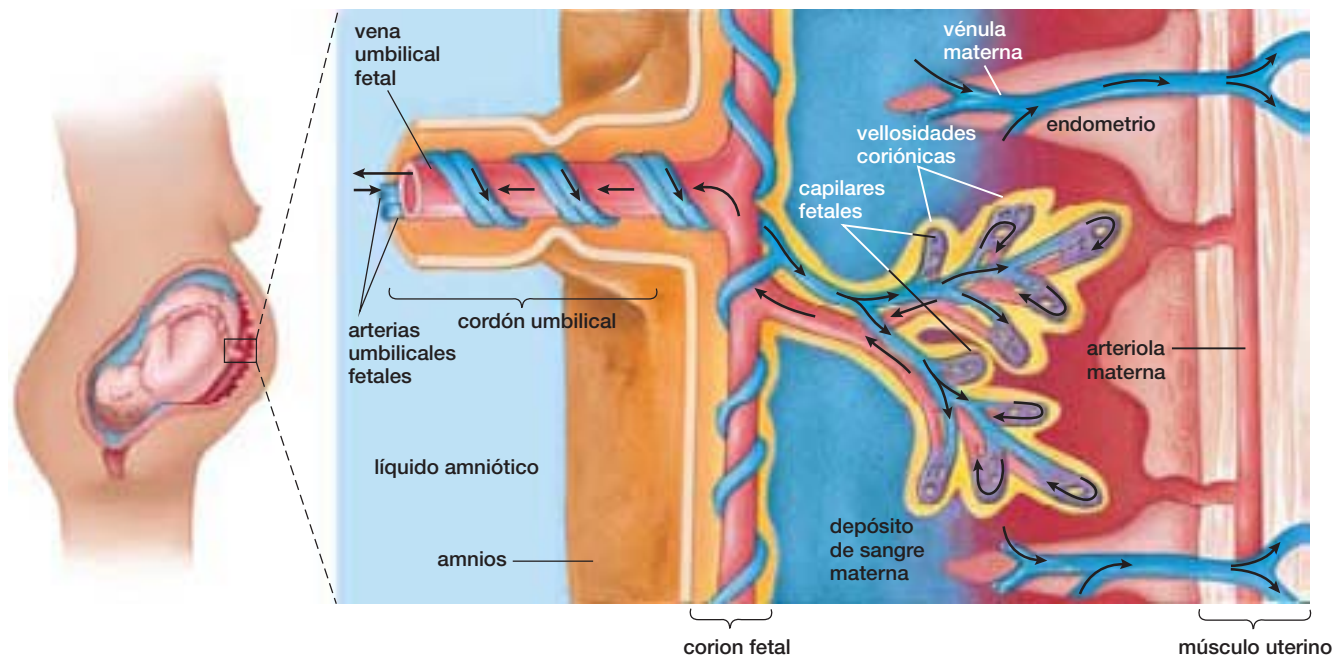


FIGURA 41-14 La placenta

La placenta se forma a partir tanto del corion del embrión como del endometrio de la madre. Los capilares del endometrio se rompen y liberan sangre para formar depósitos dentro de la placenta. Las vellosidades coriónicas que contienen los capilares embrionarios se prolongan hacia dentro de estos depósitos. La placenta permite el intercambio de desechos y nutrientes entre los capilares fetales y los depósitos de sangre materna, al tiempo que mantiene separados los suministros de sangre fetal y materna. Las arterias umbilicales conducen la sangre desoxigenada del feto hacia la placenta, y la vena umbilical lleva de regreso la sangre oxigenada hacia el feto. **PRE-GUNTA:** Unos cuantos tipos de mamíferos carecen de placenta. ¿Cuál sería tu predicción acerca de la naturaleza del desarrollo en los mamíferos que no tienen placenta?



FIGURA 41-15 El parto

da desempeña un papel importante en la secreción de sustancias que indican que ya está listo para nacer. Esas sustancias desencadenan una cascada de sucesos que hacen que el útero tenga aún más probabilidad de contraerse. Cuando la combinación de hormonas y estiramiento activa al útero más allá de cierto punto crítico, comienzan las contracciones fuertes que indican el inicio del trabajo de parto. A medida que siguen las contracciones, la cabeza del bebé empuja contra el cérvix de la madre, lo que causa que su diámetro se expanda (se dilate). Los receptores de dilatación de las paredes del cérvix envían señales al hipotálamo y provocan la liberación de oxitocina. Bajo el doble estímulo de la prostaglandina y la oxitocina, el útero se contrae todavía con mayor fuerza. Este ciclo de retroalimentación positiva finalmente cesa cuando el bebé sale de la vagina, o *canal de parto*.

La cabeza del infante es tan grande que apenas puede pasar por la pelvis de la madre. El cráneo se comprime hasta adquirir una forma ligeramente cónica a medida que pasa a través de la vagina. No sabemos si el alumbramiento resulta doloroso para el bebé, pero sin duda lo es para la madre (véase “Enlaces con la vida: ¿Por qué el parto es tan difícil?”). Al infante le espera un despertar rudo. La matriz es suave, tibia y acolchonada con líquido. De repente, el bebé tiene que respirar por sí solo, regular su temperatura corporal y succionar para obtener alimento.

Luego de un breve descanso después del parto, el útero reanuda sus contracciones y se encoge considerablemente. Durante estas contracciones la placenta se desprende de la pared uterina y es expelida a través de la vagina (lo que se conoce como *secundinas*). El cordón umbilical ahora libera prostaglandinas que provocan la contracción de los músculos que rodean los vasos sanguíneos fetales para detener el flujo de sangre. Aunque ligar el cordón umbilical es una práctica común, en realidad no es necesaria; si lo fuera, otros mamíferos no sobrevivirían después de nacer.

Las hormonas del embarazo estimulan la secreción de leche

rimenta la madre en las glándulas mamarias la preparan para que continúe alimentando al bebé después de nacido. Cuando ocurre el embarazo, grandes cantidades de estrógeno y de progesterona (las cuales actúan junto con otras hormonas) estimulan a las **glándulas mamarias** —que producen leche materna— y hacen que las mamas aumenten de volumen y desarrollen la capacidad para secretar la leche necesaria para alimentar al infante. Las glándulas mamarias están dispuestas en círculos alrededor del pezón, y cada glándula cuenta con un conducto lactífero que termina en el *pezón*, el cual es una proyección del tejido epitelial (FIGURA 41-16). La secreción real de leche, llamada **lactancia**, se activa por medio de la hormona hipofisiaria llamada *prolactina*.

El nivel de prolactina se eleva de manera uniforme desde aproximadamente la quinta semana de embarazo y llega a su

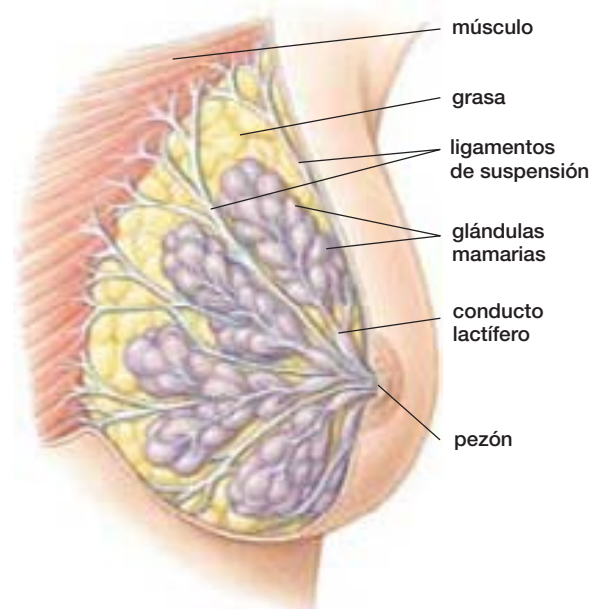


FIGURA 41-16 Estructura de las glándulas mamarias. Durante el embarazo, el tejido adiposo, las glándulas que secretan leche y los conductos lactíferos aumentan de tamaño.

GUARDIÁN DE LA SALUD

La placenta sólo brinda una protección parcial

Durante la primera mitad del siglo xx, los médicos pensaban que la placenta protegía el desarrollo del feto de casi todas las sustancias dañinas presentes en la sangre materna. Ahora sabemos que esto no es verdad. De hecho, la mayoría de los fármacos (tanto medicinales como “recreativos”) e incluso algunos organismos patógenos cruzan rápidamente la barrera de defensa de la placenta y afectan al feto.

LAS INFECCIONES PUEDEN ATRAVESAR LA PLACENTA

La bacteria de la sífilis y los virus que causan el herpes genital y el sarampión en ocasiones cruzan la placenta y dañan al embrión en desarrollo. Los infantes pueden nacer con VIH, transmitido por la madre a través de la placenta.

LOS FÁRMACOS CRUZAN RÁPIDAMENTE LA PLACENTA

Un ejemplo trágico de un fármaco que cruza la placenta es la *talidomida*, la cual se prescribía comúnmente en Europa a finales de la década de 1950 y a principios de la de 1960, como medicamento sedante y para combatir las náuseas matinales propias del embarazo. Los efectos devastadores de la talidomida en el embrión se pusieron de manifiesto cuando muchos bebés nacieron sin extremidades o con deformaciones en ellas. A finales de la década de 1980, se encontró que el fármaco contra el acné Accutane® causaba severas deformidades en los bebés de las madres que lo usaban. Los investigadores ahora saben que el Accutane contiene una sustancia que actúa de una manera similar a las moléculas reguladoras naturales que controlan la formación del cuerpo del embrión en desarrollo. Un ejemplo más reciente es el ácido valproico, un anticonvulsivo, que se prescribe comúnmente para controlar la epilepsia. Un estudio demostró que los niños de las madres que habían tomado este fármaco durante el embarazo tenían una probabilidad siete veces mayor de presentar defectos congénitos, y otra investigación demostró que el promedio de los cocientes de inteligencia (CI) de los niños que habían sido expuestos al ácido valproico antes de nacer eran significativamente más bajos durante la niñez.

Aunque estos son ejemplos extremos, cualquier fármaco, incluida la aspirina, tiene el potencial de dañar al feto. Cualquier mujer que piensa que está embarazada debe consultar a su médico acerca de los fármacos que podría usar sin ningún riesgo.

LOS EFECTOS DEL TABAQUISMO

Muchas mujeres son tan adictas al tabaco que no dejan de fumar durante el embarazo y exponen al bebé a los efectos nocivos de la nicotina, el monóxido de carbono y una variedad enorme de sustancias carcinógenas. Como resultado, presentan una incidencia mayor de abortos y tienen tendencia a dar a luz a infantes más pequeños, los cuales presentan un riesgo mayor de morir poco después del nacimiento. Hay evidencia de que algunos hijos de mujeres adictas al tabaco también sufren trastornos de conducta y deficiencias intelectuales.

TRASTORNOS DEL SÍNDROME DE ALCOHOLISMO FETAL

Los efectos del alcohol en el feto que se está desarrollando son devastadores. Cuando una mujer embarazada es bebedora, el alcohol en la sangre del nonato alcanza un nivel tan alto como el que está presente en la sangre de la madre y no se metaboliza rápidamente. Una mujer que ingiere una o dos copas al día durante los primeros tres meses del embarazo incrementa de manera significativa sus riesgos de sufrir un aborto. A pesar de las advertencias que vienen impresas en las botellas de vino y de cerveza, más del 12 por ciento de las mujeres estadounidenses beben alcohol durante el embarazo, por lo que cada año nacen unos 40,000 infantes con *trastornos del espectro del síndrome de alcoholismo fetal* (SAF), es decir, cualquiera de las discapacidades causadas por exposición prenatal al alcohol. Las mujeres que beben aunque sea poco durante el embarazo tienen hijos más pequeños en promedio, y un extenso estudio descubrió que estos niños son más proclives a mostrar ansiedad, depresión o agresividad. Muchos niños de madres que beben demasiado y en forma continua (cuatro, cinco o más copas al día) o que ocasionalmente consumen cinco copas (o más) de una sola vez presentan el síndrome de alcoholismo fetal. Estos niños tienen una inteligencia por debajo del promedio, son hiperactivos e irritables y manifiestan un control deficiente de sus impulsos. Ciertas deformidades faciales sirven de base para diagnosticar el SAF (FIGURA E41-2b). En los casos extremos, los niños que sufren del SAF tienen la cabeza más pequeña y su cerebro muestra un desarrollo inadecuado (FIGURA E41-2a). Los niños con SAF sufren retrasos en el crecimiento y presentan una incidencia por arriba de lo normal de defectos en el cora-

punto máximo una vez que nace el infante, lo que estimula la producción de leche. La leche empieza a salir cuando el bebé succiona estimulando las terminales nerviosas de los pezones, lo que envía una señal al hipotálamo para que la glándula hipófisis libere una cantidad adicional de prolactina y oxitocina. Esta última hormona hace que se contraigan los músculos que rodean a las glándulas mamarias, enviando así la leche hacia los conductos que terminan en los pezones (véase la figura 41-16).

Durante los primeros días después del nacimiento del bebé, las glándulas mamarias secretan un líquido aguado y de color amarillento llamado **calostro**. El calostro es rico en proteínas y anticuerpos provenientes de la madre, lo que ayuda a proteger al infante de las enfermedades mientras se desarrolla su sistema inmunitario. El calostro es reemplazado gradualmente por la leche madura, que contiene más grasas y azúcar (lactosa) y menos proteínas.

El envejecimiento es inevitable

El proceso de envejecimiento se inicia desde el momento en que se nace. Durante miles de años, los seres humanos han intentado demorar el envejecimiento y prolongar la vida. La mítica “fuente de la juventud” ha sido reemplazada por elíxires más modernos. Estas píldoras, hormonas y dietas, de las cuales se asegura que retardan el envejecimiento, sólo tienen algo en común: ninguna de ellas ha demostrado que realmente funciona.

Pero, ¿qué es el **envejecimiento** (FIGURA 41-17)? Los investigadores han definido el envejecimiento como una acumulación gradual del deterioro aleatorio de las moléculas biológicas esenciales, en particular el DNA, que se inicia en una edad temprana. Con el tiempo, se rebasa la capacidad del organismo para reparar o compensar el daño, lo que deterio-

zón y otros órganos. Los daños son irreversibles y en ocasiones mortales.

El síndrome de alcoholismo fetal es la causa principal del retraso mental en Estados Unidos, ya que cuando menos 4000 infantes nacen con SAF cada año (aproximadamente 1 de cada 1000 nacimientos). Los investigadores han llegado a la conclusión de que no hay nivel de seguridad en el consumo de alcohol durante ninguna fase del embarazo. Por su parte, el Departamento de Salud de Estados Unidos aconseja a las mujeres embarazadas o a las que piensan embarazarse que eviten por completo el consumo de alcohol.

a)



FIGURA E41-2 El alcohol perjudica el desarrollo encefálico

a) El cerebro de un niño de seis semanas de edad con un severo síndrome de alcoholismo fetal (izquierda) y el cerebro de un niño normal de la misma edad (derecha) ponen de manifiesto los efectos devastadores del alcohol en un cerebro en desarrollo. (Fotografía cortesía del doctor Sterling Clarren, de la Universidad de Washington, Seattle). b) Los niños con SAF por lo general tienen ojos que se angostan de lado a lado, carecen de una hendidura bien definida entre la nariz y el labio superior, y poseen un labio superior angosto. (Fotografía cortesía de la doctora Susan Astley, de la Universidad de Washington, Seattle).

En resumen, una mujer embarazada debe dar por hecho que cualquier droga que consuma afectará al infante en desarrollo. Las mujeres que tienen probabilidad de quedar embarazadas necesitan saber que las etapas cruciales del desarrollo podrían ocurrir incluso antes de enterarse que están embarazadas, así que deben tener las mismas precauciones que tendrían si tuvieran la certeza de estar encintas. Las decisiones que tomen las madres durante este periodo crítico de nueve meses influirán de forma decisiva en el futuro bienestar del niño.

b)



FIGURA 41-17
La juventud se encuentra con la vejez



ra el funcionamiento a todos los niveles, desde las células y tejidos hasta los órganos. El envejecimiento se manifiesta de diversas maneras: se pierde la masa muscular y ósea, la piel pierde elasticidad, se prolonga el tiempo de reacción, mientras que los sentidos, como el de la vista y el oído, se vuelven menos agudos. Una respuesta inmunitaria menos potente hace que el individuo se vuelva más vulnerable a las enfermedades conforme envejece. A la larga, el individuo ya no puede luchar contra las amenazas naturales y entonces sobreviene la muerte.

¿El envejecimiento, que conduce a la muerte, es una etapa natural del desarrollo programada como parte del ciclo vital? Desde una perspectiva evolutiva, el envejecimiento se considera más el resultado de la negligencia que de la programación genética. La selección natural conserva solamente aquellos mecanismos que mantienen vivo y saludable a un

ENLACES CON LA VIDA

¿Por qué el parto es tan difícil?

Seguramente has visto películas de animales que están pariendo. En comparación con lo que experimentan las mujeres cuando dan a luz, en los animales este acto pareciera indoloro y que no demanda esfuerzo. ¿Entonces, por qué el parto en el caso de los humanos es tan diferente? Las investigadoras Karen Rosenberg y Wenda Trevathan encontraron que el parto asistido es universal a través de la inmensa escala de las culturas humanas. Ellas y otros investigadores consideran que la ayuda en un nacimiento es el resultado de dos rasgos humanos. Primero, caminamos erguidos y este *bipedalismo* ha alterado la forma de la pelvis. Segundo, tenemos una cabeza relativamente grande cuando nacemos, que apenas cabe por la abertura de la pelvis y que por lo regular se deforma temporalmente durante el parto. Estos rasgos humanos fuerzan al infante a salir tomando una

posición extraña, un poco hacia atrás y a los lados (véase la figura 41-15). La cabeza grande del bebé hace que el parto resulte difícil y doloroso, de manera que la madre se encuentra algo incapacitada a medida que va naciendo el bebé. Los simios, cuyas cabezas son relativamente más pequeñas, nacen casi sin ningún esfuerzo, con la cabeza y el cuerpo hacia delante, lo que permite a la madre agacharse para ayudar a que salga la cría y llevarlo hacia su pecho sin ninguna ayuda. Los investigadores postulan que como los cerebros y las cabezas de nuestros ancestros primitivos aumentaron de tamaño en forma drástica, al mismo tiempo aumentó la dificultad e incomodidad relacionadas con el parto, por lo que se hizo necesaria la asistencia durante el proceso.

organismo durante la época en que produce y alimenta a su prole. Los mecanismos de reparación que prolongan la vida más allá de este periodo no se han visto favorecidos por la selección natural. Además, las mutaciones perniciosas cuyos efectos se manifiestan sólo después de que un organismo ha terminado de reproducirse se transmiten a la descendencia, por lo que se diseminan rápidamente y se acumulan dentro de una población.

Un factor que contribuye al daño celular que se va acumulando con el envejecimiento es la producción de radicales libres (véase el capítulo 2), los cuales atacan a los componentes celulares. Los radicales libres se generan como productos de muchas reacciones bioquímicas cruciales, en particular aquellas que aprovechan la energía. Un organismo moriría casi inmediatamente si se detuviera la producción de energía; sin embargo, resulta irónico que las mismas reacciones metabólicas que producen la energía útil puedan, indirectamente y con el tiempo, llevar a la muerte a un organismo. La capacidad para reparar un daño, particularmente del DNA, reside en las

enzimas que también están codificadas por el DNA. Estas enzimas llegan a ser menos funcionales a medida que se acumulan las mutaciones en los genes que las codifican, condenando al organismo a la gran cantidad de errores genéticos y al mal funcionamiento metabólico.

Los investigadores han criado animales genéticamente simples —como las moscas de la fruta y los nematodos— para que vivan más tiempo y están estudiando las diferencias genéticas entre los individuos cuyo periodo de vida es normal y aquellos que viven más tiempo. Todavía está por verse si los cambios genéticos hechos como resultado de este conocimiento pueden hacer la diferencia en la duración de la vida humana. Es posible que cientos de rutas bioquímicas determinadas genéticamente desempeñen un papel interrelacionado en la longevidad. ¿Sería deseable prolongar la vida humana, a pesar de los problemas de salud que acompañan a la vejez y a la reducción de los recursos de un planeta superpoblado? Nadie lo sabe, pero podemos estar seguros de que esto aún está lejos de volverse realidad.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

LOS ROSTROS DEL SÍNDROME DE ALCOHOLISMO FETAL



La madre de John Kellerman llegó ebria a un hospital de Denver. Cuando se le rompió la fuente (se refiere a la liberación del líquido amniótico cuando se rompe el amnios, generalmente durante el trabajo de parto), el olor a alcohol llenó toda la sala de partos del hospital. El recién nacido literalmente nadaba en él. Y aunque nunca había bebido alcohol, John nació intoxicado. Su madre adoptiva explica que si John no toma su medicamento, su comportamiento se asemeja al de una persona alcoholizada: se muestra necio, veleidoso y carente de control de sus impulsos. Lo que escriben los jóvenes con SAF nos permite conocer las dificultades a las que se enfrentan cada día durante toda su vida. John, en su poema *Help (Ayuda)*, nos dice:

Quando mi cerebro no está trabajando bien,

permítome que me ayude alguien en quien confío para sentirme seguro y tranquilo otra vez.

Quando mi cerebro no está trabajando bien, me siento como si fuera en un tren que va cuesta abajo, con el maquinista dormido; no puedo despertarlo y no puedo aplicar los frenos.

Por su parte, CJ, una víctima del SAF, de Canadá, nos explica:

Soy pequeña, tengo una cara diferente y bastantes problemas de aprendizaje. Las mamás no hicieron esto a propósito, por eso no hay que culparlas ni enojarse con ellas.

Tengo 17 años y he padecido el SAF toda la vida.

Lo tendré para siempre, nunca desaparecerá.

No me culpen ni se enojen conmigo.

Piensa en esto En unas 20 entidades de Estados Unidos la legislación establece que las mujeres que consuman drogas ilegales o abusen del alcohol durante el embarazo serán juzgadas por la ley con el fin de proteger los derechos del feto. ¿Cómo piensas que la sociedad debe enfocar el dilema de las mujeres embarazadas que de manera inconsciente y con frecuencia causan daños a sus hijos que están por nacer? ¿Es esto un abuso en contra de los niños? Con base en lo que sabes ahora acerca del desarrollo, ¿qué harías si una amiga tuya que está embarazada continúa fumando, bebiendo o consumiendo drogas ilegales?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

41.1 ¿En qué difieren el desarrollo indirecto y el directo?

Los animales experimentan un desarrollo indirecto o directo. En el desarrollo indirecto, los huevos (por lo común con relativamente poca cantidad de vitelo) dan origen a larvas, las cuales se desarrollan a través de una etapa de alimentación y luego sufren una metamorfosis para volverse adultos adquiriendo formas corporales notablemente diferentes. En el desarrollo directo, el animal recién nacido es sexualmente inmaduro y se asemeja a un adulto, pero en miniatura. Los animales con desarrollo directo tienden a producir huevos grandes llenos de vitelo, o bien, el embrión en desarrollo se alimenta dentro del cuerpo de la madre. En las aves, los reptiles y los mamíferos, las membranas extraembrionarias (corion, amnios, alantoides y saco vitelino) encierran al embrión en un espacio lleno de líquido y regulan el intercambio de nutrientes y desechos entre el embrión y su ambiente.

41.2 ¿Cómo procede el desarrollo animal?

El desarrollo animal ocurre en varias etapas. *Segmentación*: El óvulo fecundado experimenta divisiones celulares casi sin crecimiento, de forma que el citoplasma del huevo se divide en células más pequeñas. La división por segmentación da por resultado la formación de la mórula, una esfera sólida de células. Luego se abre una cavidad dentro de la mórula, formando así la blástula, una esfera hueca de células. *Gastrulación*: Se forma una invaginación en la blástula, y las células migran de la superficie al interior de la esfera hasta formar una gástrula de tres capas. Estas tres capas celulares —ectodermo, mesodermo y endodermo— dan origen a todos los tejidos adultos (véase la tabla 41-2). *Organogénesis*: Las capas celulares de la gástrula forman los órganos característicos de la especie animal. El individuo joven aumenta de tamaño y alcanza la madurez sexual. *Envejecimiento*: Las células funcionan con menos eficiencia a medida que se van acumulando daños al DNA y a otros componentes celulares; la capacidad reparadora de las células se deteriora y, a la larga, el organismo muere.

41.3 ¿Cómo se controla el desarrollo?

Todas las células del cuerpo de un animal contienen un conjunto completo de información genética, pero las células se especializan en funciones particulares. Durante el desarrollo, las células sufren diferenciación al estimular y reprimir la transcripción de genes específicos. Las células de los vertebrados conservan la capacidad de formar un individuo completo si se les separa durante la etapa de blástula, como sucede en el caso de los gemelos idénticos.

Durante la gastrulación se decide el destino de la mayoría de las células del embrión, por medio de un proceso llamado *inducción*, el cual es estimulado por mensajeros químicos recibidos de las células cercanas. La diferenciación de las células en papeles especializados tiene lugar como resultado de la expresión diferencial de los genes causada por la inducción. Las moléculas reguladoras, comúnmente proteínas (o proteínas combinadas con

sustancias como las hormonas esteroideas), determinan cuáles genes deben expresarse; tales moléculas se enlazan a los genes específicos, ya sea bloqueando o promoviendo la transcripción. Las células migran dentro del embrión en desarrollo, por medio de un proceso que requiere de la comunicación química entre ellas. Las proteínas superficiales asociadas con tipos de células específicos reconocen las rutas químicas tendidas por otras células, lo que propicia la migración celular. Los segmentos de genes homeobox codifican las secuencias de aminoácidos específicos que permiten a las proteínas llamadas factores de transcripción unirse con genes particulares y transcribirlos (para producir RNA mensajero). Las proteínas de factor de transcripción especial codificadas por genes homeobox sirven como “reguladores maestros” del desarrollo, al actuar con todos los genes necesarios para producir una parte especial del cuerpo, como una extremidad, por ejemplo.

41.4 ¿Cómo se desarrollan los seres humanos?

Un óvulo fecundado (cigoto) se desarrolla en un blastocisto hueco y se implanta en el endometrio. La pared externa se convierte en el corion y formará la contribución embrionaria a la placenta; la masa celular interna se convertirá en el embrión y en las otras tres membranas extraembrionarias. Durante la gastrulación, las células migran y sufren diferenciación para formar el ectodermo, mesodermo y endodermo. Durante la tercera semana, el endodermo forma un tubo que será el tracto digestivo, el corazón comienza a latir y aparecen los rudimentos del sistema nervioso. Al finalizar el segundo mes, ya se han formado los órganos principales; y el embrión, que ahora se llama feto, se asemeja a un ser humano. En los siete meses siguientes antes del nacimiento, el feto continúa creciendo; los pulmones, el estómago, los intestinos, los riñones y el sistema nervioso crecen, se desarrollan y se vuelven más funcionales. El desarrollo embrionario humano (las etapas que se resumen en la figura 41-8) siguen los mismos principios que el desarrollo en otros mamíferos.

Durante el embarazo, las glándulas mamarias de la madre crecen bajo la influencia del estrógeno, la progesterona y otras hormonas. Después de aproximadamente nueve meses, las contracciones uterinas se inician por la interacción compleja del estiramiento del útero y la liberación de prostaglandinas y oxitocina. Como resultado, el útero expelle al bebé y luego a la placenta. Después del parto, el infante comienza a mamar, lo que activa la liberación de prolactina y oxitocina, que propician la secreción de la leche materna.

El envejecimiento es la acumulación gradual del deterioro celular (particularmente del material genético) con el paso del tiempo; es un proceso que conduce a la pérdida de funcionalidad de un organismo y, a la larga, a la muerte.

Web tutorial 41.1 Descripción del desarrollo animal

TÉRMINOS CLAVE

alantoides *pág. 840*
 amnios *pág. 840*
 blastocisto *pág. 845*
 blastoporo *pág. 841*
 blástula *pág. 841*
 calostro *pág. 852*
 célula madre *pág. 843*

célula madre adulta *pág. 843*
 célula madre embrionaria *pág. 843*
 clonación terapéutica *pág. 843*
 corion *pág. 840*

desarrollo *pág. 842*
 desarrollo directo *pág. 838*
 desarrollo indirecto *pág. 838*
 diferenciación *pág. 842*
 disco embrionario *pág. 847*
 ectodermo *pág. 841*
 endodermo *pág. 841*

envejecimiento *pág. 852*
 feto *pág. 848*
 gástrula *pág. 841*
 gastrulación *pág. 841*
 glándulas mamarias *pág. 851*
 homeobox *pág. 845*
 huevo amniótico *pág. 840*

implantación pág. 845
inducción pág. 844
lactancia pág. 851
larva pág. 838
masa celular interna
 pág. 845

membrana extraembrionaria
 pág. 840
mesodermo pág. 841
metamorfosis pág. 838
mórula pág. 841
notocordio pág. 841

organogénesis pág. 841
parto pág. 850
placenta pág. 849
saco vitelino pág. 840
segmentación
 pág. 841

síndrome de alcoholismo fetal (SAF) pág. 837
vellosidades coriónicas
 pág. 847
vitelo pág. 838

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Distingue entre el desarrollo indirecto y el directo; da ejemplos de cada uno.

Describe la estructura y función de las cuatro membranas extraembrionarias que se encuentran en los reptiles y las aves. ¿Están presentes estas cuatro membranas en la placenta de los mamíferos? ¿En qué formas son similares sus papeles en los reptiles y las aves en comparación con los mamíferos? ¿En qué difieren?

¿Qué es el vitelo? ¿Cómo influye en la segmentación?

¿Qué es la gastrulación? Describe la gastrulación en las ranas.

Nombra dos estructuras derivadas de cada una de las tres capas de tejido embrionarias: endodermo, ectodermo y mesodermo.

¿Cómo contribuye la muerte celular al desarrollo?

Describe el proceso de inducción y da dos ejemplos.

Define la diferenciación. ¿Cómo se diferencian las células, es decir, cómo las células adultas expresan algunos de los genes, pero no todos, del óvulo fecundado?

9. En los seres humanos, ¿dónde tiene lugar la fecundación y qué etapas del desarrollo tienen lugar antes de que el óvulo fecundado llegue al útero?

10. Describe cómo el blastocisto humano da origen al embrión y a sus membranas extraembrionarias.

11. Explica cómo la estructura de la placenta evita que se mezclen la sangre del feto y de la madre, pero permite el intercambio de sustancias entre la madre y el feto.

12. ¿La placenta es una barrera eficaz contra las sustancias que pueden dañar al feto? Describe dos tipos de agentes nocivos que pueden atravesar la placenta y explica sus efectos en el feto.

13. ¿Cómo es que los cambios en las mamas preparan a la madre para alimentar al recién nacido? ¿Cómo influyen las hormonas en estos cambios y cómo estimulan la producción de leche materna?

14. Describe los sucesos que conducen a la expulsión del bebé y la placenta del útero. Explica por qué éste es un ejemplo de retroalimentación positiva.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

Una investigadora obtiene dos embriones de rana en la etapa de gástrula. Ella retira cuidadosamente un cúmulo de células de un sitio que sabe que normalmente llegaría a formar un tejido de tubo neural y lo trasplanta a la segunda gástrula en un sitio que normalmente se convertiría en piel. ¿La segunda gástrula desarrollará dos tubos neurales? Explica tu respuesta.

Los embriólogos han estado usando la fusión de embriones para producir ratones *tetraparentales* (con cuatro progenitores) y han producido “cabrejas” a partir de embriones de cabras y ovejas. Los cuerpos que resultaron son combinaciones de células de ambos animales. ¿Por qué tuvo éxito la fusión con estos embri-

nes muy jóvenes (de cuatro a ocho células) y fracasó cuando se emplearon embriones de más edad?

3. Si el núcleo de una célula adulta puede ser trasplantado a un óvulo al cual se le ha extraído el núcleo para producir un clon del adulto, ¿es posible producir teóricamente clones humanos? ¿Esos clones serían exactamente iguales a la persona que aportó el núcleo? Explica.

4. Con base en los conocimientos sobre clonación que adquiriste en el capítulo 11 y en el presente, formula el mayor número de argumentos posibles a favor y en contra de la clonación terapéutica. ¿Cuál es tu punto de vista?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Cibelli, J. B., Lanza, R. P. y West M. D. “The First Human Cloned Embryo”. *Scientific American*, noviembre de 2001. La clonación terapéutica que emplea las propias células del receptor puede generar células madre que no experimentarán rechazo por parte del sistema inmunitario.

Hall, S. “The Good Egg”. *Discover*, mayo de 2004. Este artículo explica cómo se desarrolla el cigoto humano, con fotografías espectaculares.

Olshansky, S. J., Hayflick, L. y Carnes, B. A. “No Truth to the Fountain of Youth”. *Scientific American*, junio de 2002. Abundan los “remedios” contra el envejecimiento, pero ninguno ha probado ser verdaderamente eficaz.

Park, A. y Cray, D. “The Politics of Stem Cells”. *Time*, 7 de agosto de 2006. Una introducción para el hombre común sobre la investigación de las células madre; incluye bellas ilustraciones.

Rose, M. R. “Can Human Aging Be Postponed?” *Scientific American*, diciembre de 1999. En teoría, es posible retardar el envejecimiento, pero esto no se logrará pronto.

Rosenberg, K. W. y Trevathan, W. R. “The Evolution of Human Birth”. *Scientific American*, noviembre de 2001. Explica por qué los humanos enfrentan un momento difícil durante el parto.

APÉNDICE I

Conversiones del sistema métrico

Para convertir unidades métricas:

Multiplica por:

Para obtener el equivalente en el sistema inglés:

	Longitud	
centímetros (cm)	0.3937	pulgadas (in)
metros (m)	3.2808	pies (ft)
metros (m)	1.0936	yardas (yd)
kilómetros (km)	0.6214	millas (mi)
Área		
centímetros cuadrados (cm ²)	0.155	pulgadas cuadradas (in ²)
metros cuadrados (m ²)	30.7639	pies cuadrados (ft ²)
metros cuadrados (m ²)	1.1960	yardas cuadradas (yd ²)
kilómetros cuadrados (km ²)	0.3831	millas cuadradas (mi ²)
hectáreas (ha) (10,000 m ²)	2.4710	acres (a)
Volumen		
centímetros cúbicos (cm ³)	0.06	pulgadas cúbicas (in ³)
metros cúbicos (m ³)	35.30	pies cúbicos (ft ³)
metros cúbicos (m ³)	1.3079	yardas cúbicas (yd ³)
kilómetros cúbicos (km ³)	0.24	millas cúbicas (mi ³)
litros (L)	1.0567	cuartos de galón (qt), EUA
litros (L)	0.26	galones (gal), EUA
Masa		
gramos (g)	0.03527	onzas (oz)
kilogramos (kg)	2.2046	libras (lb)
toneladas métricas (t)	1.10	toneladas (tn), EUA
Rapidez		
metros/segundo (m/s)	2.24	millas/hora (m/h)
kilómetros/horas (km/h)	0.62	millas/hora (m/h)

Para convertir unidades inglesas:

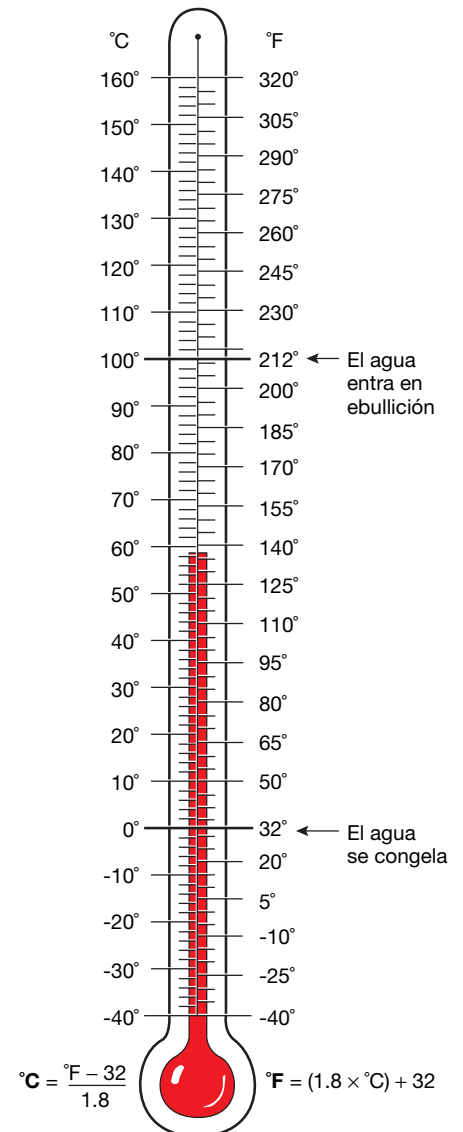
Multiplica por:

Para obtener el equivalente en el sistema métrico:

	Longitud	
pulgadas (in)	2.54	centímetros (cm)
pies (ft)	0.3048	metros (m)
yardas (yd)	0.9144	metros (m)
millas (mi)	1.6094	kilómetros (km)
Área		
pulgadas cuadradas (in ²)	6.45	centímetros cuadrados (cm ²)
pies cuadrados (ft ²)	0.0929	metros cuadrados (m ²)
yardas cuadradas (yd ²)	0.8361	metros cuadrados (m ²)
millas cuadradas (mi ²)	2.5900	kilómetros cuadrados (km ²)
acres (a)	0.4047	hectáreas (ha) (10,000 m ²)
Volumen		
pulgadas cúbicas (in ³)	16.39	centímetros cúbicos (cm ³)
pies cúbicos (ft ³)	0.028	metros cúbicos (m ³)
yardas cúbicas (yd ³)	0.765	metros cúbicos (m ³)
millas cúbicas (mi ³)	4.17	kilómetros cúbicos (km ³)
cuartos de galón (qt), EUA	0.9463	litros (L)
galones (gal), EUA	3.8	litros (L)
Masa		
onzas (oz)	28.3495	gramos (g)
libras (lb)	0.4536	kilogramos (kg)
toneladas (tn), EUA	0.91	toneladas métricas (t)
Rapidez		
millas/hora (mi/h)	0.448	metros/segundo (m/s)
millas/hora (mi/h)	1.6094	kilómetros/hora (km/h)

Prefijos métricos

Prefijo		Significado
giga-	G	10 ⁹ = 1,000,000,000
mega-	M	10 ⁶ = 1,000,000
kilo-	k	10 ³ = 1000
hecto-	h	10 ² = 100
deca-	da	10 ¹ = 10
		10 ⁰ = 1
deci-	d	10 ⁻¹ = 0.1
centi-	c	10 ⁻² = 0.01
mili-	m	10 ⁻³ = 0.001
micro-	μ	10 ⁻⁶ = 0.000001



APÉNDICE II

Clasificación de los principales grupos de organismos*

Dominio	Reino	Filum	Nombre común
Bacteria (procariotas, peptidoglicano en la pared celular)			bacterias
Archaea (procariotas, sin peptidoglicano en la pared celular)			arqueas
Eukarya (eucariotas)		Rhodophyta Chlorophyta euglenidos foraminíferos	algas rojas algas verdes euglenids forams
	Excavata	parabasálidos diplomónadas	excavados parabasalids diplomonads
	Amoebozoa	Gymnamoebae Acrasiomycota	amebozoos amibas lobosas mohos deslizantes celulares
	Alveolata	Apicomplexa Pyrrophyta Ciliophora	alveolados esporozoos dinoflagelados ciliados
	Stramenopila	Oomycota Phaeophyta Bacillariophyta	estramenópilos mohos acuáticos algas pardas diatomeas
	Plantae (multicelulares, fotosintetizadores)	Bryophyta Pteridophyta Coniferophyta Anthophyta	plantas musgos helechos plantas perennifolias plantas con flor
	Fungi (multicelulares, heterótrofos, absorben nutrimentos)	Chytridiomycota Zygomycota Ascomycota Basidiomycota	hongos quitridos zigomicetos hongos de saco hongos de clava
	Animalia (multicelulares, heterótrofos, ingieren nutrimentos)	Porifera Cnidaria Ctenophora Platyhelminthes Nematoda Annelida Oligochaeta Polychaeta Hirudinea Arthropoda Insecta Arachnida Myriapoda Crustacea Mollusca Gastropoda Pelecypoda Cephalopoda Echinodermata Chordata Urochordata Cephalochordata Myxini Vertebrata Pertromyzoantiformes Chondrichthyes Actinopterygii Actinistia Dipnoi Amphibia Reptilia Mammalia	animales esponjas hidras, anémonas de mar, medusas y corales ctenóforos gusanos planos gusanos cilíndricos gusanos segmentados lombrices de tierra gusanos tubulares sanguijuelas artrópodos (“patas articuladas”) insectos arañas, garrapatas milpiés y ciempiés cangrejos, langostas moluscos (“de cuerpo blando”) caracoles mejillones, almejas calamares, pulpos estrellas de mar, erizos y pepinos de mar cordados tunicados pez espada mixinos vertebrados lampreas tiburones, rayas peces óseos celacantos peces pulmonados ranas, salamandras tortugas, serpientes, lagartos, cocodrilos y aves mamíferos

* Esta tabla muestra sólo las categorías taxonómicas que se describen en el texto.

APÉNDICE III

Vocabulario de biología: raíces, prefijos y sufijos de uso común

La biología contiene un extenso vocabulario, a menudo derivado de los idiomas griego y latín. Por eso, en vez de tener que memorizar cada palabra como si fuera parte de un nuevo idioma, es más recomendable descubrir el significado de los nuevos términos a partir de las raíces, los prefijos y los sufijos de uso común en biología. A continuación incluimos los significados más comunes empleados en biología dejando a un lado las traducciones literales del griego o el latín. Para cada vocablo que aparece en la lista se da la siguiente información: significado, función de la palabra (si es raíz, prefijo o sufijo) y un ejemplo de su uso en biología.

a-, **an-**, **e-**: sin, carencia de (prefijo); *abiótico*, sin vida.
acro-: cima, lo más alto (prefijo); *acrosoma*, vesícula de enzimas en la punta de un espermatozoide.
ad-: a (prefijo); *adhesión*, propiedad de adherirse a algo.
alo-: otro (prefijo); *alopátrico* (literalmente, “patria diferente”), restringido a regiones diferentes.
anfi-: ambos, doble, dos (prefijo); *anfibio*, clase de vertebrados que generalmente tienen dos etapas vitales (acuática y terrestre; por ejemplo, un renacuajo y una rana adulta.)
andro-: hombre, masculino (raíz); *andrógeno*, una hormona masculina como la testosterona.
antero-: al frente (prefijo o raíz); *anterior*, hacia el frente de.
anti-: contra (prefijo); *antibiótico* (literalmente “contra la vida”), una sustancia que mata las bacterias.
apic-: cima, lo más alto (prefijo); *meristemo apical*, conglomerado de células en división en la punta del vástago o la raíz de una planta.
artro-: articulación (prefijo); *artrópodo*, animales como las arañas, cangrejos e insectos, con exoesqueletos que incluyen patas articuladas.
-asa: enzima (sufijo); *proteasa*, enzima que digiere proteínas.
auto-: mismo (prefijo); *autotrófico*, que se alimenta a sí mismo (por ejemplo, los organismos fotosintéticos).
bi-: dos (prefijo); *bípodo*, que tiene dos pies.
bio: vida (raíz); *biología*, el estudio de la vida.
blast: yema, precursor (raíz); *blástula*, etapa embrionaria del desarrollo, esfera hueca de células.
bronco-: tráquea (raíz); *bronquio*, ramificación de la tráquea que va al pulmón.
carcin, -o: cáncer (raíz); *carcinogénesis*, el proceso de desarrollar cáncer.
cardio: corazón (raíz); *cardíaco*, referente al corazón.
carni-: carne (prefijo o raíz); *carnívoro*, animal que se alimenta de otros animales.
centi-: un centésimo (prefijo); *centímetro*, unidad de longitud equivalente a la centésima parte de un metro.
cefalo-: cabeza (prefijo o raíz); *cefalización*, tendencia a localizar el sistema nervioso principalmente en la cabeza.
-cida: exterminador (sufijo); *pesticida*, sustancia química que aniquila a las “pestes” (por lo general, insectos).
cloro-: verde (prefijo o raíz); *clorofila*, en las plantas, el pigmento verde que absorbe la luz.
condro-: cartílago (prefijo); clase *Chondrichthyes* de vertebrados, incluidos los tiburones y las mantas, con esqueleto formado de cartílago.
romo-: (prefijo o raíz); *cromosoma*, estructura filamentosa de DNA y proteína en el núcleo de una célula (*cromosoma*, literalmente significa “cuerpo coloreado,” porque los cromosomas absorben algo de los tintes empleados comúnmente en la microscopía).
-clasto: romper, disolver (raíz o sufijo); *osteoclasto*, célula que disuelve el hueso.
co-: con o junto con (prefijo); *cohesión*, propiedad de reunirse o adherirse.
celo-: cavidad (prefijo o raíz); *celoma*, la cavidad corporal que separa los órganos internos de la pared corporal.
contra-: contra (prefijo); *contracepción*, acto que evita la concepción (o embarazo).
corteza (córTEX): tronco, capa exterior (raíz); *corteza*, capa externa del riñón.
cráneo-: cabeza (prefijo o raíz); *craneocerebral*, perteneciente al cráneo y el cerebro.

cuad-, **cuatri-**: cuatro (prefijo); *estructura cuaternaria*, el “cuarto nivel” de la estructura proteínica en la cual las múltiples cadenas peptídicas forman una estructura tridimensional compleja.
cuti: piel (raíz); *cutícula*, cubierta exterior de una hoja.
cito-: célula (raíz o prefijo); *citocinina*, hormona vegetal que promueve la división celular.
des-: desde, remover (prefijo); *descomponedor*, organismo que desdobra (o descompone) la materia orgánica.
dendron-: en forma de árbol, ramificado (raíz); *dendritas*, estructuras que se ramifican a partir de las células nerviosas.
derma: piel, capa (raíz); *ectodermo*, la capa celular más externa del embrión.
deutero-: segundo (prefijo); *deuterostoma* (literalmente, “segunda abertura”), animal en el cual el celoma se deriva del intestino.
di-: dos (prefijo); *dicotiledónea*, angiosperma con dos cotiledones en la semilla.
diplo-: ambos, doble, dos (prefijo o raíz); *diploide*, que tiene pares de cromosomas homólogos.
dis-: difícil, doloroso (prefijo); *disfunción*, incapacidad para funcionar adecuadamente.
ecto-: afuera (prefijo); *ectodermo*, la capa más externa del embrión de los animales.
-elo: pequeño, chico (sufijo); *organelo* (literalmente, “órgano pequeño”), estructura subcelular que lleva a cabo una función específica.
endo-: dentro, interior (prefijo); *endocrino*, perteneciente a una glándula que secreta hormonas dentro del organismo.
epi-: fuera, exterior (prefijo); *epidermis*, la capa más externa de la piel.
equi-: igual (prefijo); *equidistante*, la misma distancia.
eritro-: rojo (prefijo); *eritrocito*, glóbulo rojo.
escler-, esclero-: duro, resistente (prefijo); *esclerénquima*, tipo de célula vegetal con una pared celular gruesa y dura.
esperma-, espermato-: semilla (raíz, por lo general); *gimnosperma*, tipo de planta que produce una semilla que no está encerrada en un fruto.
estasis- esta-: estacionario, fijo (sufijo o prefijo); *homeostasis*, proceso fisiológico por medio del cual se mantienen constantes las condiciones internas a pesar de los cambios ambientales externos.
estoma: boca, orificio (prefijo o raíz); *estoma*, el poro ajustable en la superficie de una hoja que permite la entrada del dióxido de carbono.
eu-: verdadero, bueno (prefijo); *eucariótico*, perteneciente a una célula con núcleo verdadero.
ex- (o exo-): fuera de (prefijo); *exocrino*, perteneciente a una glándula que secreta una sustancia (por ejemplo, sudor) hacia el exterior del organismo.
extra-: fuera de (prefijo); *extracelular*, fuera de la célula.
fago-: comer (prefijo o raíz); *fagocito*, célula que come otras células (por ejemplo, algunos tipos de glóbulos rojos).
-fer: contener, llevar (sufijo); *conífera*, árbol que contiene conos.
filo-: amar (prefijo o sufijo); *hidrófilo* (literalmente, “amante del agua”), perteneciente a una molécula soluble en agua.
filo: hoja (raíz o sufijo); *clorofila*, pigmento verde que absorbe la luz en una hoja.
fito-: planta (raíz o sufijo); *gametofito* (literalmente, “planta gameto”), etapa en el ciclo vital de una planta en la que se producen gametos.
fobo-, -fobo: temer (prefijo o sufijo); *hidrófobo* (literalmente, “temor al agua”), perteneciente a una molécula insoluble en agua.
gastro-: estómago (prefijo o raíz); *gástrico*, perteneciente al estómago.
gen: producir (prefijo, sufijo o raíz); *antígeno*, sustancia que causa que el organismo produzca anticuerpos.
gine-: femenino (prefijo o raíz); *ginecología*, el estudio del tracto reproductor femenino.
haplo-: solo, individual (prefijo); *haploide*, que posee una sola copia de cada tipo de cromosoma.
hemo- (o hemato-): sangre (prefijo o raíz); *hemoglobina*, molécula de los glóbulos rojos que contiene oxígeno.
hemi-: mitad (prefijo); *hemisferio*, una de las mitades del cerebro.

hetero-: otro (prefijo); *heterotrófico*, organismo que se alimenta de otros organismos.

hom-, **homo-**, **homeo-**: lo mismo (prefijo); *homeostasis*, mecanismo que permite mantener constantes las condiciones internas de un organismo ante las condiciones externas cambiantes.

hidro-: agua (generalmente prefijo); *hidrofilico*, que es atraído por el agua.

hiper-: sobre, mayor que (prefijo); *hiperosmótico*, que tiene mayor fuerza osmótica (por lo general con una mayor concentración de soluto).

hipo-: debajo, menor que (prefijo); *hipodermis*, debajo de la piel.

inter-: entre (prefijo); *interneurona*, neurona que recibe información de una (o más) neuronas y la envía a otra neurona (o a muchas más).

intra-: dentro (prefijo); *intracelular*, se refiere a un suceso o sustancia dentro de la célula.

iso-: igual (prefijo); *isotónico*

itis: inflamación (sufijo); *hepatitis*, inflamación (o infección) del hígado.

leuco-: blanco (prefijo); *leucocito*, glóbulo blanco.

lipo-: grasa (prefijo o raíz); *lipido*

logos: estudio de (sufijo); *biología*

lisis: aflojar, separar (raíz o sufijo); *hidrólisis*, descomposición del agua.

macro-: grande (prefijo); *macrófago*, glóbulo blanco grande que destruye las células invasoras extrañas.

médula: médula, sustancia intermedia (raíz); *médula renal*, capa interior del riñón.

mero: segmento, sección corporal (sufijo); *sarcómero*, unidad funcional de una célula muscular del esqueleto de un vertebrado.

meso-: mitad (prefijo); *mesófilo*, capas intermedias de células en una hoja.

meta-: cambio, después de (prefijo); *metamorfosis*, cambio en la forma de un cuerpo (por ejemplo, de larva a una forma adulta).

micro-: pequeño (prefijo); *microscopio*, aparato que permite observar objetos diminutos.

mili-: un milésimo (prefijo); *milímetro*, unidad de medida de longitud equivalente a la milésima parte de un metro.

mito-: filamento (prefijo); *mitosis*, división celular (en la cual los cromosomas parecen cuerpos filamentosos).

mono-: uno, único (prefijo); *monocotiledónea*, tipo de angiosperma con un solo cotiledón en la semilla.

morfo-: forma, configuración (prefijo o raíz); *polimorfo*, que tiene múltiples formas.

multi-: muchos (prefijo); *multicelular*, perteneciente a un cuerpo compuesto por más de una célula.

mio-: músculo (prefijo); *miofibrilla*, filamento de proteína en las células musculares.

neo-: nuevo (prefijo); *neonatal*, aquello que se relaciona con un recién nacido.

nefro-: riñón (prefijo o raíz); *nefrona*, unidad funcional del riñón de mamífero.

neumo-: pulmón (raíz); *neumonía*, enfermedad del pulmón.

neuro-: nervio (prefijo o raíz); *neurona*, célula nerviosa.

oligo-: pocos (prefijo); *oligómero*, molécula formada de pocas subunidades (véase también *poli*).

omni-: todo (prefijo); *omnívoros*, animal que come tanto plantas como animales.

oo-, **ov-**, **ovo-**: huevo (prefijo); *ovocito*, una de las etapas del desarrollo de un huevo.

ops-: vista, visión (prefijo o raíz); *opsina*, parte proteínica del pigmento que absorbe la luz en el ojo.

opso-: alimento sabroso (prefijo o raíz); *opsonización*,

osis: condición o enfermedad (sufijo); *aterosclerosis*, enfermedad en la cual las paredes arteriales se engruesan y se endurecen.

oste-: hueso (prefijo o raíz); *osteoporosis*, enfermedad en la cual los huesos se vuelven esponjosos y frágiles.

pater-: padre (generalmente raíz); *paternal*, relacionado con el padre.

pato-: enfermedad (prefijo o raíz); *patología*, el estudio de la enfermedad y del tejido enfermo.

-patía: enfermedad (sufijo); *neuropatía*, enfermedad del sistema nervioso.

peri-: alrededor (prefijo); *periciclo*, la capa de células más externa del cilindro vascular de la raíz de una planta.

-plasma: sustancia formada (raíz o sufijo); *citoplasma*, material que está en el interior de la célula.

ploide: cromosomas (raíz); *diploide*, que tiene cromosomas apareados.

-pod: pie (raíz o sufijo); *gastropodo* (literalmente, “pie-estómago”), una clase de moluscos, principalmente caracoles, que reptan sobre su superficie ventral.

poli-: muchos (prefijo); *polisacárido*, un polímero carbohidrato compuesto de muchas subunidades de azúcares.

post-, **postero-**: detrás de (prefijo); *posterior*, perteneciente a la parte trasera.

pre-, **pro-**: antes, al frente de (prefijo); *mecanismo de aislamiento del pre-apareamiento*, mecanismo que evita el flujo de genes entre las especies e impide el apareamiento (por ejemplo, tener rituales o temporadas de apareamiento diferentes).

prim-: primero (prefijo); *pared celular primaria*, la primera pared celular formada entre las células de la planta durante la división celular.

pro-: antes (prefijo); *procariótica*, perteneciente a una célula sin núcleo (que evolucionó antes del desarrollo del núcleo).

proto-: primero (prefijo); *protocélula*, ancestro evolutivo hipotético de la célula primitiva.

pseudo-, **seudo-**: falso (prefijo); *pseudópodo* o *seudópodo* (literalmente, “falso pie”), extensión de la membrana plasmática por medio de la cual algunas células, como la ameba, se mueven y capturan la presa.

ren-: riñón (raíz); *adrenal*, glándula adherida al riñón en los mamíferos.

retro-: hacia atrás (prefijo); *retrovirus*, virus que usa el RNA como su material genético; este RNA debe copiarse “hacia atrás” del DNA durante la infección de una célula por el virus.

sarco-: músculo (prefijo); *retículo sarcoplásmico*, retículo endoplásmico modificado que almacena calcio y que se encuentra en las células musculares.

semi-: mitad (prefijo); *duplicación semiconservadora*, mecanismo de duplicación del DNA, por el cual una cadena de la doble hélice del DNA original se llega a incorporar en la nueva doble hélice del DNA.

-soma-, **somato-**: cuerpo (prefijo o sufijo); *sistema nervioso somático*, parte del sistema nervioso periférico que controla los músculos esqueléticos que mueven al cuerpo.

sub-: abajo, debajo de (prefijo); *subcutáneo*, debajo de la piel.

sim-: igual, el mismo (prefijo); *simpátrico* (literalmente, “el mismo padre”), que se encuentra en la misma región.

testis: testigo (raíz); *testículos*, órgano reproductor masculino (palabra derivada de la costumbre en la antigua Roma de que solamente los hombres podían ser testigos (*testis*) ante la ley; *testimonio* tiene la misma raíz).

termo-: calor (prefijo o raíz); *termorregulación*, proceso por el cual se regula la temperatura corporal.

trans-: a través (prefijo); *transgénico*, que tiene genes de otro organismo (generalmente de otra especie); los genes se movieron “a través” de especies.

tri-: tres (prefijo); *triploide*, que tiene tres copias de cada cromosoma homólogo.

trofo: alimento, nutriente (raíz); *autótrofo*, que se alimenta a sí mismo (por ejemplo, los organismos fotosintéticos).

-tropo: cambio, giro (sufijo); *fototropismo*, proceso por el cual las plantas se orientan hacia la luz.

ultra-: más allá (prefijo); *ultravioleta*, luz con longitudes de onda más allá del violeta.

uni-: uno (prefijo); *unicelular*, organismo compuesto de una sola célula.

vita: vida (raíz); *vitamina*, molécula indispensable en la dieta para preservar la vida.

-voro: comer (raíz, por lo general); *herbívoro*, animal que se alimenta de plantas.

zoo-: animal (raíz, por lo general); *zoología*, el estudio de los animales.