

formas tanto en el espacio como en el tiempo. Las leyes de la gravedad, el comportamiento de la luz y las interacciones de los átomos, por ejemplo, son las mismas en la actualidad que hace mil millones de años y se cumplen tanto en Moscú como en Nueva York, o incluso en Marte. La uniformidad en el espacio y el tiempo resulta especialmente indispensable en biología, ya que muchos sucesos de gran importancia para esta disciplina, como la evolución de la diversidad actual de los seres vivos, ocurrieron antes de que hubiera seres humanos para observarlos. Hay quienes creen que cada uno de los diferentes tipos de organismos fue creado individualmente en algún momento del pasado por intervención directa de Dios; esta filosofía se conoce como *creacionismo*. Los científicos admiten sin reservas que no es posible demostrar que tal idea sea falsa. No obstante, el creacionismo se opone tanto a la causalidad natural como a la uniformidad en el tiempo. El abrumador éxito de la ciencia al explicar los sucesos ambientales por sus causas naturales logró que la mayoría de los científicos rechazaran el creacionismo como explicación de la diversidad de la vida en la Tierra.

La investigación científica se basa en la suposición de que las personas perciben los sucesos naturales de forma similar

Una tercera suposición básica de la ciencia es que, por regla general, todos los seres humanos perciben los sucesos naturales básicamente de la misma forma y que tales percepciones nos brindan información confiable acerca del mundo que nos rodea. Hasta cierto punto, la percepción común es una peculiaridad de la ciencia. Los sistemas de valores, como los que intervienen en la apreciación del arte, la poesía y la música, no suponen una percepción común. Quizá percibamos los colores y las formas de una pintura de manera similar (el aspecto científico del arte); pero no percibiríamos de forma idéntica el valor estético de la pintura (el aspecto humanista del arte; **FIGURA 1-3**). Los valores también difieren entre los individuos, a menudo como resultado de su cultura o de sus creencias religiosas. Como los sistemas de valores son subjetivos, no objetivos ni medibles, la ciencia no puede resolver ciertos tipos de problemas filosóficos o morales, como la moralidad en el caso del aborto.

El método científico es la base de la investigación científica

Considerando tales suposiciones, ¿cómo estudian los biólogos el funcionamiento de la vida? La investigación científica es un método riguroso para efectuar observaciones de fenómenos específicos y buscar el orden subyacente a dichos fenómenos. Por lo general, la biología y las demás ciencias utilizan el **método científico**, el cual consiste en seis operaciones interrelacionadas: *observación, pregunta de investigación, hipótesis, predicción, experimento y conclusión* (**FIGURA 1-4a**). Toda la investigación científica inicia con la **observación** de algún fenómeno específico. La observación, a la vez, lleva a **preguntas** del tipo “¿cómo sucedió esto?”. Luego, por un destello de perspicacia, o más comúnmente después de largo e intenso razonamiento, se formula una **hipótesis**, que es una suposición basada en observaciones previas, que se ofrece como respuesta a la pregunta y como explicación natural del fenómeno observado. Para ser útil, la hipótesis debe conducir a una **predicción**, que por lo general se expresa como un enunciado



FIGURA 1-3 Los sistemas de valores difieren

Aunque por lo general las personas están de acuerdo acerca de los colores y las formas de esta obra de arte, preguntas como “¿qué significa?” o “¿es hermosa?” tendrían diferentes respuestas de observadores distintos.

de la forma “Si... entonces”. La predicción es susceptible de probarse con observaciones cuidadosamente controladas llamadas **experimentos**. Tales experimentos producen resultados que apoyan o refutan la hipótesis, lo cual permite que los científicos obtengan una **conclusión** acerca de la validez de la hipótesis. Un solo experimento nunca es una base suficiente para llegar a una conclusión: los resultados deben ser reproducibles o replicables, no sólo por el investigador original, sino también por otros investigadores.

Los experimentos simples prueban la afirmación de que un solo factor, o **variable**, es la causa de una sola observación. Para tener validez científica, el experimento debe descartar otras posibles variables como la causa de la observación. Por ello, los científicos diseñan **controles** en sus experimentos. En los controles, todas las variables que no se someten a prueba permanecen constantes. Luego, los controles se comparan con la situación experimental, donde sólo cambia la variable que se está probando. En el siglo XVII, Francesco Redi empleó el método científico para probar la hipótesis de que las moscas no surgen de forma espontánea a partir de la carne en descomposición, método que aún se usa en la actualidad, como ilustra el experimento de Malte Andersson, para probar la hipótesis de que las hembras de las aves llamadas viudas del paraíso preferían aparearse con machos de colas largas (véase “Investigación científica: Experimentos controlados, antes y ahora”).

Quizá tú utilizas alguna variación del método científico para resolver problemas cotidianos (**FIGURA 1-4b**). Por ejemplo, cuando se te hace tarde para llegar a una cita importante, subes de prisa al automóvil, giras la llave de encendido y haces la **observación** de que no quiere arrancar. Tú **pregunta** es ¿por qué no quiere arrancar?, la cual de inmediato te conduce a una

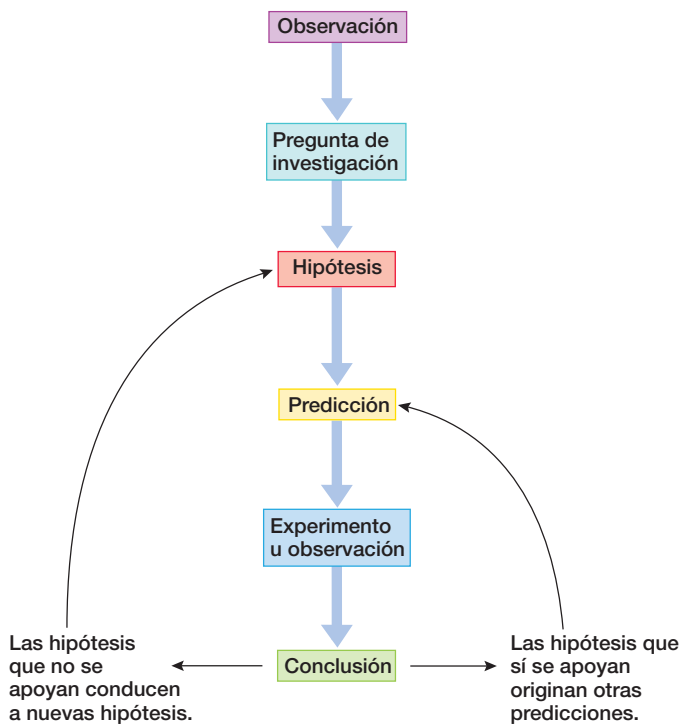


FIGURA 1-4 El método científico

a) El proceso general. b) Un ejemplo de la vida cotidiana.



a una *predicción*: si la batería está descargada, entonces una batería nueva te permitirá encender el motor. Rápidamente, diseñas un *experimento*: reemplazas la batería por la del auto nuevo de tu compañero de habitación e intentas arrancarlo de nuevo. El resultado apoya tu hipótesis, porque el automóvil enciende de inmediato. Pero, ¡un momento! No incluiste controles para algunas variables. Tal vez el cable de la batería estaba flojo y lo único que hacía falta era apretarlo. Al darte cuenta de que necesitas un buen *control*, vuelves a instalar tu vieja batería, asegurándote de que los cables estén bien apretados, y tratas de arrancar el auto otra vez. Si una y otra vez el automóvil se niega a arrancar con la batería vieja y los cables bien apretados, pero arranca de inmediato con la batería nueva de tu compañero, aislaste una sola *variable*, la batería. Así, aunque quizá sea muy tarde para tu cita, seguramente podrás obtener la *conclusión* de que tu batería vieja estaba descargada.

El método científico es poderoso, pero es importante reconocer sus limitaciones. En particular, los científicos pocas veces pueden tener la certeza de que han controlado *todas* las variables, además de la que tratan de estudiar. Por lo tanto, las conclusiones científicas siempre deben permanecer como tentativas y estar sujetas a revisión, si nuevas observaciones o experimentos así lo exigen.

La comunicación es esencial para la ciencia

Un último elemento importante para la ciencia es la *comunicación*. No importa qué tan bien diseñado esté un experimento, resultará infructuoso si no se comunica minuciosamente y exactamente. En la actualidad, el diseño experimental y las conclusiones de Redi sobreviven sólo porque registró cuida-

dosamente sus métodos y observaciones. Si los experimentos no se dieran a conocer a otros científicos con los suficientes detalles como para que puedan repetirse, no sería posible verificar las conclusiones. Sin verificación, los resultados científicos no pueden utilizarse con seguridad como la base de nuevas hipótesis y experimentos adicionales.

Un aspecto fascinante de la investigación científica es que cuando un científico obtiene una conclusión, ésta de inmediato origina más preguntas que conducen a otras hipótesis y a más experimentos (¿por qué se descargó tu batería?). La ciencia es una búsqueda interminable de conocimientos.

La ciencia es un esfuerzo humano

Los científicos son personas comunes. Los impulsan los mismos intereses, ambiciones, logros y temores que a otros individuos, y a veces cometen errores. Como veremos en el capítulo 9, la ambición jugó un papel importante en el descubrimiento de la estructura del DNA realizado por James Watson y Francis Crick. Los accidentes, las conjeturas afortunadas, las controversias con científicos rivales y, desde luego, las facultades intelectuales de algunos investigadores hacen grandes aportaciones a los avances científicos. Para ilustrar lo que podríamos llamar “ciencia verdadera”, consideremos un caso real.

Cuando los microbiólogos estudian bacterias utilizan *cultivos* puros, es decir, recipientes con bacterias que no estén contaminados por otras bacterias o mohos. Sólo si estudian el único tipo a la vez podrán conocer las propiedades de esa bacteria específica. Así, al primer indicio de contaminación, normalmente se desechan los cultivos, casi siempre farfullando por la técnica descuidada. Sin embargo, en una de esas ocasiones, a finales de la década de 1920, el bacteriólogo escocés

Un experimento clásico realizado por el médico italiano Francesco Redi (1621-1697) demuestra bellamente el método científico y ayuda a ilustrar el principio de causalidad natural y también constituye la base de la ciencia moderna. Redi investigó por qué los gusanos (que son las larvas de las moscas) aparecen en la carne en descomposición. En la época de Redi, el hecho de que se formaran gusanos en la carne se consideraba prueba de la *generación espontánea*, es decir, la producción de seres vivos a partir de la materia inerte.

Redi *observó* que las moscas pululaban cerca de la carne fresca y que los gusanos aparecían en la carne que se dejaba a la intemperie unos cuantos días. Formuló una *hipótesis* demostrable: Las moscas producen los gusanos. En su *experimento*, Redi intentó probar sólo una variable: el acceso de las moscas a la carne. Así que *tomó* dos frascos transparentes y colocó dentro de ellos trozos de carne semejantes. Dejó un frasco abierto (el frasco de *control*) y cubrió el otro con una gasa para mantener afuera a las moscas (el frasco *experimental*). Se esforzó lo mejor que pudo para mantener constantes las demás variables (por ejemplo, el tipo de frasco, el tipo de carne y la temperatura). Después de unos cuantos días, *observó* gusanos en el frasco que estaba abierto; pero no notó ninguno en la carne del frasco cubierto. Redi *concluyó* que su hipótesis era correcta y que los gusanos eran producidos por las moscas, no por la carne (**FIGURA E1-1**). Sólo mediante experimentos controlados fue posible descartar la duradera hipótesis de la *generación espontánea*.

En la actualidad, más de 300 años después del experimento de Redi, los científicos emplean el mismo enfoque para diseñar sus experimentos. Piensa en el experimento que diseñó Malte Andersson para investigar las colas largas de las aves llamadas viudas del paraíso. Andersson *observó* que las viudas del paraíso machos, y no las hembras, tenían colas extravagantemente largas, las cuales despliegan mientras vuelan por las praderas africanas (**FIGURA E1-2**). Esta observación llevó a Anders-

son a plantear la *pregunta de investigación*: ¿Por qué sólo los machos tienen colas tan largas? Su *hipótesis* fue que los machos tienen colas largas porque las hembras prefieren aparearse con machos de colas largas, los cuales, desde luego, tienen mayor descendencia que los machos de cola más corta. Con base en esa hipótesis, Andersson *predijo* que si su hipótesis era verdadera, entonces más hembras construirían nidos en los territorios de los machos con colas artificialmente alargadas, que las que construirían los nidos en los territorios de los machos con la cola artificialmente recortada. Después, atrapó algunos machos y les recortó sus colas hasta aproximadamente la mitad de su longitud original y luego los soltó (grupo *experimental* 1). Otro grupo de machos tenían pegadas las plumas de las colas que se quitaron a los machos del primer grupo (grupo *experimental* 2). Por último, Andersson tuvo dos grupos de *control*: a uno se le cortó la cola y luego se le volvió a poner (para contro-

Observación: Las moscas pululan alrededor de la carne que se deja descubierta; los gusanos aparecen en la carne.

Pregunta de investigación: ¿De dónde provienen los gusanos en la carne?

Hipótesis: Las moscas engendran los gusanos.

Predicción: Si la hipótesis es correcta, ENTONCES mantener a las moscas alejadas de la carne evitará que aparezcan los gusanos.

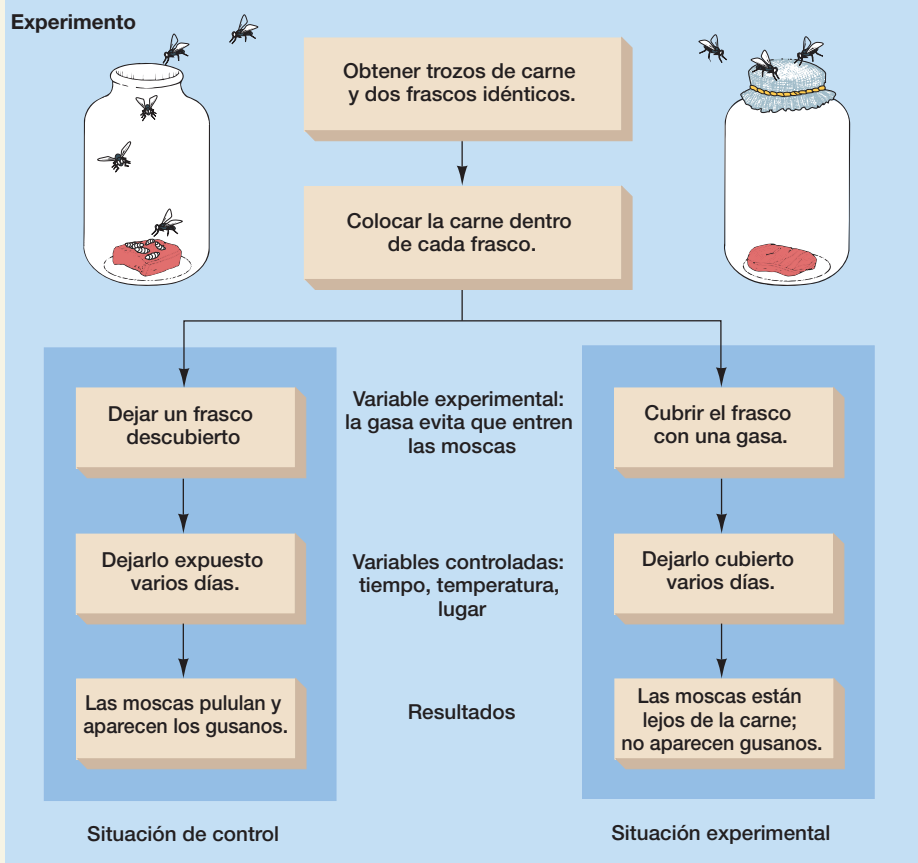


FIGURA E1-1 Los experimentos de Francesco Redi

PREGUNTA: El experimento de Redi descartó la *generación espontánea*; pero, ¿demuestra de manera concluyente que las moscas producen los gusanos? ¿Qué clase de experimento de seguimiento sería necesario para determinar mejor el origen de los gusanos?

Conclusión: El experimento apoya la hipótesis de que las moscas son la causa de los gusanos y que los gusanos no surgen por *generación espontánea*.

lar el efecto de atrapar a las aves y manipular sus plumas); en el otro, los animales fueron simplemente atrapados y liberados. El investigador hizo lo posible para asegurarse de que la longitud de las colas fuera la única variable modificada. Después de unos cuantos días, Andersson contó el número de nidos que las hembras habían construido en cada uno de los territorios de los machos. Encontró que los machos con colas alargadas tenían más nidos en sus territorios, los machos con colas recortadas tenían menos y los machos de control (con las colas de tamaño normal) tenían un número intermedio de nidos (FIGURA E1-3). Andersson *concluyó* que su hipótesis era correcta y que las viudas del paraíso preferían aparearse con machos de cola larga.



FIGURA E1-2 Viuda del paraíso macho

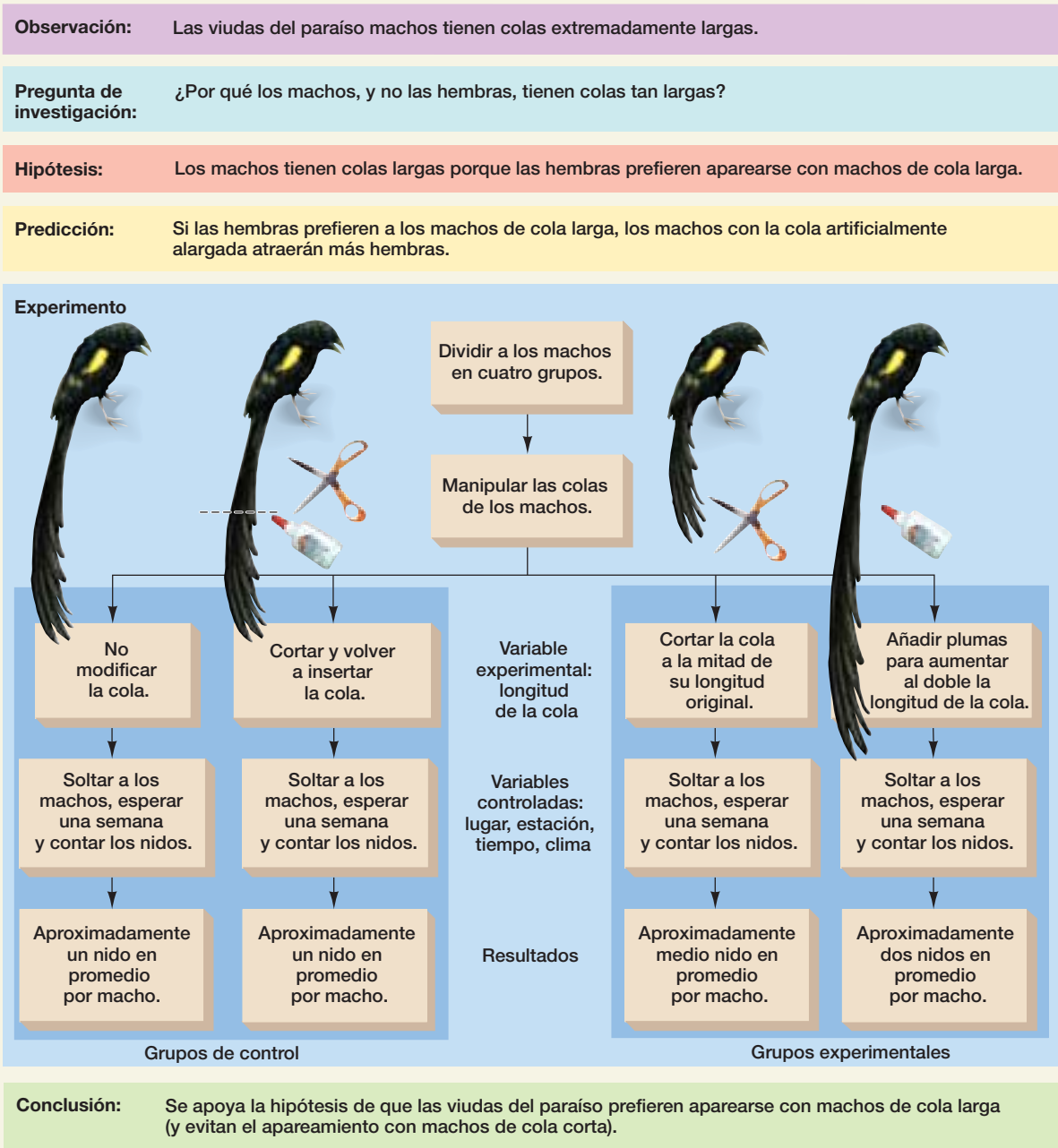


FIGURA E1-3 Los experimentos de Malte Andersson

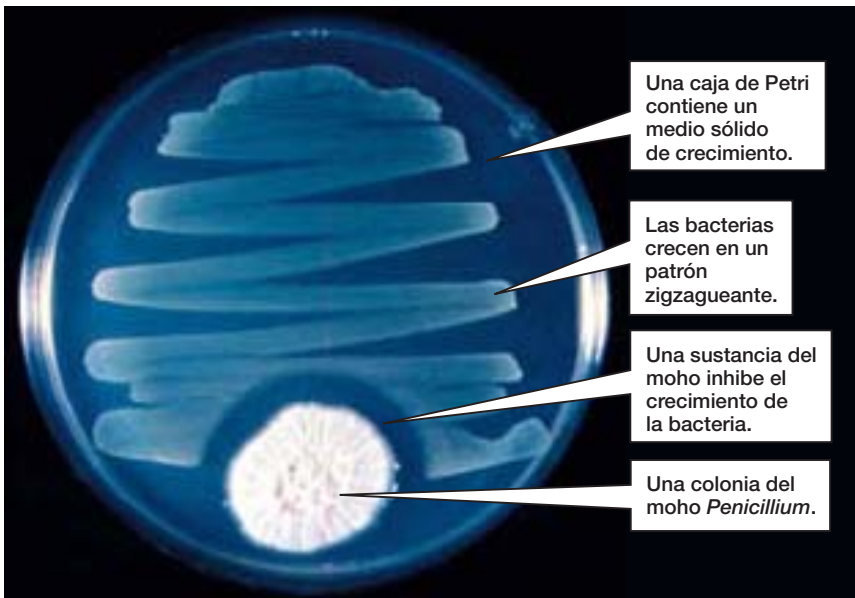


FIGURA 1-5 La penicilina mata bacterias

Una colonia blanca difusa del moho *Penicillium* inhibe el crecimiento de la colonia de la bacteria causante de la enfermedad *Staphylococcus aureus*, que se untó en forma de zigzag en este recipiente con un medio de crecimiento gelatinoso. Tanto el molde como las bacterias son visibles sólo cuando crecen a altas densidades, como en las colonias que se observan aquí. **PREGUNTA:** ¿Por qué algunos mohos producen sustancias que son tóxicas para las bacterias?

Alexander Fleming convirtió un cultivo contaminado en uno de los más grandes avances médicos de la historia.

Uno de los cultivos bacterianos de Fleming se contaminó con una mancha de un moho llamado *Penicillium*. Antes de tirar el recipiente del cultivo, Fleming observó que cerca del moho no crecían bacterias (FIGURA 1-5). ¿Por qué no? Fleming estableció la hipótesis de que el *Penicillium* libera una sustancia que acaba con las bacterias que crecen cerca de él. Para probar tal hipótesis, Fleming cultivó algo de *Penicillium* puro en un caldo nutritivo líquido. Luego quitó el moho *Penicillium* filtrando el caldo y aplicó el líquido donde se había reproducido el moho a un cultivo bacteriano no contaminado. En efecto, algo en el líquido mataba las bacterias. Investigaciones posteriores de tales extractos de mohos llevaron a la producción del primer *antibiótico*: la penicilina, que es una sustancia que acaba con las bacterias y que, desde entonces, ha salvado millones de vidas. Los experimentos de Fleming son un ejemplo clásico del uso de la metodología científica. Partieron de una observación que originó una hipótesis, seguida de pruebas experimentales de la hipótesis que, a final de cuentas, llevaron a una conclusión. No obstante, el método científico por sí solo habría sido inútil sin la afortunada combinación de un accidente y una mente científica brillante. Si Fleming hubiera sido un microbiólogo “perfecto”, no habría tenido cultivos contaminados. Si hubiera sido menos observador, la contaminación sólo habría sido otro recipiente de cultivo echado a perder. En cambio, fue el principio de la terapia con antibióticos para combatir enfermedades bacterianas. Como señaló el microbiólogo francés Louis Pasteur: “La casualidad favorece a las mentes preparadas”.

Las teorías científicas se han probado una y otra vez

Los científicos dan a la palabra *teoría*

científica es mucho más general y confiable que una hipótesis. Lejos de ser una conjetura informada, una teoría científica es una explicación general de fenómenos naturales importantes, desarrollada a través de observaciones extensas y reproducibles. Es más parecida a un *principio* o una *ley natural*. Por ejemplo, teorías científicas como la teoría atómica (de que toda la materia se compone de átomos) y la teoría de la gravitación (de que los objetos se atraen mutuamente) son fundamentales para la ciencia de la física. Asimismo, la *teoría celular* (de que todos los seres vivos se componen de células) y la *teoría de la evolución* son fundamentales para el estudio de la biología. Los científicos describen los principios fundamentales como “teorías” en vez de como “hechos”, porque una premisa básica de la investigación científica es que se debe realizar con la mente abierta. Si surgen evidencias convincentes, la teoría se modificará.

Un ejemplo moderno de la necesidad de tener la mente abierta ante el hallazgo de nuevas pruebas científicas es el descubrimiento de los *priones*, que son proteínas infecciosas (véase el estudio de caso del capítulo 3). Antes de la década de 1980, todos los agentes de las enfermedades infecciosas conocidas poseían material genético —ya fuera DNA o la molécula relacionada, RNA. Cuando el neurólogo Stanley Prusiner, de la Universidad de California en San Francisco, publicó evidencia en 1982 de que el scrapie o tembladera (una enfermedad infecciosa que provoca la degeneración del cerebro en los bovinos) en realidad es originada y transmitida por una proteína sin material genético, sus hallazgos fueron recibidos con mucha incredulidad. Se descubrió que los priones son los causantes de “la enfermedad de las vacas locas”, que mató no sólo a ganado, sino a más de 150 personas que consumieron carne de reses infectadas. Antes del descubrimiento de los priones, el concepto de una proteína infecciosa era desconocido para la ciencia. Sin embargo, al tener la voluntad de modificar las creencias arraigadas para aplicar nueva información, los científicos conservan la integridad del proceso científico, mientras aumentan su conocimiento de las enfermedades. Gracias a su investigación pionera, Stanley Prusiner fue galardonado con el Premio Nobel de Medicina en 1997.

La ciencia se basa en el razonamiento

Las teorías científicas nacen del **razonamiento inductivo**

teoría de que la Tierra ejerce fuerzas gravitacionales sobre los objetos nace de observaciones repetidas de los cuerpos que caen hacia la Tierra y de la total carencia de observaciones de objetos que “caigan hacia arriba”. Asimismo, la teoría celular surge de la observación de que todos los organismos que tienen los atributos de la vida se componen de una o más células, y de que nada que no esté formado por células posee todos esos atributos.

Una vez que se formula una teoría científica, puede servir para apoyar el razonamiento deductivo. En las ciencias, el **razonamiento deductivo** es el proceso de generar hipótesis acerca del resultado de un experimento o una observación específicos, con base en una generalización bien sustentada, como una teoría científica. Según la teoría celular, por ejemplo, si se halla un organismo nuevo que presente todos los atributos de la vida, los científicos pueden conjeturar o deducir con certeza que estará compuesto por células. Desde luego, hay que someter al nuevo organismo a un examen microscópico cuidadoso para detectar su estructura celular: si aparecen pruebas convincentes, una teoría puede modificarse.

Las teorías científicas se establecen de manera que potencialmente puedan refutarse

Una diferencia fundamental entre una teoría científica y una creencia basada en la fe es que la primera puede *refutarse*, mientras que la segunda no puede hacerlo. El potencial que debe refutarse es por qué los científicos continúan refiriéndose a los preceptos básicos de la ciencia como “teorías”. Por ejemplo, veamos la existencia de los elfos. El enfoque científico en cuanto a los elfos es que no hay pruebas sólidas que demuestren su existencia y que, por lo tanto, no existen. La gente que tiene fe en la existencia de los elfos podría describirlos como seres tan discretos que es imposible atraparlos, observarlos o incluso detectarlos. En cambio, tales personas dirían que los elfos se manifiestan sólo ante quienes creen en ellos. La teoría científica de que los elfos no existen fácilmente podría refutarse si alguien atrapara a uno u ofreciera alguna otra evidencia comprobable y objetiva de su existencia. En contraste, las afirmaciones basadas en la fe de que los elfos existen, así como otras suposiciones fundamentadas en la creación divina, se establecen de manera que nunca puedan refutarse. Por tal razón, los artículos de fe están más allá del alcance de la ciencia.

1.2 EVOLUCIÓN: LA TEORÍA UNIFICADORA DE LA BIOLOGÍA

Entre las diferentes formas de vida. Desde que, a mediados del siglo XIX, dos naturalistas ingleses, Charles Darwin y Alfred Russel Wallace, formularon la teoría de la evolución, ésta ha sido apoyada por el hallazgo de fósiles, los estudios geológicos, el fechado radiactivo de rocas, la genética, la biología molecular, la bioquímica y los experimentos de crianza animal. Quienes consideran la evolución como “una mera teoría” tienen una idea totalmente equivocada de lo que significa *teoría* para los científicos.

Tres procesos naturales sustentan la evolución

La teoría científica de la **evolución** afirma que los organismos modernos descendieron, con ciertas modificaciones, de formas de vida preexistentes. La fuerza más importante en la evolución es la **selección natural**, es decir, el proceso mediante el cual organismos con características específicas que les ayudan a enfrentar los rigores de su ambiente sobreviven y se reproducen con mayor éxito que otros que no tienen esas características. Los cambios que ocurren durante la evolución son resultado de la selección natural que actúa sobre las variaciones heredadas que suceden entre los individuos de una población, lo cual origina cambios en la población de una generación a otra. La variación sobre la cual actúa la selección natural es un resultado de pequeñas diferencias en la composición genética de los individuos dentro de la población.

La evolución es consecuencia de tres procesos naturales: *variación genética* entre miembros de una población debida a diferencias en su DNA, *herencia* de esas modificaciones a la descendencia de individuos que son portadores de la variación y *selección natural*, es decir, la reproducción favorecida de organismos con variaciones que les ayudan a enfrentar su ambiente.

La variabilidad genética entre los organismos se hereda

Examina a tus compañeros de clase y observa qué tan diferentes son, o ve a una clínica veterinaria y fíjate en las diferencias entre los perros en cuanto a tamaño, forma y color del pelo. Aunque parte de esta variación (en especial entre tus compañeros de clase) se debe a diferencias en el ambiente y el estilo de vida, la influencia principal son los genes. Casi todos nosotros, por ejemplo, seríamos capaces de levantar pesas durante el resto de nuestra vida y nunca desarrollaríamos una musculatura como la de “Mister Universo”.

Pero, ¿qué son los genes? La información hereditaria de todas las formas de vida conocidas está contenida dentro de un tipo de molécula llamada **ácido desoxirribonucleico** o **DNA** (FIGURA 1-6). El DNA de un organismo está contenido en los **cromosomas** de cada célula y es el proyecto genético o el manual de instrucciones molecular de la célula, es decir, es la guía para la construcción y el funcionamiento de su cuerpo. Los genes son segmentos de la molécula de DNA. Cada uno de los genes dirige la formación de uno de los componentes moleculares fundamentales del cuerpo del organismo. Cuando se reproduce un organismo, pasa una copia de sus cromosomas con DNA a su progeñe.

La exactitud del proceso de copiado del DNA es asombrosamente alta: en los seres humanos ocurren sólo 25 errores, llamados **mutaciones**, por cada mil millones de bits de la información que se copia.

Las mutaciones también ocurren por daños al DNA causados, por ejemplo, por exposición a la luz ultravioleta, a partícu-