

# La ciencia de la evolución

Enviado por Jesús López Gil en respuesta a El engaño del Evolucionismo por Don Harun Yahya, publicado en Webislam (Numero 198 del 3 de Enero)

20/01/2003 - Autor: Jesús López Gil - Fuente: Webislam

La teoría de la evolución se ocupa de tres materias diferentes. La primera es el hecho de la evolución, es decir, que las especies vivientes cambian a través del tiempo y están emparentadas entre sí debido a que descienden de antepasados comunes. La segunda materia es la historia de la evolución, es decir, las relaciones particulares de parentesco entre unos organismos y otros y cuándo se separaron unos de otros los linajes que llevan a las especies vivientes. La tercera materia se refiere a las causas de la evolución de los organismos.

El origen evolutivo de los organismos es hoy una conclusión científica establecida con un grado de certeza comparable a otros conceptos científicos ciertos, como la redondez de la tierra, la composición molecular de la materia o el movimiento de los planetas. Este grado de certeza que va más allá de toda duda razonable, es lo que señalan los biólogos cuando afirman que la evolución es un hecho.

La investigación histórica de la evolución incluye desentrañar la sucesión histórica de los organismos, precisar los ritmos de la evolución, la multiplicación y la extinción de especies, la colonización de islas y continentes, y otras muchas cuestiones.

En cuanto a los mecanismos o causas de la evolución, Darwin ya apuntó el de la selección natural, y hoy se conocen algunos más, que se verán más adelante.

La historia de la teoría de la evolución no es una simple enumeración de explicaciones científicas. Existe en primer lugar una lucha entre dos concepciones del mundo. Para algunos, admitir la transformación de las especies significaba la destrucción de todas sus creencias. Los partidarios de la lectura de la Biblia al pie de la letra se empeñan, aún hoy en día, en negar la evolución, y tienen todavía cierto poder para imponer sus ideas en ciertos países. En los EEUU, por ejemplo, la batalla contra la evolución cobró grandes proporciones en los años veinte (el llamado "*juicio del mono*"). En 1924, la cámara de representantes de Tennessee aprobaba, por unanimidad, una ley que proclama: "*En la Universidad o escuela normal o cualquier escuela pública financiada entera o parcialmente con fondos del Estado, queda prohibido enseñar una teoría que niegue la historia de la creación divina del hombre, tal como la enseña la Biblia, y propagar en su lugar que el hombre desciende de un orden inferior de animales*".

Actualmente, en Arkansas; Florida y Texas la doctrina creacionista ha sido incluida en los programas escolares. En California no se puede enseñar la teoría de la evolución a título de teoría científica, sino como mera teoría no probada. Ronald Reagan, en 1980, durante su campaña presidencial, decía: si se enseña evolución en las escuelas públicas, entonces habrá que enseñar también la historia bíblica de la creación.

Precursos del evolucionismo: siglos XVIII y XIX.

Hasta llegar a una teoría de la evolución de las especies perfectamente sistematizada, como lo haría Charles Darwin, hubieron de superar ciertos problemas. A saber:

1. El primer problema consistió en la edad de la Tierra, La evolución necesita tiempo, y este era más bien escaso: menos de 6.000 años.
2. El segundo problema era la imposibilidad de cambio de las formas vivas debido a que Dios las había creado tal y como eran.
3. El tercer problema eran las discrepancias surgidas entre lo que la Biblia decía y las observaciones científicas. Quién discutiera la Biblia se hallaba expuesto a un grave riesgo social.
4. El cuarto problema se solventó fácilmente, ya que consistía en catalogar y clasificar las diferentes especies existentes.

Probablemente, los personajes que más contribuyeron a solventar estos problemas son los que veremos a continuación: Linneo, Bufón, Hutton, Lamarck, Malthus y Cuvier.

Carlos Linneo (1707-1778). En 1686, J. Ray define el concepto de especie con precisión. Busca los caracteres específicos, e.d., los que son más constantes. Según él el criterio más fiable de identidad específica es la filiación: nunca una especie nace de la simiente de otra y viceversa. Ray llegó a escribir, a pesar de ser un seguidor de la Biblia, lo que sigue: *"sea cual fuere la antigüedad de la Tierra y de los cuerpos que hay en ella, la stirpe humana es reciente"*.

Esta proposición será retomada y transformada en dogma por un botánico sueco llamado Linneo. Para llevar a cabo su empresa, primero contruye una clasificación de los vegetales basada en los órganos sexuales. Luego crea el llamado sistema binomial de nomenclatura, en 1753, utilizado actualmente, para nombrar las diferentes especies. De los dos nombres, el primero constituye el género al que la especie pertenece, un grupo amplio en el que hay otras especies parecidas a ella, y el segundo nombre especifica la especie concreta de que se trata.

Linneo apareció en el escenario científico de esta manera cuando sólo contaba 28 años, con la publicación de su *Sistema Naturae*. La primera edición tuvo 142 páginas, y la décimosexta, 2.300 distribuidas en tres volúmenes porque Linneo recibía materiales de todo el mundo.

Contrariamente a las intenciones de su autor, el sistema linneano contiene los términos del transformismo. Obliga a los clasificadores a prestar atención a las similitudes y diferencias

con otras especies cuando quieren denominar una nueva. Linneo comenzó su carrera firmemente convencido del fijismo, pero al avanzar su trabajo y viendo las variaciones de las especies, sus dudas se acrecentaron. De hecho en las posteriores ediciones de su libro omitió las declaraciones sobre el fijismo. Linneo se debió preguntar cuál era el origen de estas similitudes, y si estas denotaban un origen común de las especies, pero no quiso o no supo extraer ninguna conclusión al respecto, y será recordado como el primer gran clasificador serio de los seres vivos.

Georges-Louis Leclerc , conde de Buffon (1707-1788). La ambición de Linneo, siendo grande, no tuvo comparación con la de Buffon. Se dedicó a escribir el mundo entero, sus orígenes y cuanto encerraba, y acabó componiendo una enciclopedia sobre la naturaleza, en cuarenta y cuatro tomos, la *Histoire Naturelle, Générale et Particulière*, traducida a otros idiomas tan pronto como aparecían. Fue la obra científica más importante y de más influyente de su siglo, y la más popular, ya que combinó descripciones redactadas con elegancia con historias sobre la vida de una cantidad apabullante de animales y plantas, además de introducir discursos sobre astronomía, edad de la tierra y procesos vitales.

Buffon, desde luego, hace suyas algunas frases sobre el poder de Dios, pero para él la naturaleza es activa, capaz de construir, de deducir, de encadenar los procesos. Llegó a escribir: toda familia, así animal como vegetal, tiene idéntico origen, e incluso todos los animales proceden de uno solo, que, en la sucesión de las eras (...) ha producido todas las razas de los que ahora existen.

Buffon observó, como la hará Malthus, que las especies se multiplican más rápidamente que los alimentos, lo que implica una lucha por la supervivencia. Y también que había diferencias entre los individuos de la misma especie. Darwin amalgamaría algo con estos datos, peor Buffon nunca lo hizo.

Calculó que la Tierra, caliente en un principio, se había enfriado lo suficiente como para acoger la vida hace unos 70.000 años; después propuso otros tantos años al cabo de los cuales la Tierra estaría tan gélida que la vida desaparecería. Las hipótesis sobre los cambios de temperatura le llevaron a proponer una solución al enigma de los fósiles: eran tipos extintos por el enfriamiento de la Tierra.

Sin embargo, su clasificación de los animales fue ridícula: lo hizo en atención a su utilidad a los hombres. Esto refleja el ambiente antropo-centrista de la época.

Buffon creía que el mundo era viejo y que las especies cambiaban; por eso fue acusado y se retractó de todo lo dicho, renunciando a todo lo que atañía a la formación de la Tierra y a todo lo que chocara con la narración de Moisés. Sin embargo, lo fundamental en sus tesis está ya flotando en los ambientes ilustrados de la época: la idea de una continuidad de la Naturaleza.

James Hutton (1728-1799). Fue el primer geólogo sistemático del mundo, y proporcionó a la ciencia un esquema, el primero, que aclaraba todos los fenómenos terrestres y sus procesos. Sustituyó las ideas catastrofistas por el principio del uniformitarismo, que viene a decir que lo que ocurre actualmente en la Tierra no difiere de lo que siempre ha ocurrido. Los procesos

son los mismos y muy lentos.

En líneas generales, según él, todo tiende al aplanamiento, al desgaste. Por tanto ha de existir una fuerza que contrarreste esto, un alzamiento que equilibre el desplome; Hutton la localizó en el calor del interior de la Tierra, en la hinchazones y enarcamientos de su corteza, consecuencia de ese calor, y en la fuerza de los volcanes.

Distinguió dos tipos de rocas: las sedimentarias o formadas hacia abajo y las metamórficas o formadas hacia arriba.

De esta manera, la visión de Hutton precisaba de una cantidad de tiempo sin confines, por lo que sus ideas no hicieron mella alguna en el catastrofismo. Sin embargo, Charles Lyell recogió su idea del uniformitarismo, y sus libros acompañaron a Darwin en el Beagle. Sin ellos la teoría de la evolución se habría esquivado, ya que Darwin necesitaba tiempo y Hutton se lo proporcionaba.

Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829). La teoría de la evolución más estructurada de la época la elaboró este colaborador de Buffon y también profesor del Museo de Historia Natural. En el año 1800 pronuncia una conferencia inaugural en la que expone una teoría coherente sobre la transformación. Admite la existencia de una evolución de las especies y trata de darle una explicación racional. La idea central es que dicha evolución es obra de la naturaleza, que se vale de infinitos recursos para producir especies; entre ellos dos son los más importantes: el tiempo y las condiciones favorables.

Los efectos de estos factores determinan la transformación progresiva de las facultades de los organismos, que se fortalecen poco a poco, se diversifican y dan lugar a cambios que se transmiten a la descendencia.

Según Lamarck, existe en la naturaleza una gradación sutil, que va de los animales más simples a los mamíferos y al ser humano. Sin embargo, dentro de cada grupo, las especies no siguen esta gradación, sino que se diversifican porque las influencias del medio provocan otras transformaciones. Así, la gradación queda alterada por las actividades de los organismos en el momento de su propia transformación y por la herencia de estas transformaciones.

De este modo, Lamarck sitúa la evolución al margen del creacionismo y al nivel del propio individuo. Dios va a pasar a ser, según él, el creador de la naturaleza, la cual producirá los seres vivos.

Al aceptar la noción de Buffon de la gran edad del mundo, dedujo que las condiciones que la superficie terrestre debían haber sufridos grandes cambios, de modo que los seres vivos hubieron de adaptarse a ellas. En su opinión, lo hicieron aprendiendo y luchando, tratando siempre de adaptarse, y, mientras tanto, alterando su forma y su comportamiento. El clásico ejemplo aducido para ilustrar la idea de Lamarck es el del alargamiento del cuello de la jirafa: por estirar una y otra vez el cuello para llegar mejor al alimento, consigue tener vértebras más largas.

Todos los cambios útiles que la jirafa conquistó durante su vida, aparecieron en su

descendencia, volviendo a ocurrir con esta la propio. Actualmente, esto se conoce con el nombre de teoría de los caracteres adquiridos. Del mismo modo, la desaparición de órganos se justificaba con el fracaso de usarlos, como el pez ciego que habita en cavernas tenebrosas.

La diferencia de estas ideas con las de Darwin es más sutil de lo que se cree habitualmente. Darwin también hablaba de la influencia del uso y desuso de los órganos como base de la variación, pero Lamarck creía en una fuerza interior al individuo que provocaba todos estos cambios.

Lamarck, al contrario de lo que se cree, es prudente y trata de evitar todo conflicto frontal con la iglesia; pero en esas proposiciones formuladas de forma hipotética utiliza para la aparición del ser humano los mismos argumentos que para la aparición de las especies, y define las etapas necesarias para su aparición:

*... si una raza cualquiera de cuadrúmanos, en particular la más perfeccionada de todas, perdiera por la fuerza de las circunstancias, o por cualquier otra causa, el hábito de trepar a los árboles y de agarrar las ramas con los pies, como si fueran manos, para aferrarse, y si los individuos de esta raza, durante una serie de generaciones, se vieran obligados a servirse de los pies para caminar y dejaran de emplear las manos al igual que los pies, no cabe duda que (...) esos cuadrúmanos se transformarán, a la postre, en bímanos y que el pulgar de sus pies dejará de estar separado del resto de los dedos, con lo que dichos pies sólo servirán para caminar.*

(Curiosamente, los experimentos para probar la "herencia de los caracteres adquiridos" tuvieron un auge tardío en la década de los 50 del siglo XX, después de que Lysenko emprendiera en 1948 una extensa campaña contra el "reaccionario mendelismo-morganismo" de los países capitalistas. Se le ocurrió plantar grandes extensiones de cereales en las gélidas estepas rusas y siberianas haría que las plantas adquirieran resistencia al frío para, así, incrementar la extensión de tierras dedicadas al cultivo de cereales y acabar con el problema de la alimentación. Huelga decir lo que ocurrió: la ruina de este proyecto, el atraso en ciencia genética de la Unión Soviética en varias décadas respecto al resto de los países y, como no, el olvido de Lysenko.)

Continuando con lo que nos ocupa, los ataques de Cuvier terminaron por convencer a sus coetáneos de la incapacidad de Lamarck como científico: seguía convencido de que la materia estaba formada por los cuatro elementos aristotélicos y se oponía a las nuevas teorías sobre los elementos químicos de Lavoisier. Cuvier llegó a decir: "*La teoría de la evolución del señor Lamarck pasará a la historia como modelo de desatino*".

A finales del siglo XIX, cierto número de científicos lo redescubrieron y se valdrán de él para contrarrestar el darwinismo.

Uno de los colegas de Lamarck, Geoffroy Saint-Hilaire, superior jerárquico de Cuvier, del que hablaremos más adelante, nombrado profesor de zoología en París en 1794, formula también ideas transformistas. Para él existe un único animal, modificado por simples cambios en la proporción de sus partes. Por tanto, no existen órganos nuevos cada vez que un anatomista descubre una estructura aparentemente particular: toda estructura es el

resultado de la transformación de una estructura fundamental, común a todos los animales.

Por estos trabajos, Saint-Hilaire es el fundador de la anatomía comparada; a partir de él, la anatomía ya no será una mera descripción, sino que permite la comparación de las diferentes morfologías.

Aunque la teoría lamarckiana no resistió el avance de nuevos conocimientos, contribuyó de manera importante a la gradual aceptación de la evolución biológica.

Georges Cuvier (1769-1832). Trabajó en el Museo de Historia Natural de París, y también puso las bases de la anatomía comparada (en algún texto se dice que fue él quien la fundó). Sus estudios en este terreno le llevaron a decir que la fijación de las especies era lo más sensato, en contraposición de los que su superior, Saint-Hilaire, pensaba. Esto situó a Cuvier frente a Lamarck.

Por otra parte, Cuvier llegó a ser muy hábil en la interpretación de los cada vez más abundantes fósiles. Era capaz de reconstruir un animal partiendo de un puñado de huesos, y con ello fundó una nueva ciencia, la paleontología.

Asombra que Cuvier, con las herramientas de la anatomía comparada y la paleontología, no reparase en las pruebas evolutivas que se le aparecían. También sorprende que no reparase en que cuanto más edad tenía un fósil menos se parecía a las formas vivas. Ignoró todo lo que esto significaba y dedicó sus esfuerzos a vapulear a Lamarck y su inadmisibles idea de que las especies cambiaban.

Lamarck respondía a Cuvier. Este último recurría al catastrofismo continuamente y a diluvios imaginarios para explicar la desaparición de tantas especies, y una vez Lamarck escribió lo siguiente: *"una catástrofe que nada regula, que mezcla y disemina, es medio muy oportuno para resolver los problemas de los naturalistas ansiosos de explicar todo, pero que no se molestan en observar e investigar lo que pasa de veras en la naturaleza"*. Esto molestó tanto a Cuvier, que incluso en el elogio fúnebre de Lamarck, que iba a ser leído por él, le atacaba y excluía de la comunidad científica. La Academia de Ciencias francesa se negó, afortunadamente, a imprimirlo tal y como era en el original.

Cuesta creer que un científico tan inteligente y experto como Cuvier no se hubiese dado cuenta de todos los datos que tenía en su mano. Puede ser que comenzase a barruntar la incorrección del catastrofismo, pero la testarudez no es ajena a los científicos, que también son personas. Un individuo queda preso en la red de un conjunto de ideas, y se labra carrera y reputación con ellas.

Lamarck tubo más suerte. Para él se fueron acumulando pruebas de que las especies no eran fijas (pruebas acumuladas por agricultores y ganaderos), y su idea perduró hasta que apareció una mejor.

Por la misma época, en Inglaterra, Richard Owen trabaja también en paleontología y formula una idea básica para la teoría de la evolución: un mismo órgano puede desempeñar funciones diferentes en las distintas especies, y una misma función puede ser cumplida por diferentes órganos en diferentes especies.

La primera proposición es lo que se conoce como homologías. Por ejemplo, el brazo y la mano humanos, la pata de un caballo, el ala de un ave y la aleta de una ballena son homólogos; cumplen una función diferente, pero tienen la misma estructura y tienen un mismo origen embriológico. En cambio las branquias de un pez y los pulmones de un mamífero son análogos: cumplen la misma función, pero tienen diferentes estructura y origen embriológico. Sin embargo, Owen será creacionista convencido y atacará ferozmente a Darwin, e, irónicamente, hoy día se utilizan sus argumentos para enseñar y explicar la evolución en las escuelas.

Thomas Malthus (1766-1834). Fue lo que hoy llamaríamos un científico social. Se preocupaba de los oprimidos y desvalidos, pero no por intereses parroquiales: a él le interesaba llegar a la fuente de los trastornos.

Publicó su *Essay on the principles of population*, en el que concluía que la población tiende a crecer en proporción geométrica, y el sustento se acrecienta en proporción aritmética, lo que significaba que habría lucha continua de los seres por la comida existente; sólo los más fuertes sobrevivirían en la contienda.

Lo que procedió a Malthus fue la noción de lucha: la supervivencia de los más aptos. El concepto causó honda impresión por evidente y por conveniencia a las clases elevadas de Europa. Por entonces, se dedicaba energía a edificar un imperio mundial e expensas de las razas menores, de cultura inferior y de inferior color de tez. Para las clases altas británicas Malthus tenía razón a todas luces: sus miembros eran los supervivientes y, por tanto, los más aptos. Se trata de un círculo vicioso sin prueba alguna, pero que fue aprovechado por seguidores de Darwin en beneficio propio como una perversión de su teoría que se llamó darwinismo social.

La teoría de la evolución: Darwin y el transformismo inglés

La publicación de las teorías de Darwin se vio acelerada por una circunstancia extraordinaria que le decidió a exponerse precozmente a los ataques de los creacionistas. Había comentado sus ideas con algunos amigos (Hooker, Lyell), pero no había pasado de ahí hasta el día en que recibió una carta procedente del archipiélago malayo, en la que un tal Sir Alfred Wallace resumía, en veinte páginas, una teoría similar a la que el mismo tenía en curso de elaboración. Después de algunos titubeos, sus trabajos y los de Wallace fueron presentados ante la Sociedad Linneana de Londres en 1858. Un año después publica *El Origen de las Especies*.

Es interesante señalar que, además de Wallace, otros antes de Darwin han presentado ideas semejantes.

Así, en 1813, tres médicos británicos desarrollan una teoría de la evolución basada en la

selección natural, en la que rechazan la idea de la herencia de los caracteres adquiridos. Dos de estos médicos, Prichard y Wells, no son muy conocidos en su época. El tercero, en cambio, provoca un auténtico escándalo en la Inglaterra puritana: en *Lectures of Physiology and Zoology and Natural History of Man*, Lawrence afirma que todas las razas humanas provienen de mutaciones del mismo tipo que las que se dan en las camadas de conejos. La cría puede mejorar o arruinar la raza. Según él, las familias reales son un buen ejemplo.

En 1831, el botánico escocés Patrick Matthew publica ideas aún más próximas a las que publicará Darwin, y este último admite haber conocido el libro tras la publicación de *El Origen...*

Sea como fuere, esto patentiza que las ideas de Darwin no eran tan originales como habitualmente se piensa.

### El viaje del "Beagle"

¿Cuál será la fuente de inspiración de Darwin? A buen seguro que el viaje en el H.M.S. Beagle significó mucho para él. Zarpó de Gran Bretaña en diciembre de 1831. Se había previsto que el viaje durase dos años, pero tardó cinco en volver. Arribó en octubre de 1836.

Se trataba de una expedición cartográfica que Darwin, como invitado, aprovechó para descubrir un mundo nuevo, el tropical: se maravilla ante la sucesión de paisajes, estudia las diferentes especies de animales y plantas en su geografía y observa la variedad de razas humanas.

El barco estaba al mando del capitán Robert Fitzroy, que acogió a Darwin en él por recomendación del botánico John S. Henslow, que simpatizaba con el joven Charles. Durante cinco años, Darwin hubo de escuchar las opiniones de Fitzroy, conservadoras y creacionistas hasta el extremo, sin pestañear. Stephen Jay Gould dice que las opiniones del capitán habrían sido un acicate para que Darwin elaborara una teoría opuesta.

Siempre que le era posible, desembarcaba para hacer observaciones y recoger ejemplares. Alquiló caballos y guías, acampó en el interior, trepó montañas y alquiló viviendas durante semanas, mientras Fitzroy se ocupaba en recorrer el continente y remontar ríos.

De vez en cuando enviaba a Henslow cajas de especímenes, y este lo enseñaba a sus colegas. Un hallazgo de Darwin (el cráneo fósil de un megaterio, enorme antecesor extinto del perezoso gigante de Sudamérica, también extinto) produjo sensación cuando Henslow lo presentó en una exposición de la *British Assotiation for the Advancement of Science*. Leyó, además, extractos de muchas de las largas cartas de Darwin en sesiones de la *Philosophical Society*, con el resultado de que, sin saberlo, el joven naturalista se convertía en Inglaterra en científico respetable.

Es difícil decir cuáles fueron los datos más importantes para Darwin. Su argumentación toma nociones de todas las disciplinas científicas de la época. Pero no cabe duda de que sus observaciones en las Islas Galápagos han desempeñado un papel importante en la elaboración de su modelo de los mecanismos de transformación de las especies.



Cuando llega a la Isla de San Cristóbal se fija especialmente en las tortugas y los pinzones. Estas aves, como resolverá una vez llega a Inglaterra con la ayuda del ornitólogo John Gould, constan de catorce especies en las islas, todas semejantes a las del continente, pero con fisonomías y hábitos diferentes.

El vicegobernador, M. Lawson, señala a Darwin un hecho que será muy importante: cada especie procede de una isla diferente. Pensó que todas estas especies era como si estuvieran emparentadas entre sí con un antepasado común, y hubiesen cambiado su apariencia física para explotar con mayor eficacia la variedad de recursos alimentarios de las islas. Escribió: *"Cabe imaginar que, a partir de la escasez de aves de este archipiélago, se aprovechó una especie con fines diversos"*. Así pues, las catorce especies de pinzones de las Galápagos se han transformado a partir de una especie llegada del continente, que se había difundido por las islas. En cada isla, las aves habrían experimentado transformaciones propias en función de los problemas particulares hallados.

A Darwin le intrigaban mucho las singularidades de la distribución geográfica:

¿Por qué lo que vivía al este de los Andes era tan diferente que los que vivían al otro lado?

¿Por qué los animales sudamericanos diferían tanto de los norteamericanos?

¿Por qué los animales del extremo norte eran tan similares en todos los continentes?

¿Por qué no había mamíferos en las Galápagos, salvo una pequeña especie de ratita?

¿Por qué en aquel archipiélago todas las especies resultaban tan peregrinas, incluidas las plantas?

¿Por qué albergaba una sola especie de halcón, de paloma, de pájaro nocturno y de serpiente?

El problema de la distribución surgió de nuevo al arribar a Nueva Zelanda. Aquí se revelaba un extravagante ecosistema aviar. Los nichos que hubieran correspondido a infinidad de mamíferos, desde las marmotas hasta los antílopes, estaban ocupados por un despliegue inverosímil de aves no voladoras o, más precisamente, lo habían estado, porque los cazadores maoríes casi las habían exterminado antes de que llegara Darwin. Los fósiles probaban que en otro tiempo habían predominado en la isla. Iban de los moas gigantes, dos veces más grandes que los avestruces, y que ponían huevos del grosor de una pelota de baloncesto, a una multitud de pájaros menores, como el kiwi, del tamaño de una gallina y uno de los pocos supervivientes de esta fauna, ya que actualmente vive alejado de los asentamientos humanos, como inconspicuo y huidizo hijo de la noche.

En Australia, sin embargo, sí que había una plétora de mamíferos, aunque de índole diferente a los europeos, asiáticos y africanos. Casi todos eran marsupiales, como los canguros que ocupaban el nicho de los herbívoros. Pero también existían otros que ocupaban los lugares de conejos, lobos, puerco espines, monos, etc.

Tras estos y otros muchos datos, Darwin vino a pensar algo parecido a lo que sigue: si se tiene en cuenta el parentesco de la totalidad de los animales del mundo, cómo forman

grupos, cómo se distribuyen geográficamente y cómo varían, aunque sea poco, de un sitio a otro, se hace muy difícil concebirlos como especies fijas.

Durante los años 1937 y 1938, Darwin se enfrentó al llamado problema de la dilución. Era sabido si se apareaba un animal muy diferente de sus congéneres con otro, y luego con otro la descendencia, y así sucesivamente, la variabilidad tan grande inicialmente acaba desapareciendo. Comprendió que había fuerzas muy poderosas para conservar las especies, como el hecho de la descendencia estéril de dos especies diferentes (como el caballo con los asnos). También se dio cuenta de que los animales débiles o deformes no sobrevivían: los enemigos y el hambre efectuaban una constante elección diezmadora de los incapaces, lo que confinaba a las especies a la regularidad. Sin embargo, en su mente seguía viendo toda aquella variabilidad que había observado en su viaje.

Fue en esta época cuando leyó el trabajo de Malthus, y en fecha muy posterior lo acreditó como una de sus revelaciones: "*... me inspiró de pronto que ... se tendería a conservar las variaciones conservadoras, y a destruir las que no lo fuesen. De ello resultaría la formación de nuevas especies*". Para otros la doctrina malthusiana era la única manera de mantener una especie apta e inmutada; Darwin lo vio a la inversa: habiendo variación entre los individuos, ¿no habría unos más aptos y más capaces de sobrevivir?

En estas circunstancias, ya podía explicar la diversidad de los pinzones y tortugas de las Galápagos. El archipiélago era de origen volcánico y surgió del fondo marino. Cuando llegó a las islas procedía de otros parajes. Si cada invasor era una pizca diferente de sus compañeros en el continente y en las demás islas (y no hay dos individuos idénticos en las especies animales superiores) se entiende que las diferentes sucesiones de tortugas y pinzones, al multiplicarse, intensificarían sus diferencias y tendrían rasgos característicos propios. Aquellos se había realizado durante millares de años, y cada isla albergó una especie diferente de tortuga y pinzón cuando Darwin llegó.

El pensamiento de Darwin no discurrió linealmente. Fue consecuencia de un entrelazado de observaciones y conclusiones, que hubo de organizar antes de que se resolvieran en teoría. Ernst Mayr, en su libro "*The Growth of the Biological Thought*" (El desarrollo del pensamiento biológico) resume mejor que nadie en cinco observaciones y tres inferencias la labor de Darwin:

Observación número 1. Las especies gozan de gran potencial de fecundidad, dato que él ya había observado y que Malthus le recordó.

Observación número 2. Las poblaciones tienden a conservar sus proporciones. La inmensa mayoría de las poblaciones son estables.

Observación número 3. Los recursos alimentarios tienen límites y se mantienen casi siempre bastante regulares.

De estas tres observaciones Darwin infirió que en un medio ambiente de recursos alimentarios estables y con proliferación excesiva de los individuos, estos se enfrentarían a la lucha por sobrevivir.

Observación número 4. No hay dos individuos idénticos. La variabilidad es universal.

Observación número 5. Gran parte de la variación se hereda.

La segunda inferencia de Darwin concluye que en un mundo de poblaciones estables, en el que los individuos han de luchar para sobrevivir, sólo tienen posibilidad de hacerlo los que tienen mejores características, que sus crías probablemente heredarán. Esta desigual proporción de supervivencia es la selección natural.

De aquí Darwin infirió, al final, que el proceso de selección natural, si se cumple con intensidad suficiente y durante bastante tiempo, acarrea al cabo cambios muy perceptibles en una población y culmina en la aparición de una nueva especie.

Tras todo este corpus de ideas y conclusiones perfectamente argumentadas, cabe imaginar a Darwin presto a publicarlas. Sin embargo, lo que sucedió fue muy distinto. Hacia 1839 y 1840 había llenado varios cuadernos. En 1842 los organizó y escribió un corto ensayo que bosquejaba su teoría. En 1844 redactó otro más extenso. Pero no publicó ninguno: le sobraban ejemplos para concluir que hablar de evolución en su sociedad y verse relegado a la repudia estaban íntimamente unidos.

Así, en 1844 Darwin se desvió del asunto y comenzó a estudiar algo menos comprometido, como eran las lapas, durante ocho años. El resultado fue una obra de cuatro tomos que aún hoy es un hito científico. Aún así, según Stephen Jay Gould, Darwin siempre lograba relacionar el asunto que trataba, por muy distante que pareciera, con el motor de su vida: la Evolución.

Wallace y la publicación de *El origen de las especies*

En 1855 Darwin vio publicado en una revista científica el siguiente artículo: "*Sobre la ley que ha regido la aparición de especies nuevas*". Su autor: un tal Alfred Russel Wallace. La tesis: la vida no se creaba sin cesar, sino que se desarrollaban poco a poco formas nuevas de las viejas ("*toda especie cobra existencia de modo que coincide en el tiempo y el espacio con otra preexistente y muy emparentada con ella*").

Evidentemente, para ejercer su dominio sobre lo que él consideraba su obra debía publicar. Comenzó a escribir en 1856, y hacia junio de 1858, cuando llevaba doscientas cincuenta mil palabras, tuvo de nuevo noticias de Wallace en forma de manuscrito en el que Wallace hablaba de sus ideas. Hasta tal punto eran estas coincidentes con las de Darwin, que este escribió a su amigo Lyell: "Jamás supe de coincidencia más total... toda mi originalidad ... quedará en nada".

Finalmente, en 1859, el 24 de Noviembre, a los doce meses de haber recibido el manuscrito de Wallace, publicó su obra "*Origin of Species*", de la que Wallace recibiría un ejemplar y del cual opinó: "*Perdurará tanto como los Principia de Newton. El señor Darwin ha donado al mundo una ciencia nueva, y su nombre, a juicio mío, se destaca por encima del de muchos filósofos antiguos y modernos. ¡¡La fuerza de la admiración me impide decir más !!*".

Wallace nació catorce años después que Darwin. Gran observador y muy inteligente, se hizo topógrafo profesional, encontró sus primeros fósiles y advirtió la importancia científica de la geología. Se entregó al coleccionismo, rasgo que compartiría con Darwin. Leyó a Lyell y el diario del Beagle. En 1849 zarpó para el Amazonas, y llegó a gozar de gran fama de coleccionista meticulado y digno de confianza. Coleccionó hasta 125.000 especímenes.

En estas condiciones, se preguntó las mismas cosas que Darwin, aunque parezca inverosímil: cómo y porqué cambian las especies y cómo se adaptan estas a sus medios. Fue una de las coincidencias más portentosas de la historia de la ciencia. Refiriéndose a Darwin, escribió una vez: *"Ni en sueños me hubiera acercado yo a la perfección de su libro. Confieso mi agradecimiento de que no me incumbiera presentar la teoría al mundo"*.

La teoría de Wallace difiere de la de Darwin en algunas cuestiones importantes; por ejemplo, niega que la selección natural sea suficiente para dar cuenta del origen del hombre, lo cual requiere, según Wallace, la intervención divina directa. También creyó que el proceso evolutivo había finalizado en los hombres y que la evolución sería imposible en adelante.

Como anécdota, comentar que la peor experiencia de Wallace fue con un fundamentalista de la Tierra plana, un tal John Hampden, que había prometido un premio de quinientas libras a quien le demostrase la redondez terrestre. Un juego de niños para un topógrafo como Wallace. Eligió un lago de nueve kilómetros en Gales, con un puente en un extremo y un dique en el otro. Pintó una diana en el lado del primero, a un metro y ochenta centímetros de la superficie lacustre, colocó un catalejo a la misma altura en el dique, y a medio camino de ambos situó una estaca con una diana a la misma elevación de la primera. Como esperaba, la estaca intermedia se destacó a nivel más alto, prueba de que el haz acuático se curvaba. Hampden bombardeó a Wallace con vilipendios y acciones judiciales y terminó en prisión por difamación un par de veces. Así, a lo largo de tres lustros acosó a Wallace pidiéndole la cuantía del premio y las costas judiciales.

La selección natural y la reacción al *"Origen..."*

Darwin resume el argumento central de la teoría de la evolución por medio de la selección natural de la manera siguiente:

*"Dado que se producen más individuos de los que pueden sobrevivir, tiene que haber en cada caso una lucha por la existencia, ya sea de un individuo con otro de su misma especie o con individuos de diferentes especies, ya sea con las condiciones físicas de la vida (...). Viendo que indudablemente se ha presentado variaciones útiles al hombre, ¿puede acaso dudarse de que de la misma manera aparezcan otras que sean útiles a los organismos vivos, en su grande y compleja batalla por la vida, en el transcurso de las generaciones? Si esto ocurre, ¿podemos dudar, recordando que nacen muchos más individuos de los que acaso pueden sobrevivir, que los individuos que tienen más ventaja, por ligera que sea, sobre otros tendrán más probabilidades de sobrevivir y reproducir su especie? Y al contrario, podemos estar seguros de que toda la variación perjudicial, por poco que lo sea, será rigurosamente eliminada. Esta conservación de las diferencias y variaciones favorables de los individuos y la destrucción de las que son perjudiciales es lo que yo he llamado selección natural."*

La explicación darwinista de la evolución de los organismos por medio de la selección natural es extremadamente simple, al mismo tiempo que poderosa. Pero, ¿cuál fue la acogida que tuvo la publicación de su libro?

La primera edición de su libro, de 1.250 ejemplares, se agotó el mismo día. Su título completo fue "*On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured races in the Struggle for Life*" (Sobre el origen de las especies mediante la selección natural o la conservación de las razas privilegiadas en la lucha por la vida). Desde el instante de la publicación, Darwin se encontró en el centro de la controversia social, eclesiástica, política y científica. Algunos científicos le apoyaron, pero la mayoría le combatieron.

De entre quienes le defendieron destaca Thomas H. Huxley. Se dice que cuando leyó el Origen se reprochaba a sí mismo su estupidez por no haber pensado él mismo en ello. Decidió que Darwin, jamás dispuesto a defenderse, necesitaba que le protegieran, sobre todo de Richard Owen, anatomista experto, el cual publicó ensayos largos críticos con el Origen.

Owen impartió un "*cursillo*" acelerado sobre el libro a un clérigo, el obispo de Oxford Samuel Wilberforce. El lugar donde se celebraría el primer gran debate sobre el tema era la reunión anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, un sábado del mes de junio de 1860. Huxley, por su parte, no tenía intención de ir, ya que pensaba que un debate entre científico y público no aclararía nada. Pero cambió de opinión cuando le convenció John Henslow al decirle que Robert Chambers, autor de una obra creacionista, que Huxley conocía bien, iba a estar presente. Henslow, que no compartía las ideas de Darwin, pero gran amigo suyo, también reclutó a un yerno suyo y amigo de aquel, Joseph Hooker, para que defendiera la causa darwinista.

El debate se decantó a favor del darwinismo, cuando Huxley se percató de que Wilberforce no tenía ni idea de ciencia. Se cuenta el siguiente diálogo:

- *Por favor, profesor Huxley, contésteme: ¿desciende usted de mono por parte de abuela o de abuelo?*

El auditorio prorrumpió en aplausos, y se dice que Huxley murmuró: "*El Señor lo ha puesto en mis manos*". Luego contestó al obispo:

- *Aseguro que el hombre carece de motivos para avergonzarse de tener un simio entre sus antepasados. El único antepasado que me avergonzaría recordar sería más bien el hombre que, dotado de mucha habilidad y con una espléndida posición social, usase esos atributos para oscurecer la verdad.*

S. J. Gould, en un artículo publicado en 1986, habiendo repasado todos los sucesos de aquel debate, insinuó que tenía ciertas dudas sobre si Huxley había murmurado lo dicho más arriba. También concede más importancia a Hooker que a Huxley en la demolición de Wilberforce.

Notas y aclaraciones al Origen

Las causas de la variabilidad. Hoy en día se sabe que la idea de Darwin de que la domesticación puede, por sí misma, hacer que surja una gran variabilidad entre individuos, es errónea. La gran variedad que se observa en las plantas y los animales domésticos es el resultado de que no han estado sometidos a la selección natural que, si el ambiente es estable y las especies bien adaptadas, tiende a eliminar a aquellos que se apartan de la norma. La recombinación génica y la mutación son los procesos que dan lugar a la variación, y ambos se dan en una tasa similar en la domesticación que en la naturaleza. Pero en la naturaleza las variaciones suelen ser eliminadas de manera mucho más despiadada.

Observa lo que puede ocurrir con las variaciones nuevas en un caso concreto de selección artificial.

Efectos de la costumbre y del uso y desuso de las partes. Los caracteres que un individuo adquiere a lo largo de su vida no pueden transmitirse a sus descendientes. Aunque Darwin creyó equivocadamente que la costumbre y los efectos del uso y desuso podían heredarse, no consideró que la herencia de estos caracteres adquiridos fuese esencial para su teoría. En su primera edición se ponía menos énfasis en este tema, pero más tarde Darwin le concedió más prominencia para contestar a las críticas que decían que no había habido tiempo suficiente para que hubiera tenido lugar tanta evolución simplemente a través de la acumulación de variaciones al azar.

El problema de la dilución . En uno de los capítulos del Origen, Darwin se enfrenta a este problema. Pensaba que una variación que surgiera en una generación se diluiría al transmitirse a la descendencia, y se vio obligado a suponer que la misma variación debe surgir una y otra vez para que se forme una variedad. La herencia particulada, descubierta por Gregor Mendel, permite que la variación, en forma de genes, se transmita a algunos de los descendientes sin atenuación. En teoría, un gen puede transmitirse durante un número infinito de generaciones sin que exista ninguna atenuación de sus efectos.

Leyes de la variación. Las variaciones, efectivamente, se deben al azar, pero proceden de las mutaciones y de la recombinación. La forma que adoptan las variaciones no está influida por las condiciones ambientales.

El instinto. Las costumbres, como otras características adquiridas a lo largo de la vida de un individuo, no pueden transmitirse a la descendencia. Por ello los verdaderos instintos sólo pueden evolucionar mediante la selección natural de variaciones espontáneas y aleatorias en los instintos ya existentes. Sin embargo, debe mencionarse que en los animales superiores un cierto comportamiento que parece deberse a instinto depende de lo que denomina "*transmisión cultural*". Por ejemplo, las aves de muchas especies nacen con el instinto de su pauta de canto característica, pero tienen que aprender los detalles del canto oyendo como cantan otros de su especie.

Las especies . Darwin razona que las especies son simplemente variedades bien marcadas. Un biólogo moderno definiría una especie como un grupo de organismos que pueden interfecundarse entre sí. En otras palabras, se trata de un grupo en el que el material genético puede fluir libremente, pero que se halla aislado genéticamente de otros grupos. La especie puede reconocerse como una categoría especialmente significativa en taxonomía porque su

aislamiento genético le permite evolucionar independientemente, produciendo así características distintivas. Sin embargo, el mundo natural no se halla enteramente dividido en especies, y la línea entre esterilidad y fertilidad puede ser confusa, como cuando dos especies están en proceso de separarse una de otra. En algunas especies de plantas existe esterilidad entre individuos determinados, aunque es absolutamente claro que todos pertenecen a la misma especie.

Las diferencias que impiden la fecundación interespecífica se denominan hoy mecanismos de aislamiento, que se verán más adelante. Hoy día se sabe que puede haber selección natural para estos mecanismos. Allí donde, por ejemplo, dos especies ocupan hábitats diferentes pero todavía pueden hibridarse, los híbridos de ambas pueden ser incapaces de sobrevivir en uno u otro hábitat. Cualquier mecanismo heredado que reduzca el cruzamiento entre los individuos de las dos especies se verá favorecido por la selección natural, puesto que será ventajoso no malgastar esfuerzo reproductor en la producción de híbridos inadaptados.

En algunos casos los cromosomas de las especies diferentes no pueden emparejarse adecuadamente durante la meiosis debido a que desarrollan diferencias estructurales. El híbrido puede ser todavía sano y vigoroso, pero será estéril o tendrá la fertilidad reducida porque los gametos que produzca tendrán demasiados o demasiado pocos cromosomas debido a un defecto en la meiosis.

El híbrido puede también ser infecundo por otras razones más complejas. La selección natural tenderá entonces a favorecer mecanismos de aislamiento que actúen antes sobre el proceso reproductor para evitar que tales híbridos se produzcan.

La trascendencia de Darwin para la biología proviene, primero, el hecho de haber sentado de modo definitivo que la evolución de las especies era un fenómeno a estudiar de forma científica, y no una mera especulación; y segundo, de haber descubierto la importancia de la selección natural como principal mecanismo de la evolución. Es de justicia apuntar que en este aspecto también cuenta Wallace.

La divulgación científica de la teoría de la evolución fue obra del zoólogo alemán Ernest Haeckel (1834-1919). De su libro *Enigmas del Universo* se vendieron 40.000 ejemplares. También él elaborará una teoría de la evolución, según la cual las formas más primitivas de vida están constituidas por materia orgánica. A continuación los organismos unicelulares se agregan para producir los pluricelulares.

Pero ¿en qué consistió exactamente la revolución de Darwin? Las teorías que precedieron a la de Darwin eran teorías transformativas, ya vistas anteriormente. Estas teorías venían a decir que la especie en su conjunto variaba porque cada individuo de la especie lo haría en la misma dirección. Los pequeños cambios de los individuos pasan a la descendencia, que a su vez sigue cambiando impulsada por el proceso de adaptarse a su ambiente. Ahí tenemos las ideas de Lamarck.

Darwin rompió con todo esto creando una teoría variativa tomando como punto de partida la variación que existe entre los individuos de una especie. La evolución de la especie resulta

de las tasas diferenciales de supervivencia y reproducción de los diversos tipos, de modo que las frecuencias relativas de los tipos cambian con el tiempo. Bajo este punto de vista, se puede decir que la evolución es un proceso de "*elección*", más que de transformación, como proponía Lamarck, para el que la evolución del grupo sería la consecuencia de los cambios inducido por el medio ambiente, todos en la misma dirección.

Para Darwin, la evolución del grupo resulta de la supervivencia y reproducción diferencial de variantes individuales ya existentes en el grupo, variantes que aparecen sin relación con el ambiente (lo que más tarde se llamará cambio preadaptativo).

La semejanza que existe entre lo que el agricultor o ganadero realiza para obtener las mejores variantes, y el proceso propuesto por Darwin, fue lo que hizo que este escogiera el término selección natural para describir su modelo de evolución por tasas diferenciales de reproducción de las distintas variantes de la población.

Definitivamente, se puede resumir la teoría de Darwin de evolución por selección natural en tres principios, ya más o menos tratados:

1. El principio de variación. Entre los individuos de cualquier población se presentan variaciones en la morfología, la fisiología y la conducta.
2. El principio de la herencia. Los descendientes se parecen a sus progenitores más de lo que se parecen a individuos con los que no están emparentados.
3. El principio de selección. Algunas formas tienen más éxito que otras en sobrevivir y reproducirse en un ambiente determinado.

Está claro que un proceso selectivo puede producir algún cambio en la composición de la población sólo si hay variación para seleccionar. Si todos los individuos son iguales, la reproducción no afectará a la composición de la población. Por otra parte, la variación debe ser hereditaria, al menos en parte, para que la reproducción diferencial altere la composición genética de la población. Si los animales grandes de una población dejan más descendientes que los pequeños, pero sus descendientes no son, en promedio, más grandes que los de los animales pequeños, no ocurrirá ningún cambio en la composición de esa población. Incluso, si todas las variantes dejan el mismo número de descendientes, se puede esperar que tampoco haya un cambio en la composición de la población.

#### Antecedentes del neodarwinismo

El redescubrimiento en 1900 de las leyes de Mendel de la herencia, de las mutaciones y el descarte de la herencia de los caracteres adquiridos gracias a los experimentos de Weismann, son básicos para entender el desarrollo posterior de la teoría de la evolución.

El biólogo alemán Auguste Weismann (1834-1914) era un buen microscopista, pero hacia 1885 comenzó a perder la vista y se concentró en aspectos teóricos de la herencia. Era de los que ya se centraban por aquella época en la estructura interna y funcionamiento de las células. Así, se convenció de que la base material de la herencia se hallaba en los cromosomas. Durante la fecundación, las instrucciones hereditarias de los progenitores se



mezclan entre sí al unirse óvulo y espermatozoide. Weismann creía que esta combinación de instrucciones hereditarias determinaba la estructura del cuerpo.

También propuso una teoría nueva que postulaba la continuidad del "plasma germinal" (los gametos), que se desarrollaban y transmitían el código genético de una generación a otra con independencia de los cambios en el resto del cuerpo. Es decir, que los gametos son sólo un vehículo para la transmisión de la línea germinal.

Esta teoría fue, obviamente, un duro golpe para los seguidores de Lamarck. Si había una barrera entre las células sexuales y el resto del cuerpo, era imposible que las características adquiridas durante la vida de incorporaran al código de la línea germinal.

Para demostrarlo, realizó un famoso experimento en el que cortó la cola a un grupo de ratones, y siguió su descendencia durante 22 generaciones sin encontrar ninguno que naciera sin ella. Ejemplos como estos sobran en la vida diaria, por ejemplo, la circuncisión o la descendencia de los mutilados.

De Vries propone una nueva teoría, conocida como mutacionismo o mendelismo, que elimina la selección natural como fuente de evolución. De acuerdo con él y con otros genéticos, como William Bateson, hay dos tipos de variaciones en los organismos: un tipo consiste en la variación ordinaria observada entre los individuos de una especie, que no tiene consecuencias en la evolución porque no puede llegar a traspasar los límites de la especie, incluso bajo condiciones de la más fuerte y continua selección; otro, tipo que consiste en las variaciones que surgen por mutación genética y que ocasionan grandes modificaciones de los organismos y que pueden dar lugar a diferentes especies: *"Una nueva especie se origina de repente, es producida a partir de una especie preexistente sin ninguna preparación visible y sin transición"*.

El mutacionismo fue rebatido por muchos naturalistas de la época y por los llamados biómetros, encabezados por el matemático Karl Pearson. Según ellos, la selección natural es la principal causa de la evolución, a través de los efectos acumulativos de variaciones pequeñas y continuas, tales como las que se observan entre individuos normales. Estas variaciones se denominan métricas o cuantitativas, para distinguirlas de las cualitativas, que son las que diferencian, por ejemplo, las diferentes razas de perros.

Esta polémica fue muy agria y perduró las dos primeras décadas del siglo XX. Los mutacionistas argüían que la herencia de las variaciones cuantitativas era necesariamente mezclada y que por ello ni tales mutaciones ni la selección natural que actúa sobre ellas podrían tener un papel importante en la evolución, debido al efecto, que ya Darwin había conocido como problemático, de dilución de las variaciones ventajosas de una generación a otra.

Los biómetros decían que las mutaciones observadas por De Vries y, en general, las variaciones cualitativas que obedecen a las leyes mendelianas, son anomalías que no contribuyen a mejorar la adaptación al medio, sino que son eliminadas por selección. La evolución depende, por tanto, de la selección natural, actuando en las variaciones métricas ampliamente presentes en los organismos. El propio Darwin había presentado varios

ejemplos de modificaciones drásticas (pérdida de cabello, ausencia de cuernos, mayor número de dientes, enanismo, todas ellas algún tipo de mutación), pero sin considerarlos esenciales para la evolución. Su teoría de cambio evolutivo la basaba en pequeñas diferencias hereditarias entre individuos y la selección. Hoy sabemos que las mutaciones son de muchos tipos, raras y, la mayoría, letales, si sólo en el caso de dar lugar a poliploidismos se llegan a originar especies nuevas.

Thomas Hunt Morgan, a partir de 1910, que se había propuesto demostrar la "*presunta falsedad*" de las leyes de la herencia de Mendel, demostraron que existían mutaciones de todos los tamaños con *Drosophila melanogaster*, y que, efectivamente, son muy raras y generalmente letales. Además, casi todas son indetectables a simple vista y hay que recurrir a métodos más o menos sutiles, como el hecho de que algunas sean capaces de vivir en medio muy salinos. Por supuesto, que Morgan no demostró la falsedad de las leyes de Mendel, pero sí que descubrió el entrecruzamiento cromosómico, fenómenos que es otra fuente de variabilidad, abriendo el camino para que él mismo demostrase que los genes se sitúan en los cromosomas. Pero aquí vale la expresión "*eso es otra historia*".

Además, las que portaban mutaciones no letales seguían siendo miembros del mismo genoma poblacional, es decir, que seguían reproduciéndose como tales *Drosophila*. Estas pequeñas mutaciones, o variaciones, son las que precisa la selección natural para actuar sobre ellas. De este modo, quedaban rebatidas las ideas de Johannsen y De Vries.

La teoría sintética de la evolución

Podrían verse numerosos precedentes que dieron lugar a la actual síntesis en la teoría evolutiva.

Por ejemplo, durante el período en que la genética de laboratorio y de jardín botánico hacían enormes progresos y contribuían a desarrollar los modelos estadístico-matemáticos de las dinámicas genéticas de poblaciones, numerosos investigadores se preocuparon de estudiar casos concretos de problemática genética. Por ejemplo, Reginald C. Punnett estudiaba el polimorfismo mimético de las mariposas (1915) y encontró que su herencia se adecuaba a las leyes de Mendel. Fue uno de los primeros mendelianos y estudió la selección en poblaciones naturales. Punnett asumía que toda la variación era mendeliana, y se preguntaba cuántas generaciones serían necesarias para un pequeño cambio en la efectividad de un mimetismo de la mariposa con otro organismo para que la mejor imitación se convirtiera en una proporción importante en la población; el cálculo demostró que el proceso podía ser bastante rápido. Sin embargo, la profundización en este tipo de estudios requería técnicas estadísticas complejas, aún sin desarrollar.

Goldschmidt trabajó, a lo largo de varios años desde 1921, con la genética de la distribución geográfica de una especie concreta de mariposas. Y así, numerosos estudios de este tipo.

Estos trabajos taxonómicos tenían como objeto las estructuras intraespecíficas.

Desgraciadamente, el mundo científico tardó en darse cuenta de que el primer intento de solucionar los problemas de evolución con ayuda de la genética, debería comenzar por el análisis de las subespecies. Estas, según Darwin, son las que están a medio camino de

separarse de su especie original y de dar lugar a una nueva. Así, a finales de los años 20, ya aparecieron varios estudios sobre esta cuestión, el más famoso de los cuales es el publicado por W. Meise (1928) acerca de las cornejas negras y cenicientas.

Ya en la década de los 40 se produjo la gran explosión en publicaciones sobre evolución: "*La sistemática y el origen de las especies*" de E. Mayr (1942), una gran síntesis de genética, taxonomía, ecología y biogeografía, "*Evolución: la nueva síntesis*", de J. S. Huxley, y un largo etcétera que se prolongó más allá de la segunda guerra mundial.

La teoría sintética de la evolución actual se apoya en la teoría darwinista de la selección, en los conocimientos de la genética y del tratamiento matemático de la dinámica de poblaciones.

En 1908, Hardy y Weimberg habían demostrado que una población mendeliana no influida por factores evolutivos se haya en equilibrio, y que la frecuencia de las variantes génicas en la sucesión generacional permanece constante.

Chetverikov, en 1926, había propuesto que toda población natural es heterogénea, que almacena heterogeneidad a causa de las mutaciones y que dicha heterogeneidad es la base del proceso evolutivo.

Por métodos estadísticos, Fisher (1918) y Wright (1921), habían empezado a estudiar procesos típicos en poblaciones. Tales estudios llevaron más adelante al análisis de factores como selección, difusión, aislamiento y pérdida genética en sus efectos sobre las poblaciones.

En el año 1937 apareció la obra de Th. Dobzhansky "*Genetics and the origin of species*". Desde "*El Origen...*" de Darwin no había habido publicación que impulsara de tal modo los estudios sobre evolución.

Los elementos confluyentes fueron los resultados de una investigación genética realizada sobre todo en laboratorios, viveros y huertos, además de las informaciones de la genética de poblaciones, y observaciones de campo y datos sistemáticos de taxonomía. El libro de Dobzhansky eliminó los prejuicios de muchos biólogos contra un mecanismo de mutaciones casuales y de selección sometida a una criba negativa, ya que hay que tener presente que en la época el lamarckismo estaba aún muy extendido.

Diría Dobzhansky en 1965: "Nunca hasta entonces había ocurrido en biología que una teoría se dedujese de una única premisa fundamental, la ley de la segregación de Mendel". Este entusiasmo, sin embargo, no estaba muy difundido entre el resto de los biólogos.

La labor de Dobzhansky se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Trazó un diseño coherente de los procesos elementales de la evolución.
2. Desarrolló el concepto biológico de especie y explicó la esencia de la especiación.
3. Reunificó las orientaciones del darwinismo clásico y la genética experimental.
4. Cribó con los criterios de la teoría deductiva un amplio material empírico de

descubrimientos taxonómicos, ecológicos y biogeográficos.

El resultado fue la comprensión y la síntesis del material acumulado en distintas disciplinas biológicas.

El término síntesis evolutiva designa un consenso erigido sobre dos conclusiones: la evolución gradual de las especies se puede explicar mediante la aparición de pequeños cambios aleatorios (mutaciones) y su ulterior criba por la selección natural; además, todos los fenómenos evolutivos, incluidos la macroevolución y la especiación (proceso de aparición de nuevas especies) admiten una explicación a partir de estos mismos mecanismos genéticos.

Hoy día no se habla de supervivencia de los individuos, sino de cambios en la frecuencia de los diversos genes de una población.

Tras establecerse esta nueva gran síntesis de genética, genética de poblaciones, taxonomía, biogeografía y ecología, se planteó la cuestión de si los procesos filogenéticos más importantes, el progreso evolutivo, la formación de nuevas especies y de taxones superiores y la organización armónica de estructuras morfológicamente complejas quedaban suficientemente explicadas por esta teoría o si se requerían otras fuerzas, al menos complementarias. Dicho de otro modo: ¿son suficientes los tres mecanismos (mutación, selección y aislamiento) propuestos por la teoría sintética de la evolución, para explicar cualquier fenómeno evolutivo, o, por el contrario, hay que proponer otros posibles mecanismos?

Actualmente, las investigaciones evolucionistas se desarrollan principalmente en dos direcciones: por una parte (biología evolucionista especial) se trata de explicar la filogénesis y el parentesco de grupos de especies más o menos grandes, y por otra (biología evolucionista general), el ulterior desarrollo de la teoría de la evolución, de las fuerzas activas, de la interacción de los factores y de las leyes que gobiernan los procesos de microevolución y macroevolución.

La síntesis abarca hoy día la teoría del gen, la teoría cromosómica, la mutación, el mendelismo, la selección, la especiación, la ecología y la evolución molecular.

Enfrentamientos con la Teoría sintética

Los estudios moleculares han dado pie a dos enfrentamientos directos con la teoría sintética:

1. Uno se basa en la propuesta de que la aparición de variaciones en el ADN pueda deberse en mayor grado a cierto determinismo molecular que al puro azar.
2. El otro, denominado teoría neutralista, se basa en la pretensión, contraria a la anterior, de que el azar no sólo establece la aparición inicial de las variantes genéticas, sino también su posterior destino en la población.

De la paleontología surge, asimismo, un desafío de otra índole, que ha recibido el nombre de teoría del equilibrio puntuado, y mantiene que la evolución no procede gradualmente, sino de manera irregular, a saltos y con convulsiones.

Para Stebbins y Ayala, la mayoría de estos desacuerdos pueden encajarse en una versión más amplia de la teoría sintética.

Conforme avanzaba el conocimiento de los genomas de los organismos, sorprendía el gran número de segmentos de ADN de función desconocida que iban apareciendo, como en lo referente a secuencias reiterativas, aparentemente sin sentido alguno. Esto condujo a especular con la idea de que parte de la evolución molecular fuera determinista y siguiera una dirección independiente tanto del azar como de la selección natural. Sin embargo, los modelos matemáticos indican que los conceptos tradicionales de evolución pueden explicar este fenómeno.

Las mutaciones y la variación.

La fuente biológica de la variación viene dada por las mutaciones y cambios en el genoma en todas sus modalidades.

Antes de continuar, puedes pasarte por el enlace contiguo, y verás el caso más estudiado de mutaciones, el de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*.

En líneas generales, sin extendernos demasiado, los tipos de mutaciones son los siguientes:

**Mutaciones génicas:** cuando una secuencia de nucleótidos es alterada. Una sustitución puede pasar desapercibida, pero también pueden darse alteraciones importantes en la función biológica de la proteína. Las mutaciones nuevas tienen mayor probabilidad de ser perjudiciales que beneficiosas para los organismos, y esto se debe a que son eventos aleatorios con respecto a la adaptación, es decir, el que ocurra o no una mutación particular es independiente de las consecuencias que puedan tener en sus portadores.

Las tasas de mutación han sido medidas en una gran variedad de organismos. En humanos y en organismo multicelulares, una mutación ocurre entre 1 de cada 100.000 gametos o 1 de cada 1.000.000.

A pesar de que la incidencia de las mutaciones es relativamente grande en relación con el número de organismos de cada especie, la evolución no depende ni mucho menos de las mutaciones que surgen en cada generación, sino de la acumulación de toda la variabilidad durante la evolución de las especies.

**Mutaciones cromosómicas:** afectan al número de cromosomas o a su estructura o su configuración. Por ejemplo, en la evolución humana, tuvo lugar la fusión de dos cromosomas relativamente pequeños en uno bastante grande, el cromosoma 2. Los chimpancés, gorilas y primates conservan la situación original.

También pueden darse inversiones y traslocaciones, que no cambian la cantidad de ADN. La importancia de estas mutaciones es que cambian las relaciones de ligamiento entre los genes.

Con las mutaciones cromosómicas el tamaño del genoma puede variar, apareciendo genes duplicados y poliploidías (cambios en el número de cromosomas). La poliploidía es una situación particularmente interesante, puesto que una mutación puede dar origen, de manera virtualmente instantánea, a una especie nueva.

La biología molecular ha permitido profundizar no sólo en el cambio genético temporal, sino también en el prerrequisito de tal evolución, la variación genética. Matemáticamente y experimentalmente se ha demostrado que, en aquellas poblaciones que ocupan medios idénticos o semejantes, la tasa de evolución es proporcional al grado de variación genética de cada una de ellas. Tal variación puede expresarse en función del grado de heterocigosidad, esto es, de la proporción de loci de un individuo promedio en el que los dos miembros de la pareja de genes, cada uno de ellos procedente de padres distintos, codifican proteínas diferentes. Varios centenares de especies se han sometido a estudios de este tipo por electroforesis y otros estudios, y la proporción de loci heterocigóticos oscila entre el 5 y el 20%.

En el caso del hombre, el valor de la heterocigosidad es  $H=0.067$ . Es decir, que un individuo es en promedio heterocigoto en el 67% de sus genes. El número de genes en el hombre se estima entre 30.000 y 100.000. Asumiendo la estima más baja (y con los avances en el desarrollo del genoma humano, parece que es justo al contrario), una persona será heterocigota en  $30.000 \times 0.067 = 2.010$  genes, teniendo en cuenta que, además, esos 2.010 genes heterocigotos en una persona no son los mismos 2.010 genes de otra. Así, el concepto de raza pura, entendiéndolo como tal aquella que tenga el 100% de sus genes en homocigosis, es exclusivamente coloquial y carente de sentido genético.

Un individuo heterocigoto en un gen (Aa) puede producir dos tipos diferentes de gametos; un individuo heterocigoto en dos genes (AaBb) puede producir cuatro tipos de gametos diferentes; y un individuo heterocigótico en n genes puede producir  $2^n$  genes diferentes. Por tanto, un individuo humano tiene el potencial de producir  $2^{2010}$ , o lo que es lo mismo, 10605 tipos de gametos diferentes (muchos más que átomos estimados hay en el Universo, que se calcula en  $10^{76}$ ).

A esta variabilidad hay que añadir la que es consecuencia de la recombinación en el proceso de meiosis, en donde fragmentos completos de parejas de cromosomas homólogos se rompen y se intercambian, y al proceso de segregación aleatoria de cromosomas homólogos al final de dicha meiosis. En este último caso, es fácil calcular que, si de cada célula humana de 23 parejas de cromosomas (diploides) se obtienen células de sólo 23 cromosomas (haploides), y que cada cromosoma puede provenir de cualquiera de los dos miembros de la pareja original, de una célula madre pueden darse, sólo por este mecanismo,  $2^{23}$  gametos (óvulos o espermatozoides) diferentes.

A este respecto, en un artículo publicado en "EL PAIS", el 13 de Septiembre del 2000, los científicos que han completado la secuencia del genoma humano sostienen que *"el concepto de raza es social, pero no científico...Hay una sola raza, la humana"*, afirmó Craig Venter, director del consorcio privado para el estudio del genoma humano Celera Genomics. Las diferencias externas observables corresponden a rasgos relacionados con la adaptación al medio ambiente controlados por un número pequeñísimo de genes. *"Todos evolucionamos en los últimos 100.000 años a partir del mismo grupo reducido de tribus que emigraron desde África y colonizaron el mundo"*.

Harold P. Freeman, del Hospital General de Manhattan, que ha estudiado la cuestión de la biología y la raza, dice: *"Si se pregunta qué porcentaje de genes está reflejado en la apariencia externa, sobre la que nos basamos para establecer la raza, la respuesta es aproximadamente del 0,01%"...* *"Este es un reflejo mínimo de nuestra composición genética"*. Compartimos el 999% del genoma, nos diferenciamos en un 001% y sólo el 10% de eso, es decir, sólo el 001% del genoma tiene que ver con esos caracteres visibles en los que nos apoyamos para dividir a la humanidad en razas. Precisamente los genes más variables, los relacionados con la inmunidad, no se correlacionan con ninguna de las razas.

Douglas C. Wallace, profesor de genética molecular en la Universidad de Emory, en Atlanta, afirma que damos tanta importancia al aspecto externo porque, de alguna manera, nuestro cerebro está entrenado para distinguir a unos miembros de la población de otros, por eso nos fijamos en los detalles más aparentes.

Para Alan Rogers, especialista en genética de poblaciones y profesor de antropología en la Universidad de Utah, en Salt Lake City. Las diferenciaciones entre razas han sido útiles. *"Podemos creer que la mayoría de las diferencias entre razas son superficiales, pero las diferencias están ahí, y nos informan sobre los orígenes y las migraciones de nuestra especie"*.

Como es de esperar, en estos temas siempre aparecen las opiniones de determinados "investigadores", como el "psicólogo" J. Philippe Rushton, psicólogo de la Universidad de Ontario Occidental en Canadá, que, a estas alturas, sigue sosteniendo las diferencias en inteligencia y coeficiente intelectual, además de en la propensión hacia el comportamiento criminal entre los diferentes razas que hay en la Tierra. Lo que no dice, al menos públicamente, es si las personas de las razas "más favorecidas" que presentan esas características han evolucionado "más directamente" a partir de las otras razas supuestamente inferiores. Permítaseme el comentario.

#### La Teoría neutralista de la evolución molecular

En 1980, dos genes de la hemoglobina fueron secuenciados. Aunque ambos codificaban el mismo producto, sus secuencias de nucleótidos diferían en el 08% si sólo se tenían en cuenta las sustituciones de un aminoácido por otro, y en un 24% si se incluían en la comparación los aminoácidos presentes en un gen y ausentes en otro. Otros genes secuenciados posteriormente en otros organismos llevaban a la misma conclusión: en la secuencia de ADN, los organismos quizá sean heterocigotos para todos sus loci.

La gran variación revelada por estos estudios constituye uno de los fundamentos de la teoría neutralista, otro de los desafíos a la teoría sintética.

Su principal expositor es Motoo Kimura, y en su opinión, la mayoría de los genes mutantes son selectivamente neutros, es decir, no tienen selectivamente ni más ni menos ventaja que los genes a los que sustituyen; en el nivel molecular, la mayoría de los cambios evolutivos se deben a la deriva genética de genes mutantes selectivamente equivalentes. (La deriva genética consiste en el cambio puramente aleatorio de las frecuencias génicas, debido a que cualquier población consta de un número finito de individuos. La razón es la misma por la que es posible que salga cara más de 50 veces cuando lanzamos una moneda al aire cien veces).

Kimura se paró a pensar cuál sería la probabilidad de mutación de un mutante que aparece en una población finita y muestra cierta ventaja selectiva. Es decir, ¿cuál es la probabilidad de que ese gen se propague por toda la población? Kimura llegó a tres hallazgos:

1. Para una proteína determinada, la tasa de sustitución de un aminoácido por otro es aproximadamente igual en muchas líneas filogenéticas distintas.
2. Estas sustituciones, en vez de seguir un modelo, parecían ocurrir al azar.
3. La tasa total de cambio en el ADN era muy alta, del orden de una sustitución de una base nucleotídica por cada dos años en una línea evolutiva de mamíferos.

En cuanto a la variabilidad dentro de la especie, se vio que la mayor parte de las proteínas eran polimórficas, es decir, que existían en diferentes formas, y en muchos casos sin efectos fenotípicos visibles ni una correlación con el medio ambiente.

Así, Kimura llegó a dos conclusiones:

- 1ª La mayoría de las sustituciones de nucleótidos debían ser el resultado de la fijación al azar de mutantes neutros, o casi neutros, más que el resultado de una selección darwiniana.
- 2ª Muchos de los polimorfismo proteínicos debían ser selectivamente neutros o casi neutros y su persistencia en la población se debería al equilibrio existente entre la aportación de polimorfismo por mutación y su eliminación al azar.

Los seleccionistas sostienen que para que un alelo mutante se difunda en una especie, debe poseer alguna ventaja selectiva; para los neutralistas, algunos mutantes pueden difundirse en una población sin tener ninguna ventaja selectiva, su suerte dependería del azar: su frecuencia fluctúa, incrementándose o decreciendo fortuitamente con el tiempo, porque sólo se escoge un número relativamente pequeño de gametos, de entre el amplio número de gametos masculinos y femeninos. En el curso de esta deriva aleatoria, la inmensa mayoría de los alelos mutantes se pierden por azar, pero la fracción restante termina por fijarse en la población.

Supongamos que  $v$  es la tasa de mutación por gameto y por unidad de tiempo (generación).



Puesto que cada individuo tiene dos juegos de cromosomas, el número total de mutantes nuevos introducidos en cada generación, en una población de  $N$  individuos es  $2Nv$ .

Sea  $u$  la probabilidad con la que un mutante logre la fijación, entonces la tasa  $k$  de sustituciones mutantes por unidad de tiempo viene dada por la ecuación  $k = 2Nvu$ . Es decir, aparecen  $2Nv$  nuevos mutantes en cada generación, de los que la fracción  $u$  logra fijarse, y  $k$  representa la tasa evolutiva en función de las sustituciones mutantes.

La probabilidad  $u$  de fijación es bien conocida en genética de poblaciones. Si el mutante es selectivamente neutro,  $u = 1 / (2N)$ . Cualquiera de los  $2N$  genes de la población tiene la misma probabilidad de fijarse que los demás; por tanto, la probabilidad de que el nuevo mutante sea el gen afortunado es de  $1 / (2N)$ . (Esto supone que se considera el proceso durante un largo período de tiempo). Sustituyendo  $1 / (2N)$  por  $u$  en la ecuación de la tasa evolutiva, se obtiene  $k = v$ . Es decir, la tasa evolutiva en función de las sustituciones mutantes en la población equivale simplemente a la tasa de mutación por gameto, con independencia de cual sea el tamaño de la población.

Esta relación rige sólo para genes neutros. Si el mutante tiene una pequeña ventaja selectiva  $s$ , entonces  $u$  es aproximadamente igual a  $2s$  y la ecuación de la tasa evolutiva se convierte en  $k = 4Nsv$ . Es decir, la tasa evolutiva para los genes con ventaja selectiva depende del tamaño de la población, de la ventaja selectiva y de la proporción en que los mutantes con una ventaja selectiva determinada aparecen en cada generación.

En cuanto al polimorfismo, los neutralistas sostienen que este es selectivamente neutro y que se mantiene en una población mediante el aporte mutacional y la eliminación al azar. Desde el punto de vista neutralista, el polimorfismo y la evolución molecular no son dos fenómenos distintos: el polimorfismo es sólo una fase de la evolución molecular.

Incluso se ha hallado una fuerte correlación entre la variabilidad genética (o polimorfismo) de las proteínas y el peso de sus subunidades moleculares. Esto halla fácil justificación neutralista: cuanto mayor sea el tamaño de una subunidad, más alta será su tasa de mutación. En otras palabras, y como ya se apuntaba más arriba, los neutralistas consideran que las principales causas determinantes del polimorfismo son la estructura y la función molecular; para los seleccionistas, las causas principales son las ambientales.

Para finalizar, decir que ni los neutralistas niegan la selección natural, ni los seleccionistas proscriben el papel de la deriva genética en la misma.

El neutralismo y el reloj molecular.

Un gen o proteína se pueden considerar relojes moleculares, puesto que su tasa de evolución es relativamente constante a lo largo de períodos largos, y toma valores semejantes en distintas especies.

Los neutralistas postulan que esta aparente constancia es incompatible con la noción de que el cambio molecular refleja la acción de la selección natural. Mantienen que de la teoría sintética caben esperar tasas variables de evolución molecular, puesto que la intensidad de la presiones selectivas debe variar temporalmente y de una especie a otra. También opinan que

la mejor justificación del reloj molecular es aceptar que las variaciones se incorporan aleatoriamente al acervo genético, puesto que así el proceso tendrá un ritmo más o menos constante.

La teoría sintética, sin embargo, no obliga a que el ritmo de evolución sea tan irregular como suponen sus críticos. En tanto que la función de un gen o proteína sea la misma en diferentes linajes evolutivos, no tienen por qué sorprender que evolucionen al mismo ritmo, ya que las restricciones a que estará sometido serán las mismas.

Aunque la función fundamental de un gen o proteína no cambie en el transcurso de la evolución, no hay razón alguna para esperar que las fluctuaciones experimentadas por su ritmo evolutivo sean frecuentes o dilatadas. Los enormes espacios de tiempo a lo largo de los cuales se calculan los ritmos de evolución molecular hacen que las fluctuaciones se compensen una con otras, produciéndose así la aparente constancia de ellas. De hecho, existen modelos matemáticos que demuestran que el reloj molecular es compatible con la suposición de que la evolución molecular está regida por selección natural.

La teoría del equilibrio puntuado

EL 23 de noviembre de 1859, el día antes de que el libro de Darwin apareciera en las librerías, este recibió una carta de Thomas Henry Huxley en la que le decía: *"Estoy dispuesto a ir a la pira, si es necesario... estoy afilándome las garras y el pico como preparativo"*. Pero también contenía un aviso: *"Se ha echado sobre los hombros una dificultad innecesaria al adoptar el Natura non facit saltum tan sin reservas"*. La frase latina, atribuida a Linneo, mantiene que la naturaleza no da saltos. Darwin era un estricto seguidor de este lema, a pesar de que el registro fósil de la época no ofrecía apoyo alguno al cambio gradual. Darwin argumentaba que el registro fósil era imperfecto e incompleto: vemos los cambios abruptos porque nos faltan los pasos intermedios.

En las últimas décadas, Niles Eldredge y Stephen Jay Gould se han esforzado por dar la razón a Huxley. La teoría moderna de la evolución no tiene necesidad del gradualismo, y es este el que se debe abandonar, no el darwinismo.

En su caso, la argumentación se refiere a la variación morfológica, y no a la molecular. Mientras que los neutralistas mantienen que el ritmo de evolución es más regular de lo que admite la teoría sintética, los puntualistas sostienen que el ritmo de evolución morfológica es menos regular de lo que esa hipótesis requiere. Los puntualistas niegan que el registro fósil sea incompleto. Sostienen que la aparición súbita de nuevas especies fósiles refleja que su formación se sigue a través de explosiones evolutivas, después de los cuales la especie sufrirá pocos cambios durante millones de años.

Parte de esa aparente persistencia del registro puede ser consecuencia del fenómeno llamado evolución en mosaico, descrito por primera vez por Sir Gavin de Beer: el ritmo de cambio de las diferentes partes de un organismo no es uniforme en el transcurso de la evolución.

La teoría del equilibrio puntuado no sólo se refiere al ritmo de la evolución, sino también a su curso. Eldredge y Gould postulan que la anagénesis (los cambios morfológicos

experimentados por un mismo linaje) y la cladogénesis (la división de una especie en dos) están relacionadas causalmente. Mantienen que se da una breve aceleración del cambio morfológico precisamente cuando una población de censo reducido diverge de su especie original para formar otra nueva. La noción contraria, que los puntualistas atribuyen a la teoría sintética, consiste en que el cambio morfológico gradual lleva consigo su división en razas y subespecies mucho antes de que pueda afirmarse que han surgido especies nuevas.

En realidad, el cambio evolutivo sigue estos dos patrones, y otros muchos. El cambio morfológico y la aparición de mecanismos de aislamiento reproductor son fenómenos diferentes que pueden darse al mismo tiempo o por separado.

En palabras del propio Gould, en su libro de ensayos "*El pulgar del panda*", responde a la pregunta de qué debería mostrar el registro fósil. Las especies deberían resultar estáticas en su territorio porque nuestros fósiles son los restos de grandes poblaciones centrales. En cualquier área local habitada por antecesores, una especie descendiente debería aparecer súbitamente por migración de la región periférica en la que evolucionó. En la propia zona periférica podríamos encontrar evidencias de la especiación, pero tan buena fortuna resultaría marcadamente infrecuente dada la velocidad a la que se produce el evento en una población tan pequeña. Así pues, el registro fósil es una fidedigna representación de lo que predice la teoría evolutiva, y no un pobre vestigio de lo que realmente haya ocurrido.

Eldredge y Gould llamaron a este modelo el de equilibrios puntuados. Las stirpes cambian poco durante la mayor parte de su historia, pero ocasionalmente esta tranquilidad se ve puntuada por rápidos procesos de especiación.

Gould también aclara en este mismo libro que no pretende mantener la verdad única del cambio puntuacional, sino ofrecer otras alternativas al cambio evolutivo. Como él dice, el gradualismo funciona bien en ocasiones.

La selección de genes: "El gen egoísta"

En 1976, el etólogo Richard Dawkins publicó un revolucionario libro, "*El gen egoísta*", en el que se divulgaban las tesis de la sociobiología sentadas anteriormente por E. O. Wilson en su "*Sociobiología*" de 1975.

En 1989, Dawkins sacó de nuevo su libro, con dos nuevos capítulos y notas finales a los capítulos originales, en las que se hace pequeñas autocorrecciones y se defiende de los ataques sufridos tras la primera edición. Vamos a pasar a ver, a grandes rasgos, qué supone esta nueva aportación a la teoría moderna de la evolución.

El propósito de Dawkins es examinar la biología del altruismo y del egoísmo. Demuestra que el factor importante en la evolución no es el bien de la especie o grupo, como tradicionalmente se entiende, sino el bien del individuo o gen. Para él y sus seguidores, los individuos no son más que máquinas creadas por los genes para su supervivencia. En palabras del biólogo americano Butler, la gallina *no es más que un invento del huevo para poder producir más huevos*".

Existe, siempre según Dawkins, una interpretación errónea del altruismo: este se da, según

las ideas tradicionales, por el bien de la especie, lo que se conoce como teoría de selección de grupos, que viene a decir que la selección natural actúa sobre la especie. Un individuo no sería más que un "peón" que se sacrificaría por el bien de la especie.

La alternativa es la selección de genes (o selección de individuo): los individuos altruistas llegan a extinguirse en beneficio de los egoístas, que predominarán en el grupo. Los genes han construido una gran variedad de "máquinas" para prosperar explotándolas, de modo que un gen puede ser considerado como una unidad que sobrevive a través de un gran número de cuerpos sucesivos e individuales. Así, un gen es definido como una porción de material cromosómico que, potencialmente, permanece durante suficientes generaciones como para servir como una unidad de selección natural. El individuo es demasiado grande y efímero como para ser considerado unidad de selección. Un gen es considerado bueno, es decir, que permanece muchas generaciones, si vela por sí mismo, si es egoísta. La evolución será el proceso por el que algunos genes se hacen más numerosos y otros disminuyen en el acervo genético.

Todos los genes controlan el comportamiento de su máquina de supervivencia, no de manera directa, sino indirectamente. Los genes preparan la máquina con antelación, y luego esta se haya bajo su propia responsabilidad. Los genes obran a largo plazo mediante la síntesis proteica, pero se trata de un proceso lento. Por tanto, los genes construyen su máquina por anticipado, de la mejor forma posible y programándola con antelación.

Por tanto, el comportamiento está regido por el egoísmo de los genes de cada organismo, y no por el altruismo de cada individuo con respecto a los demás miembros de su especie. Dawkins se encarga de demostrar esto a lo largo de todo el libro con numerosos comportamientos particulares.

En cuanto al hombre, para él es el único organismo capaz de hacer frente y llevar la contraria a los dictados de los genes egoístas, gracias a nuestra consciencia: *"sólo el hombre puede revelarse contra la tiranía de los replicadores egoístas"*. La mayoría de las características que resultan inusitadas en el hombre se deben a la cultura, que Dawkins también pretende tratar como una unidad de transmisión, aunque con unos mecanismos particulares.

En sus propias palabras, para una comprensión del hombre moderno se debe descartar al gen como única base de nuestras ideas sobre la evolución, también estaría la cultura; el darwinismo es una teoría demasiado amplia como para ser confinada en el estrecho contexto del gen. La cultura actúa como un replicador que se instaaura en el cerebro y persiste generación tras generación parasitándolo.

En uno de los nuevos capítulos de su libro, resume su posterior obra, *"The Extended Phenotype"*. Desde su punto de vista, la selección darwiniana no actúa directamente sobre los genes. Aquí es donde entra el concepto de fenotipo ampliado: los efectos fenotípicos de un gen deben considerarse como todos los efectos que tiene sobre el mundo, efectos sobre sí mismo, sobre otros genes, sobre la maquinaria que los porta, sobre otros organismos e, incluso, sobre el mundo inerte, como Dawkins se encarga de ilustrar en múltiples casos reales. El efecto de un gen depende de una cascada determinada de síntesis de proteínas que,

al final, desemboca en el fenotipo deseado.

## La especie y los mecanismos de aislamiento reproductivo

Aunque las especies son identificadas en la vida cotidiana por su apariencia, hay algo fundamental a tener en cuenta para su distinción: los individuos de una misma especie son capaces de cruzarse entre sí, pero no con individuos de otras especies diferentes.

Aunque el aislamiento reproductivo es un criterio claro para decidir si dos individuos pertenecen a la misma especie, se dan ambigüedades en la práctica por dos razones. La primera, es que veces no se sabe si individuos que viven en distintas regiones pertenecen a la misma especie, porque se desconoce si podrían cruzarse. La segunda razón se relaciona con el criterio de la evolución gradual: el origen de nuevas especies ocurre cuando dos poblaciones que antes pertenecían a la misma especie, divergen una de la otras y se convierten en dos especies diferentes; pero el proceso es gradual, y no hay un momento exacto en que se pueda decir que ambas poblaciones son ya dos especies diferentes. De este modo, se dan situaciones intermedias de divergencia.

El origen de una nueva especie implica la evolución de mecanismos o barreras biológicas que impidan el entrecruzamiento con individuos de otras especies. Las propiedades biológicas que impiden el apareamiento se llaman mecanismos de aislamiento reproductivo, y se pueden clasificar en dos grupos:

precigóticos, aquellos que impiden la fecundación del óvulo, y que pueden ser ecológicos, estacionales, conductuales, mecánicos y gaméticos;

postcigóticos, los que interfieren en el desarrollo del individuo o lo hacen estéril, de manera que no pueda dejar descendencia, pudiendo ser la inviabilidad y la esterilidad de los híbridos.

1. Aislamiento ecológico. A veces, individuos que ocupan el mismo territorio viven en diferentes hábitats y, por tanto, no tienen oportunidad de cruzarse. Por ejemplo, varias especies morfológicamente indistinguibles del mosquito *Anopheles*, que están aisladas por sus diferentes hábitats (aguas salobres, dulces y estancadas).

2. Aislamiento estacional. Los organismos pueden madurar sexualmente en diferentes estaciones o horas del día.

3. Aislamiento conductual. La atracción entre machos y hembras, o entre gametos masculinos y femeninos, en el caso de plantas y organismos acuáticos, es necesaria para que se produzca la unión sexual.

Entre los animales es, quizá, el más poderoso. Por ejemplo, existen tres especies gemelas de *Drosophila*, casi indistinguibles morfológicamente (*D. serrata*, *D. birchii* y *D. dominicana*), nativas de Australia, Nueva Guinea y Nueva Bretaña, que en muchas regiones coexisten geográficamente. A pesar de su semejanza genética y proximidad evolutiva, no existen híbridos en la naturaleza.

La fuerza del aislamiento ecológico entre las especies gemelas ha sido comprobada en el

laboratorio agrupando machos y hembras de diferentes especies.

4. Aislamiento mecánico. La cópula es a veces imposible entre individuos de diferentes especies, ya sea por el tamaño incompatible de sus genitales, o por variaciones en la estructura floral.

5. Aislamiento gamético. En los animales con fecundación interna los espermatozoides son inviables en los conductos sexuales de las hembras de diferentes especies. En las plantas, los granos de polen de una especie generalmente no pueden germinar en el estigma de otra.

6. Aislamiento postcigótico. Los MAR que actúan tras la formación del cigoto pueden ser clasificados en diferentes categorías: inviabilidad, esterilidad y reducción de ambas. Por ejemplo, los embriones de borrego y vaca mueren en estados incipientes de desarrollo. La inviabilidad de los híbridos es común en plantas, cuyas semillas híbridas no germinan.

### Modelos de especiación

Una especie está formada por grupos de organismos (poblaciones) que están reproductivamente aislados de individuos de otras especies. Por tanto, la cuestión del origen de las especies se centra en determinar cómo se genera el aislamiento reproductivo. Para ello, se han propuesto dos teorías:

La teoría incidental considera que dos poblaciones que están separadas divergen genéticamente como consecuencia de su adaptación al entorno local.

La teoría selectiva considera el aislamiento reproductivo como un producto directo de la selección. En el caso de que dos poblaciones estén ya genéticamente un tanto diferenciadas, los híbridos estarán menos adaptados que los no híbridos.

Las dos teorías anteriores no son necesariamente incompatibles. El aislamiento reproductivo puede aparecer como subproducto accidental de las barreras geográficas y de la adaptación a los medios diferentes. En otras ocasiones se requiere de una explicación por ambas teorías. El aislamiento reproductivo se inicia como consecuencia de la divergencia genética que tiene lugar en poblaciones geográficamente separadas; pero es completado por la selección natural una vez que surge de nuevo la oportunidad de apareamiento, cuando los híbridos tienen baja eficacia biológica.

La ausencia de flujo genético hace posible que las dos poblaciones se diferencien genéticamente como consecuencia de la adaptación y de la deriva genética.

### La dinámica genética de las poblaciones en evolución

Mientras la investigación en citogenética y mutaciones tenía a los individuos como objeto de estudio, las poblaciones ocupaban un lugar central en los estudios dirigidos a explicar, partiendo de las leyes de Mendel, el cambio evolutivo de las comunidades de apareamiento. En el año 1908 se formuló un descubrimiento importante, por partida doble e independientemente: el matemático Hardy en Gran Bretaña y el antropólogo Weinberg en Alemania demostraron que la composición genética de una población permanece en

equilibrio mientras no actúen ni la selección ni ningún otro factor y no se produzca mutación alguna. A pesar de la mezcla de genes que supone la reproducción sexual, la persistente reorganización de estos en este tipo de reproducción no cambia la frecuencia de estos en las sucesivas generaciones. Es decir, la herencia mendeliana, por sí misma, no engendra cambio evolutivo, no es un mecanismo de alteración de las frecuencias de los genes en las poblaciones. Este principio es conocido como equilibrio Hardy-Weinberg.

La alteración genética de una población sólo puede darse por factores como mutaciones, selección, influencias casuales, convergencias o divergencias individuales. El cambio genético que surja significa la perturbación del equilibrio. Con estos conceptos quedaron instalados los cimientos de la genética de poblaciones, que no sería desarrollada hasta Chetverikov (1926) y Fisher, Sewall Wright y Haldane en los años 1930 - 32. Desde este momento, influiría también en la teoría de la evolución.

La demostración de este equilibrio es sencilla, como se muestra a continuación, e implica que las frecuencias génicas (la frecuencia de cada gen o alelo) permanecen constantes de generación en generación, siempre que la población cumpla las siguientes condiciones ideales:

- Ser lo suficientemente amplia como para que todos los cambios que se produzcan en ella sigan las leyes de la estadística. Tampoco debe existir inmigración ni emigración.
- Los organismos componentes de esa población han de ser diploides y de reproducción al azar (panmixia).
- En esta población no hay mutaciones ni selección natural, de modo que los individuos tienen las mismas probabilidades de reproducirse, independientemente de sus genotipos.

Para una explicación más práctica, vamos a tomar un ejemplo real, el de la enfermedad metabólica hereditaria denominada fenilcetonuria. (Los conocimientos previos para entender esto se reducen a dominar las leyes de Mendel y algo de aritmética y probabilidad).

Los niños con fenilcetonuria no pueden procesar un aminoácido de las proteínas llamada la fenilalanina. Como resultado, la fenilalanina se acumula en el torrente sanguíneo y causa daño cerebral y retraso mental. Los individuos con fenilcetonuria deben permanecer con una dieta restringida a través de la niñez y la adolescencia, y quizás también a través de toda su vida. En Europa, uno de cada 10.000 nacidos la padecen: su incidencia es del 00001 (o del 001%).

La enfermedad la provoca un gen recesivo cuando se da una situación de homocigosis aa. Vamos a expresar la frecuencia del gen sano como p y la del gen "*defectuso*" como q, y calcularemos la incidencia de los portadores de la combinación aa. (Obviamente,  $p + q = 1$ ).

Si realizamos un cruzamiento de dos portadores Aa, en donde permanece oculto el gen recesivo, los genotipos obtenidos en la siguiente generación serán los siguientes (p y q reciben el nombre de frecuencias génicas, mientras que las frecuencias de los genotipos AA, Aa y aa se llaman frecuencias genotípicas):

Los tres genotipos AA : Aa : aa aparecen en una relación  $p^2 : 2pq : q^2$ . Si las sumamos, nos daría de nuevo la unidad:

$$p^2 + 2pq + q^2 = (p + q)^2 = 1.$$

La frecuencia de los genotipos enfermos de fenilcetonuria era 00001. Este valor corresponde a  $q^2$ . La frecuencia  $q$  del gen  $a$  será la raíz cuadrada de 00001, es decir, 001. La enfermedad tiene una incidencia de 1 cada 10.000 individuos, pero la frecuencia del gen es 100 veces mayor, 1 cada 100. ¿Dónde, entonces, se ocultan los genes  $a$ ? Se encuentran en el par  $Aa$  con una frecuencia

$$2pq = 2q(1 - q) = 2 \cdot 001 \cdot (1 - 001) = 002.$$

Esto quiere decir que un 2% de todos los individuos de la población europea portan este peligroso gen: ¡uno de cada cincuenta!

Este ejemplo nos da una idea de lo persistente que puede llegar a ser un gen recesivo manteniéndose "*clandestino*" en heterocigosidad.

Mediante cálculos similares, igualmente sencillos, se puede demostrar que en una población de este tipo, en sucesivos cruzamientos las frecuencias génicas siguen manteniéndose constantes. Es lo que arriba se mencionaba como equilibrio Hardy-Weimberg. Se puede demostrar igualmente que resulta muy difícil reducir la frecuencia de estos genes recesivos en valores significativos. Puedes ver el enlace de la University of Tennessee at Martin, en donde podrás simular lo que ocurre en varias generaciones con las frecuencias alélicas en un caso de selección natural, aunque deberás instruirte algo antes en el tema. Allí mismo te ayudarán.

El apareamiento aleatorio es un supuesto razonable, pero en la realidad este no existe en la mayoría de los casos, ya que siempre hay algún tipo de selección de pareja.

Está claro que una población de este tipo no existe en la naturaleza, pero sirve de punto de partida para el estudio de otras leyes: los organismos están sujetos a mutación, selección o otros procesos que cambian las frecuencias génicas, pero los efectos de estos procesos pueden ser medidos a partir de sus desviaciones de la ley de equilibrio.

Consecuencias de la mutación.

Las variantes hereditarias que posibilitan la evolución surgen por el proceso de mutación. Pero este es un proceso muy lento, debido a que las tasas de mutación son muy bajas. Veamos un ejemplo.

Consideremos un alelo  $A$  que se convierte en  $B$  por mutación a una tasa del 1 por 100.000, que es típica de muchos genes (en cada generación una cienmilésima de todos los alelos  $A$  se convierte en  $B$ ). Si en un momento dado, la frecuencia del alelo  $A$  es 010, en la generación siguiente será del 00999999, un cambio pequeñísimo. Y así sucesivamente.

La fracción del alelo que cambia es siempre la misma; pero como la frecuencia del alelo es cada vez menor, el efecto de la mutación se va reduciendo de generación en generación. En



nuestro caso, se requieren 10.000 generaciones para que la frecuencia del alelo A se reduzca de 01 a 009.

Por otra parte, las mutaciones son reversibles: el alelo B también puede mutar a A. La frecuencia de los alelos cambiará aún más lentamente.

De todo esto se deduce que la mutación, aunque tiene su contribución, no es fuerza suficiente para impulsar todo el proceso evolutivo. Las frecuencias de los genes están determinadas por la interacción entre mutación y selección.

La migración genética.

La migración, en el sentido genético, implica que los organismos (o sus gametos o semillas) que van de un lugar a otro se entrecruzan con los individuos de la población a la que llegan. Por eso la migración se llama flujo genético.

En este caso, lo que cambian son las frecuencias génicas de una localidad dada, si es el caso que las frecuencias de los emigrantes y de los residentes no son iguales.

La deriva genética.

Las frecuencias génicas pueden cambiar por razones puramente aleatorias, lo que se llama deriva genética, debido a que cualquier población consta de un número finito de individuos. La frecuencia de un gen puede por ello cambiar de una generación a otra gracias a lo que se llaman errores de muestreo, ya que de todos los genes de la población sólo una pequeñísima fracción pasará a la siguiente (por lo mismo también es posible que salgan más de 50 caras al lanzar una moneda 100 veces).

Si en una población de 1.000 individuos, la frecuencia de *a* es 05 en una generación, en la siguiente generación puede ser, por azar, de 0505 ó de 0493, a causa de la producción fortuita de unos pocos más o unos pocos menos descendientes de cada genotipo. En la segunda generación habrá otro error de muestreo, que ahora trabaja sobre la nueva frecuencia génica, así que la frecuencia de *a* puede llegar de 0505 hasta 0511 ó bajar a 0498. Este proceso de fluctuación aleatoria continúa de generación en generación, sin que ninguna fuerza empuje a la frecuencia *a* a retornar a su valor original. De este modo, el resultado final es que la deriva provoca que las frecuencias génicas sean  $p=1$  ó  $q=1$  ( $q=0$  ó  $p=1$ , respectivamente). Tras este final, ya no es posible ningún cambio: la población se ha hecho homocigótica. Una población aislada a partir de la primera también sufre esta deriva genética aleatoria, pero en lugar de hacerse homocigótica para el gen A, puede hacerse para el gen *a*. A medida que el tiempo transcurre, las poblaciones aisladas divergen entre ellas, perdiéndose heterocigosidad: la variación que aparecía en las poblaciones aparece ahora entre poblaciones.

En una página personal de la University of Tennessee at Martin hay una interesante utilidad para simular cómo progresan las frecuencias génicas con el número de generaciones de una población. Verás que en pocas generaciones se llega a  $p=1$  ó  $q=1$ .

Cuanto mayor sea el número de individuos de la población, menor será la diferencia entre

las frecuencias de una generación y otra, aunque lo que cuenta no es el número real de individuos, sino lo que se llama tamaño eficaz. El tamaño eficaz de una población se define por aquellos individuos que dejan descendientes, que en el caso de casi todos los organismos puede ser un número mucho menor que el total de individuos (sólo los individuos reproductores transmiten sus genes).

Si no hubiera otros procesos de cambio evolutivo, tales como la mutación y la selección natural, las poblaciones llegarían al final a tener un solo alelo de cada gen, aunque se tardase muchas generaciones en llegar a ello. La razón es que, tarde o temprano, uno u otro alelo sería eliminado por la deriva genética sin posibilidad de que reapareciera por mutación o migración. Debido a la mutación los alelos desaparecidos de una población pueden reaparecer de nuevo, y gracias a la selección natural, la deriva genética no tiene consecuencias importantes en la evolución de las especies, excepto en poblaciones de pocos individuos.

Una situación extrema de deriva genética se da cuando se establece una nueva población a partir de pocos individuos, cuando una población pequeña se separa de otra original más grande. Es lo que Ernst Mayr ha llamado efecto fundador. Es lo que ocurre en numerosas islas oceánicas, con poblaciones numerosísimas establecidas por muy pocos individuos. Las frecuencias de muchos genes pueden ser diferentes en los pocos colonizadores y en la población de la que proceden, y ello puede tener efectos duraderos en la evolución de tales poblaciones aisladas. Sería un caso de "*deriva aguda*", el resultado de una única generación de muestreo, seguida de varias generaciones durante las cuales la población sigue siendo pequeña.

El efecto fundador es, probablemente, responsable de la práctica ausencia de grupo sanguíneo B entre las poblaciones de indios de América, cuyos antecesores llegaron en números muy pequeños a través del Estrecho de Behring hace unos 10.000 años. Ejemplos más recientes se pueden ver en grupos religiosos aislados, como los Dunkers y los Amish de Norteamérica. Estas sectas fueron fundadas por pequeños grupos de emigrantes, procedentes de congregaciones mucho más amplias de Europa Central. Desde entonces han estado prácticamente cerradas a la inmigración de poblaciones procedentes de su entorno. El resultado es que, por ejemplo, sus frecuencias en los grupos sanguíneos son totalmente diferentes a las de las poblaciones de Europa y Norteamérica.

Para comprobar la deriva genética y sus consecuencias se realizó en su época el siguiente experimento. De una misma población de *Drosophila* que vivía en libertad se seleccionaron, por diez veces consecutivas, 20 fundadoras a las que se encerró en jaulas. Estas subpoblaciones dieron lugar a poblaciones muy divergentes entre sí en cuanto a caracteres y cualidades. Se repitió el experimento seleccionando esta vez 4.000 individuos otras 10 veces; las poblaciones resultantes apenas presentaban diferencias entre sí y con la población inicial. Esto es precisamente lo que ya sospechaba Darwin con los pinzones de las Galápagos, de los cuales intuía que debían proceder de muy pocos individuos o de tan solo una pareja.

Un resultado del muestreo aleatorio es que la mayoría de las nuevas mutaciones, incluso si no hay selección contra ellas, nunca logran fijarse en la población. Supongamos que un

individuo particular es heterocigoto para una nueva mutación; existe alguna probabilidad de que este individuo no deje descendencia, incluso, si la dejara, la probabilidad de que la nueva mutación no se transmita sería de  $\frac{1}{2}$ . Si el individuo deja dos descendientes, la probabilidad de que ninguno de ellos lleve la nueva mutación es de  $\frac{1}{4}$ , y así sucesivamente. Pero supongamos que la nueva mutación se transmite con éxito a algún descendiente; entonces la "lotería" se repite en la siguiente generación, y de nuevo se puede perder el alelo. De hecho, si la población es de tamaño  $N$ , la probabilidad de que la mutación nueva se pierda por azar es

$$(2N - 1)/2N$$

Pero si la nueva mutación no se pierde, entonces lo único que puede ocurrirle a una población finita es que, finalmente, llegue a fijarse con una probabilidad de  $\frac{1}{2N}$

El proceso es prácticamente idéntico aunque la nueva mutación presente cierta ventaja selectiva, siempre que la población sea de tamaño limitado.

Variaciones aleatorias en las frecuencias alélicas similares a las debidas al efecto fundador tienen lugar cuando las poblaciones pasa a través de un cuello de botella. Cuando el clima u otras condiciones son desfavorables, es posible que las poblaciones reduzcan de manera drástica sus efectivos y corran el riesgo de extinguirse. Más tarde, tales poblaciones pueden recobrar su tamaño original, pero la deriva quizás alteraría considerablemente sus frecuencias alélicas durante el cuello de botella. Este fenómeno parece que es el ocurrido con el ser humano y alguno de sus antecesores: la variabilidad genética de la que gozamos es tan increíblemente pequeña en comparación con el de gorilas y chimpancés, por ejemplo, que todo hace pensar que, en algún momento de nuestra evolución, el número de individuos se vio reducido tan drásticamente, por la causa que fuese, que las frecuencias de alélicas cambiaron radicalmente por perderse una buena parte del patrimonio genético original. Más información a este respecto la puedes encontrar en un documento de la Universidad de Michigan firmado por Diane Swanbrow.

### Los tipos de selección natural

Si observamos cualquier población, cualquier miembro está adaptado casi perfectamente a su biotopo. El grado ideal de adaptación es el que presentan la mayoría de los individuos; constituye la media. Sólo unos pocos se desvían a uno y otro lado de esa media, y cuanto mayor sea la desviación, menor será el número de individuos que la presenten. Esta idea se puede representar mediante una curva de Gauss con forma de campana.

Cuando aparecen mutaciones en la población, estas lo hacen sin ninguna orientación concreta, generando nuevos caracteres que se desvían constantemente de la media, de modo que la curva se aplana y se ensancha. Este fenómeno se llama presión de mutación y su influencia consiste en ir disminuyendo la frecuencia relativa de los individuos más aptos.

Pero estas desviaciones son controladas por la selección. Los individuos que se apartan de la media son generalmente eliminados, y más cuanto mayor sea su desviación. La curva vuelve a estrecharse y a hacerse más alta. A esto se le llama presión selectiva. La selección tiende a

mantener un nivel óptimo asegurando los logros conseguidos durante generaciones y eliminando los individuos divergentes. Este aspecto fundamental de la selección recibe el nombre de selección estabilizadora, estableciéndose un equilibrio entre mutación y selección.

Este rigor selectivo en contra de la mutación se da, sobre todo, en medios poco cambiantes. Es lo que ocurre con los llamados "*fósiles vivientes*" de los que ya habló Darwin. Es el caso de los árboles ginkgo, la araucaria y las secuoyas gigantes; también el caracol *Neopilina*, descubierto en 1951 a 3500 metros de profundidad, el celacanto, que se creía extinto hasta que se redescubrió en las islas Comores, y el nautilo o los cangrejos cacerola de las Molucas. Todos ellos existen prácticamente sin variación alguna desde hace millones de años, dato que nos proporciona el registro fósil. Impresionante es el caso del lagarto tuátera, que vive en algunas islas de Nueva Zelanda, y que apenas ha experimentado cambios desde hace 170 millones de años. Toda la región australiana es rica en este tipo de seres, ya que quedó aislada hace 65 millones de años del resto del mundo.

El hecho de que algunos animales sean ciegos o tengan una piel pálida también se relaciona con la selección estabilizadora. Cuando estos animales desplazaron su hábitat a las cavernas, la selección dejó de ejercer presión sobre estos caracteres: ni el color de la piel tenía sentido para el camuflaje, por ejemplo, ni la vista era muy necesaria, de modo que la presión de mutación tomó la delantera. Estos caracteres suelen estar regidos por varios genes y un cambio en uno solo de ellos provoca la atrofia de todo el órgano. La presión de mutación también favoreció en estos seres el desarrollo de nuevas estructuras, como largos tentáculos, pelos sensibles y líneas laterales en los peces.

Cuando se produce la alteración en el medio ambiente, los organismos favorecidos son precisamente esos que se desvían de la media. La selección ejerce en estos casos una presión direccional más o menos fuerte y desplaza la media hacia una mayor adaptación a las nuevas circunstancias. Van siendo eliminados ciertos alelos que habían sido útiles y se van fijando otros que son más convenientes. El patrimonio genético cambia y se produce el proceso evolutivo. Se trata de una selección transformadora: es una selección direccional y progresivamente modificadora. Como se originan nuevas combinaciones de genes y nuevas especies se dice que la selección es en este caso creadora. Pero resulta imprescindible que para que esto ocurra se produzcan cambios en el medio ambiente.

La selección sexual es una forma especial de selección natural. De la misma manera que en otros casos, los organismos más eficaces para asegurarse su pareja consiguen con ello una mayor adecuación.

Hay dos circunstancias generales que conducen a la selección sexual: una es la preferencia de un sexo (frecuentemente las hembras) por individuos del sexo opuesto que presentan determinadas características; la otra es el aumento en fortaleza (usualmente entre los machos) que les permite el éxito en el apareamiento.

En los enlaces siguientes verás algunos casos reales de adaptación, selección natural y poblaciones.

Ejemplos de selección a la luz de la genética de poblaciones hay muchos. Todos se explican

bajo el concepto de eficacia biológica, que se entiende como eficacia media de un genotipo en una población, nunca en un individuo concreto. Aunque no vamos a entrar en ello, para la matematización de esta cuestión se ha recurrido a la eficacia biológica independiente de la frecuencia. En la realidad, sin embargo, un número muy alto de procesos selectivos dependen de las frecuencias génicas, de modo que esto se debe tener en cuenta y *"no confundir la conveniencia con la realidad"*.

Podemos ver cómo los numerosos errores congénitos del metabolismo se dan porque un alelo recesivo interfiere una ruta metabólica y causa la letalidad de los homocigotos. Son casos que sirven para ilustrar las diferencias en eficacias biológicas provocadas por la sustitución de un gen. Citaremos la fenilcetonuria, mencionada más arriba, y la enfermedad de Wilson (en la que la muerte resulta por intoxicación con cobre, debido a que la ruta de destoxificación está interrumpida).

Un caso que ilustra la relación entre la eficacia biológica y el ambiente es el de la anemia falciforme. Una sustitución alélica en el locus del gen estructural de la cadena b de la hemoglobina (la hemoglobina, Hb, está formada por cuatro polipéptidos, dos de ellos reciben el nombre de cadenas a y los otros dos, b), provoca la sustitución por valina del ácido glutámico normal en posición 6. La hemoglobina anormal cristaliza a bajas presiones de oxígeno, y los glóbulos rojos se deforma y se hemolisan. Los homocigotos HbSHbS presentan una anemia grave con supervivencia baja; los heterocigotos HbAHbS presentan una anemia leve y, bajo circunstancias normales, presentan la misma eficacia biológica que los homocigotos normales HbAHbA. Sin embargo, en las regiones de África con una incidencia alta de paludismo, los heterocigotos presentan una eficacia biológica mayor que los homocigotos normales, porque la presencia de alguna cantidad de hemoglobina falciforme protege de alguna manera frente al protozoo del paludismo. Donde no hay paludismo, se pierde eficacia biológica.

### Pruebas de la evolución

Las pruebas acumuladas a favor de la evolución por todas las disciplinas biológicas han aumentado con el avance científico, llegando a ser aplastantes. En particular, la biología molecular, la más reciente y expansiva de las disciplinas biológicas, ha confirmado de manera contundente la evolución y muchos detalles de su historia. Pasamos a ver algunos ejemplos de las evidencias que demuestran la evolución.

El registro fósil. El registro fósil nos muestra que muchos tipos de organismos extintos fueron muy diferentes de los actuales, así como la sucesión de organismos en el tiempo, y además permite mostrar los estadios de transición de unas formas a otras.

Cuando un organismo muere, sus restos son prácticamente destruidos por las bacterias y los agentes físicos. Rara vez algún resto blando deja su huella, pero a veces ocurre (algunas medusas han dejados "*huellas*" de más de 500 millones de años). Del mismo modo, en raras ocasiones las partes duras, como huesos, dientes, conchas, etc. enterradas en el lodo, son protegidas por este de la acción bacteriana. Estos restos petrifican (mineralizan, fosilizan) en asociación con las rocas vecinas en las que están incrustados.

Los métodos de datación radiactiva dan una edad para la Tierra de 4.500 millones de años, y los primeros fósiles datan de 3.600 millones de años, correspondientes a la actividad de bacterias y cianobacterias (los llamados estromatolitos).

Los primeros fósiles de animales datan de 700 m. a., y la mayoría de los phyla actuales aparecieron hace 570 m. a. Los primeros vertebrados aparecieron hace 400 m. a. y los mamíferos lo hicieron hace 200 m. a.

El ámbar, popular por su utilización como argumento cinematográfico en una película de gran difusión, es también un fósil. En este caso se han fosilizado resinas de árboles que, en su discurrir por el tronco, a veces atrapaban insectos, que quedaban incluidos permanentemente en ellos. Como el de la fotografía. El registro fósil, sin embargo, es incompleto: de la pequeñísima parte de organismo que han dado lugar a fósiles, sólo una fracción de ellos ha sido descubierta, y menor aún es el número de ejemplares estudiado por los paleontólogos.

En muchos casos se ha reconstruido el registro fósil completo de algún animal. Es el caso del caballo.

El registro conocido comienza con Hyracotherium, del tamaño de un perro, con varios dedos en cada pata y dentición para ramonear, que aparece hace 50 millones de años, y finaliza con Equus, el caballo actual, mucho más grande, con solo un dedo por pata y dentadura apropiada para pastar. Se conservan muchas formas intermedias, así como otras formas que evolucionaron hacia otras ramas que no han dejado descendientes actuales.

Otro ejemplo, es el de la mandíbula de los reptiles. Está formada por varios huesos; la de los mamíferos es de una sola pieza; los otros huesos de la mandíbula de los reptiles evolucionaron hasta convertirse en los que ahora forman parte del oído de los mamíferos. Esto puede parecer inverosímil, ya que es difícil imaginar las funciones intermedias de estos huesos. En respuesta a esto, se han descubierto dos tipos de terápsido (reptil de forma parecida a la de los mamíferos actuales) con una doble articulación mandibular: una compuesta de los huesos que persiste en la mandíbula mamífera y la otra por los huesos cuadrado y articular que, eventualmente, dieron lugar al martillo y al yunque del oído de los mamíferos.

Semejanzas anatómicas. El proceso de evolución consiste en la transformación de unos organismos en otros, que, por ser esta gradual (al menos, en una de las concepciones del cambio evolutivo), permite reconocer las relaciones de parentesco entre especies descendientes de un mismo antepasado. Especies con un ancestro común reciente son anatómicamente más semejantes entre sí que respecto a otras especies más alejadas. A medida que transcurre el tiempo las semejanzas anatómicas se van diluyendo y pueden llegar a ser irreconocibles. Sin embargo, en el nivel molecular, las semejanzas son reconocibles aunque hayan transcurrido millones de años.

Aquí se incluye los estudios anatómicos sobre órganos homólogos, es decir, órganos con diferentes funciones pero que revelan la misma estructura anatómica y, por consiguiente, el mismo origen.

Desarrollo embrionario y atavismos. Todos los vertebrados, desde los peces hasta las lagartijas y el hombre, se desarrollan de manera bastante similar en las etapas iniciales de su ontogenia, y se van diferenciando cada vez más a medida que el desarrollo embrionario va avanzando al estado adulto.

¿Cómo explicar este hecho? La respuesta es que estos patrones han sido heredados de su ancestro común, es decir, existen unos genes comunes que regulan el desarrollo embrionario y cuyos efectos van diferenciándose conforme este avanza. Por ejemplo, los embriones humanos y de otros vertebrados terrestres presentan aberturas branquiales, y los embriones humanos presentan durante su cuarta semana de desarrollo una cola bien definida.

Algunos rudimentos embrionarios persisten como vestigios, o atavismos, en el organismo adulto, como el caso del rudimento de cola en el hombre. El órgano rudimentarios más conocido en el hombre es el apéndice vermiforme, que es un vestigio sin función de un órgano que se desarrolla completamente en mamíferos como el conejo u otros herbívoros, en los que el cecum y su apéndice son grandes y almacenan celulosa para digerirla con bacterias.

Biogeografía. Una de las observaciones que convenció a Darwin de la evolución de las especies fue su distribución geográfica, como en el caso de los pinzones de las Galápagos. Otro ejemplo estudiado es el de las moscas *Drosophila*, de las que existen unas 1500 especies, 500 de ellas en las islas Hawai. Hay también en estas islas más de 100 especies de moluscos terrestres que no existen en ninguna otra parte del mundo.

La inusual diversidad de especies en algunos archipiélagos se explica con facilidad como producto de la evolución. Estas islas se encuentran muy alejadas de los continentes y de otros archipiélagos, por lo que muy pocos colonizadores pudieron llegar a ellas. Pero las especies que llegaron encontraron muchos nichos ecológicos desocupados, sin especies competidoras o depredadoras que limitaran su multiplicación. En respuesta a esta situación, las especies se diversificaron con rapidez, en un proceso que se llama radiación adaptativa (diversificación de especies que ocupan nichos ecológicos preexistentes).

En referencia a este punto, y con respecto al caso de los pinzones de las Galápagos, quizá una sola pareja de ellos, o una pequeña bandada, llegó a la isla. Se asentaron allí, alimentándose de semillas y bayas igual que hacían en tierra firme. Y lo que es más importante: allí no existían depredadores ni se daba competencia alguna por los alimentos. Además, existía una amplia variedad de nichos ecológicos, sobre todo porque los insectos se había reproducido masivamente por las mismas causas.

Los valles, las elevadas formaciones rocosas y los propios límites de las costas favorecieron la separación de poblaciones. Así, tras una rápida proliferación, empezó a dejarse sentir una competencia por el alimento,, los pinzones se dividieron en grupos y se separaron unos de otros.

De este modo, en aislamiento genético, comenzó un procesos de especialización que, a su vez, dio lugar a nuevos procesos de separación. Algunos grupos permanecieron en el suelo y otros se alojaron en las ramas de los árboles; muchos se transformaron en insectívoros y otros hasta utilizan púas de cactus para escarbar en las grietas en busca de larvas. Alguna pareja se "*atrevió*" a cruzar a las islas vecinas, convirtiéndose en "*fundadora*" de nuevas poblaciones que sufrirían los mismo procesos.

Así fue como llegaron a formarse las 13 especies actuales de pinzones que habitan en las Islas Galápagos, que actualmente constituyen una subfamilia propia: Geospiza.

Biología molecular. Existe una gran uniformidad en los componentes moleculares de los seres vivos. Tanto en las bacterias y otros microorganismos como en organismos superiores (vegetales y animales), la información está expresada como secuencias de nucleótidos, que se traducen en proteínas formadas por los mismos veinte aminoácidos.

Esta uniformidad de las estructuras moleculares revela la existencia de ancestros comunes para todos los organismos y la continuidad genética de estos.

Imaginemos el siguiente supuesto: una determinada población de una especie sufre una escisión de un número pequeño de sus componentes. Lo que en un principio era un patrimonio genético común (la mezcla hacía "*homogéneo*" ese *patrimonio*") va a convertirse en el comienzo de un divergencia, ya que con el tiempo, la nueva población va acumulando cambio que la harán diferente de la primera. La divergencia guardará correlación con el tiempo de su separación. Podemos usar esta divergencia para averiguar el parentesco entre dos especies. Bien es cierto que no todo el ADN evoluciona a la misma velocidad: las secuencias no codificantes lo hacen más deprisa. Por eso es importante elegir el ADN adecuado.

Las evidencias de evolución reveladas por la biología molecular son aún más concisas, ya que el grado de similitud entre secuencias de nucleótidos o de aminoácidos puede ser determinado con precisión. Por ejemplo, el citocromo c de humanos y chimpancé está formado por 104 aminoácidos, exactamente los mismos y en el mismo orden. El citocromo del mono Rhesus sólo difiere del de los humanos en un aminoácido de los 104; el del caballo en 11 aminoácidos; y el del atún en 21. El grado de similitud refleja la proximidad del ancestro común, lo cual permite reconstruir la filogenia de estos organismos.

La secuenciación de ADN ha demostrado que el chimpancé es nuestro pariente actual más cercano: su ADN difiere del nuestro en sólo un 25%.

El registro molecular de la evolución.



Con las modernas técnicas en biología molecular es posible estudiar la evolución en el nivel más íntimo en que se produce: el ADN.

El ADN contiene información sobre la historia evolutiva del organismo, debido a que los genes cambian por mutaciones. Dado que la evolución tiene lugar paso a paso, el número de sustituciones en el ADN refleja la duración del período evolutivo correspondiente.

Si comparamos dos organismos, como el hombre y el chimpancé, y observamos que el número de diferencias de su ADN es menor que el que hay entre cualquiera de ellos y el orangután, podemos concluir que la divergencia entre estas dos especies es más reciente que entre ellas y el orangután. Es decir, el número de diferencias en las cadenas de ADN o de proteínas es proporcional a la distancia evolutiva existente entre las especies correspondientes.

Los estudios moleculares tienen ventajas notables sobre la anatomía comparada y otras disciplinas clásicas:

1. La información es más fácil de cuantificar: el número de elementos diferentes puede ser exactamente determinado comparando las cadenas de ADN o de proteína entre dos especies.
2. Es posible hacer comparaciones entre individuos muy diversos. La anatomía comparada es totalmente inadecuada para determinar el grado de diferenciación entre especies tan diferentes como una levadura, un madroño y una liebre, pero es perfectamente posible medir sus diferencias en una molécula determinada, como el citocromo c.
3. El número de características que se puede comparar es casi ilimitado. Una persona tiene 3.000 millones de nucleótidos en el genoma, que pueden constituir entre 30.000 y 100.000 genes diferentes. Basta estudiar un número grande de genes para llegar a conclusiones más precisas.

He añadido un nuevo enlace en el que desarrollo más la cuestión de la biología molecular.

### Biología molecular y evolución

Como aparece en el epígrafe dedicado a las pruebas clásicas de la evolución, una de las que han aportado las nuevas ciencias (ya no tan nuevas) son las correspondientes a las semejanzas bioquímicas. Se pueden mencionar muchos ejemplos de proteínas, como la hemoglobina o los citocromos, con los que se trazan árboles genealógicos entre especies, y entre individuos de una especie, comparando proteínas que desempeñen la misma función. También se pueden comparar, con mayor fiabilidad, los mensajes que codifican a estas proteínas, es decir, sus genes. Sin ir más lejos, cuando ocurren epidemias bacterianas o víricas, se recurre a estudios de este tipo para conocer la filogenia que relaciona las diferentes cepas infectivas y conocer cuál ha sido la primera cepa y dónde ocurrió la primera infección.

La antropología molecular fue prácticamente fundada por el investigador Luigi Luca Cavalli-Sforza, en los años cincuenta, cuando se trabajaba con polimorfismos de proteínas, los llamados isoenzimas, diferentes formas moleculares de una enzima, en lugar de con los polimorfismos de ADN. Fue uno de los fundadores del *Human Genome Diversity Project* para coordinar la recogida y análisis de muestras de ADN procedentes de diversos grupos

étnicos del globo. Pero su idea cayó en embrollos éticos y políticos, y algunos grupos manifestaron su oposición a esta recogida, como la declaración de los Pueblos Indígenas del Hemisferio Oeste. Los participantes de HGDP han hecho un Propuesta de Protocolo Ético Modelo para la Recolección de Muestras de ADN, que te puedes leer en español, aunque no he podido saber si ese protocolo está en uso o no.

## LOS POLIMORFISMOS

Los denominados polimorfismos de nucleótido único (SNPs o single nucleotide polymorphism) son otro objetivo importante de la biología molecular aplicada al estudio de la evolución. Se trata de puntos concretísimos de los genomas en los que un nucleótido puede ser diferente en varios individuos, dando lugar a caracteres diferentes, como el color de los ojos, de la piel, del pelo, la forma de la nariz, las forma en que metabolizamos sustancias, etc. Un buen ejemplo de SNP son los alelos de los grupos sanguíneos humanos.

El gen de los grupos sanguíneos consta de 1062 pares de bases, divididas en seis exones, en el cromosoma 9. Este gen codifica una enzima denominada galactosil transferasa que tiene la capacidad de añadir galactosa (un monosacárido) a una molécula, por ejemplo, una proteína. La diferencia entre el grupo A y el B es de siete pares de bases, de las que tres son neutras (no afectan al aminoácido codificado) y las otras cuatro son las que determinan la diferencia: en las posiciones 523, 700, 793 y 800 de este gen, las personas de grupo A poseen las letras C, G, C, G; las del grupo B, poseen G, A, A, C. Aún existen otras combinaciones, por ejemplo, algunas personas del grupo A tienen letras del grupo B y viceversa. En cuanto al grupo O, las personas que lo poseen sólo tiene un único cambio, pero en este caso no se trata de una sustitución, sino de una delección, es decir, de la ausencia de la letra 258, que debería ser una G. En estas personas, la lectura del ADN se desplaza una letra y el mensaje se cambia por completo y no se sintetiza esa enzima. En este caso, el efecto de este cambio en las personas de grupo O no tiene mayores consecuencias, aunque se ha encontrado una correlación con la resistencia a ciertas enfermedades.

Los genes presentan numerosas formas alélicas, de modo que los seres humanos nos diferenciamos unos de otros en, al menos, 400 nucleótidos (aunque puede que esta cifra se haya quedado corta). (¡OJO! No todas las diferencias genéticas se deben a SNP: estamos hablando de diferencias que afectan a un solo nucleótido, o a una pareja de bases nitrogenadas). Sin embargo, la mayoría de los SNP no producen efectos fenotípicos, ya que aparecen, generalmente, en regiones no codificantes del genoma (los denominados intrones), pero el interés que tienen se debe, sobre todo, a su relación con la predisposición a ciertas enfermedades y la susceptibilidad a algunas drogas. Algunos de estos SNP aparecen juntos en un cromosoma y provocan tendencia a la delección del cromosoma, un tipo de mutación cromosómica, provocando enfermedades. Ciertas personas comparten estos SNP y sirven para diagnosticar esa tendencia a la enfermedad. Las combinaciones concreta de polimorfismos en un cromosoma se denomina haplotipo.

Podemos tener cerca de 3 millones de estos SNP en nuestro genoma, de los que conocemos casi 15 millones; sólo 60.000 de estos aparecen en los exones o regiones codificantes. Existe una base de datos pública con todos estos polimorfismos, *The SNP Consortium LTD*, a la que también ha contribuido *International Human Genome Sequencing Consortium*.

En evolución, son buenos marcadores de la diversidad. Si seguimos un SNP concreto a través de diferentes grupos, podemos trazar la evolución y dispersión de las diferentes razas humanas. Se trata de observar "*in situ*" la variabilidad del genoma humano.

La existencia de polimorfismos genéticos nos lleva de nuevo a un tema que ya se ha tratado en otro documento, el relativo al debate entre seleccionistas y neutralistas. Recordamos que para la escuela seleccionista la mayoría de los polimorfismos genéticos tienen un valor adaptativo (en aquel documento no los llamábamos así todavía), es decir, que los diferentes alelos a que dan lugar los polimorfismos codifican proteínas con diferente efectividad. De esta manera, los polimorfismos se mantendrían en la población o no en función de su eficacia. El punto de vista neutralista defiende que la mayoría de los polimorfismos existentes en un alelo son neutros para la selección, es decir, que no provocan mayor beneficio ni perjuicio, no tienen valor adaptativo. Los neutralistas dicen que la evolución molecular es el resultado de la deriva genética al azar de alelos prácticamente neutros. Así, las mutaciones ventajosas serían muy infrecuentes y a las no neutras les ocurriría lo mismo que a las deletéreas, es decir, se eliminarían por selección negativa.

A continuación, intentaré contar algunas interesantes cuestiones en relación a la biología molecular y la evolución. Los enlaces se abrirán en nuevas ventanas, y allí podrás navegar por ellos.

<http://www.evolucion-biologica.cjb.net>