

LA MANIPULACION EVOLUTIVA: UNA VISION DESDE LA BIOLOGIA Un problema de organización: complejidad y funcionalidad

Sensio Carratala

Catedrático Biología I.S.B. Valencia

En una persona de 70 kg. hay aproximadamente 46 kg. de oxígeno, 7 kg. de hidrógeno, 6 kg. de carbono, 2 kg. de nitrógeno, poco menos de 1'5 kg. de calcio y cantidades menores de otros elementos, entre los que se cuentan fósforo, hierro, cloro, sodio, potasio, magnesio, y un etcétera que supera la veintena. Los elementos de que está construido el organismo humano se caracterizan entre otras cosas por hallarse entre los más abundantes de la corteza terrestre. La vida en apareció en la superficie terrestre a partir de los materiales disponibles. Para construir un organismo, la naturaleza no escogió elementos extraordinariamente raros, sino aquellos que pueden encontrarse en mayor o menor proporción en cualquier puñado de tierra, algo que parece compadecerse más con la idea de que se trata de un proceso normal que con la de que se trata de un acontecimiento extraordinario. Dada su abundancia, el precio a que pueden encontrarse todos estos elementos es bastante barato. En total, comprar los átomos necesarios para construir un organismo humano de 70 kg. de masa puede costar menos de doscientas pesetas.

Esta cuenta es equívoca, desde luego. Tanto, salvando las distancias, como calcular el precio de un ordenador por la cantidad de plástico, vidrio y metal empleados en su

construcción. El valor de un ordenador, o de cualquier objeto complejo, no está en función de la cantidad de materiales que lo componen, sino principalmente de su organización, del orden en que se hallan dispuestos en su interior. Su funcionalidad emerge de la organización, no de la singularidad de sus componentes. Si los ordenadores se fabricaran con elementos químicos escasos como Praseodimio, Gadolinio y Samario serían mucho más caros y sería raro verlos en los hogares y las pequeñas empresas.

La valoración que realizó una compañía farmacéutica sobre las moléculas de interés médico contenidas en el cuerpo humano, fue de varias decenas de millones de pesetas. Las moléculas constituyen el siguiente grado de organización de la materia viva y consisten en agrupaciones de átomos unidos entre sí según ciertas reglas. Hay más orden en una molécula que en un átomo, aunque sólo sea porque la existencia de los átomos es condición *sine qua non* para que existan las moléculas. La probabilidad de que una molécula orgánica grande, una proteína, por ejemplo, se produzca por mecanismos estrictamente aleatorios es ínfima, así que es normal que las moléculas complejas sean más caras que los átomos. Sobre todo si se trata de moléculas compatibles con los sistemas biológicos que han sido perfeccionadas a lo largo de millones de años de evolución.

El orden interno de los sistemas complejos contribuye a su funcionalidad en tal medida que las características de los materiales de que están constituidos tienen una importancia relativamente pequeña, hasta el punto de que pueden ser sustituidos con facilidad en muchos casos. No es casualidad

que la informática haya comenzado a brindar ejemplos ilustrativos de esto, ya que la adquisición de un orden interno es un problema, precisamente, de información. Se tiende a considerar actualmente que la vida es una propiedad emergente de las interrelaciones de un sistema complejo.

La evolución, anterior a la vida

La Tierra apareció hace unos 4600 millones de años. Aunque a escala humana las cifras son enormes, se mantiene la idea de que la vida no tardó mucho en aparecer. Lo hizo en cuanto tuvo ocasión, alrededor de 600 millones de años más tarde, según las teorías más aceptadas. Durante gran parte de ese tiempo, debido a la caída incesante de meteoritos, la temperatura de la superficie de nuestro planeta alcanzó valores tan elevados que superaron ampliamente el punto de fusión de las rocas. Al menos durante algunos cientos de millones de años, la superficie terrestre fue un océano de magma. De acuerdo con este punto de vista, la vida que conocemos apareció sobre nuestro planeta apenas las condiciones ambientales la permitieron. Se cree ahora que la vida apareció hace aproximadamente 4000 millones de años. Hay razones cada vez más sólidas para pensar que aquella vida y la vida actual son la misma vida, el mismo hilo ininterrumpido a través de los eones.

Debió existir una evolución molecular antes de eso. La idea de evolución molecular tiene matices brillantes. Fue una extensión de la idea de Darwin al mundo mineral que ofreció el puente imprescindible desde la materia inerte a lo "pre-vivo", cuya verosimilitud fue puesta de manifiesto cuando Stanley Miller puso en su matraz los gases

que se suponían más abundantes en la primitiva atmósfera terrestre. Moléculas sencillas se agrupan, se asocian, se enlazan químicamente formando algunas moléculas más complejas, que a su vez se asocian o enlazan de nuevo con las moléculas vecinas. Se producen moléculas de todo tipo, algunas son más complejas y aumenta su diversidad hasta que aparece una molécula capaz de autocopiarse repetidamente. La combinación entre la velocidad de autocopiar y la persistencia en el medio determina cuál, de entre las posibles moléculas candidatas, dio lugar a la vida primitiva que dejó su imagen grabada en las rocas del yacimiento australiano de Warrawaona, (de 3500 millones de años de antigüedad), y cuyas huellas, consistentes en materia orgánica de origen biológico, se registran ya en la formación Issua de Groenlandia, las rocas más antiguas que se conocen, datadas en 3800 millones de años.

Complejidad y Medio Ambiente

Hay dos aspectos de la teoría evolutiva que destacan con especial nitidez en la idea de evolución molecular: la noción de aumento de la complejidad y las relaciones de dependencia e interacción con el medio ambiente. La palabra evolución se asocia demasiado a menudo a la idea del progreso entendido como aumento de tamaño y/o de complejidad de los organismos a lo largo del tiempo, a pesar de que la mayor parte de los procesos evolutivos no producen ese tipo de progreso.

Es difícil evitar la idea, tan acorde con nuestros deseos, de que la evolución es un progreso permanente hacia cotas más elevadas. La propia palabra evolución, relacionada con conceptos como desenvolvimiento y

desarrollo ha sido causa de confusiones. De hecho, en la época en que se produjo el nacimiento de la teoría evolutiva, se hablaba más bien de "transformismo", término que se limita a indicar la existencia de algún tipo de cambio de forma. En uno de sus primeros trabajos, Stephen Jay Gould se refiere a esta cuestión señalando que hubiera sido más correcto pero menos eufónico hablar de "descendencia con modificación". "Descendencia con modificación", y no "Evolución", fue la expresión empleada por Darwin cuando enunció su teoría.

Tanto en la evolución molecular como en la evolución biológica se producen estructuras complejas, pero la gran mayoría de las moléculas que existen son muy sencillas, y la mayoría de los organismos que hay en nuestro planeta son unicelulares. En función del tiempo, cabe esperar un aumento de la complejidad en algunas estructuras, pero nunca la desaparición de las más simples que constituyen su fundamento.

La Teoría de la Evolución y la Ciencia de la Biología

La Biología fue durante siglos una ciencia principalmente descriptiva y sus observaciones eran más o menos inconexas. De hecho no era una considerada una ciencia en el mismo sentido en que lo era la Física. Había demasiada variedad, demasiada diversidad biológica como para descubrir regularidades fundamentales, que en su mayor parte se hallaban en el desconocido mundo microscópico. La teoría celular y los principales rasgos de la fisiología no fueron establecidos hasta el siglo XIX, dos mil doscientos años después de las aportaciones de Aristóteles al conoci-

miento de los seres vivos que marcan el inicio de la Biología como área diferenciada del conocimiento.

Se ha indicado a menudo que la Teoría de la Evolución brindó a la Biología la posibilidad de organizar los conocimientos en torno a una idea y tuvo como consecuencia la posibilidad de interpretar la diversidad biológica en cuanto a filogenia y funcionalidad en el ecosistema. La Teoría de la Evolución permitió el establecimiento de la Biología como ciencia, constituyéndose en la ley fundamental capaz de organizar los conocimientos biológicos.

La Teoría Sintética de la Evolución

La Teoría Sintética, o Neodarwinismo, establecida inicialmente a finales de los años treinta, tuvo el valor de reunir e integrar en un cuerpo doctrinal conocimientos procedentes de campos como la Genética, la Paleontología, la Paleogeografía, la Ecología, la Anatomía Comparada y otros, lo que dotó a la Teoría de la Evolución de una respetabilidad científica que no había tenido hasta entonces. Es interesante observar que en esa misma época todavía se producían los últimos estertores de la teoría vitalista y que faltaba más de una década para el descubrimiento del ADN por Watson y Crick. Fruto de su época, la Teoría Sintética, a pesar de su carácter integrador, no podía prever la gran revolución que iba a ocurrir inmediatamente.

Al margen de esto, la Teoría de la Evolución seguía mostrando carencias, especialmente derivadas de la falta de posibilidades experimentales de comprobación o falsación en el sentido popperiano. Es una crítica que se mantiene aún, dado que cada vez que se plantea un problema concreto sobre la evolu-

ción de tal o cual especie, se acaba encontrando una explicación concreta derivada de la teoría evolutiva capaz de dar respuesta del hecho, pero que con frecuencia no puede evitar cierto carácter de explicación "ad hoc". Casi siempre es posible encontrar especies distintas que resuelven de forma distinta problemas semejantes, lo que impide aplicar a la evolución, al menos en estos casos, los criterios de generalización y predicción características del conocimiento científico.

De gen a proteína, el camino de la información genética

Los estudios bioquímicos de los años cuarenta y, sobre todo, de la década de los cincuenta, permitieron el establecimiento de una Genética mucho más precisa. Se estableció que los genes eran fragmentos de ADN capaces de producir proteínas, las cuales tenían determinadas funciones en las células, que constituían a su vez el hogar de la vida, el lugar donde previsiblemente estaban las respuestas a las preguntas sobre la transmisión de la herencia y, en consecuencia, también muchas de las que podrían explicar el proceso evolutivo.

En 1943, Beadle y Tatum demostraron que las diferencias hereditarias eran el producto de distintas capacidades de sintetizar proteínas y definieron el gen como la unidad hereditaria que dirige la síntesis de una enzima. Esta definición, conocida como la hipótesis "un gen - una enzima" quedó algo modificada después por dos razones. Se descubrió que la síntesis de todas las proteínas, sean o no enzimas, está codificada por genes. En segundo lugar, se descubrió que la información para la síntesis proteica reside en el

número y la secuencia de las bases de la molécula de ADN.

Actualmente se considera que un gen es un segmento de molécula de ADN que dirige la síntesis de una proteína.

Cabría esperar una estrecha correlación entre la cantidad de ADN y el tamaño o la complejidad de los organismos. Indudablemente, la longitud del ADN de una bacteria es mucho menor que la del ADN de una ballena azul, de modo que puede resultar sorprendente saber que a veces sucede lo contrario. Cada célula somática de una salamandra contiene 100 veces más ADN que cada célula somática humana y no parece que sea necesaria mucha más información para codificar el desarrollo de una salamandra que el de un ser humano. En realidad no todo el ADN codifica genes. Sólo una pequeña parte lo hace. Es decir, en los organismos más conocidos, la mayor parte del ADN es inservible o al menos no se sabe para qué sirve. La salamandra tiene una enorme cantidad de ADN "inútil" en cada una de sus células. También la especie humana, aunque en menor proporción.

Los genes son aquellas partes de la molécula de ADN que codifican proteínas. La mayor parte de las proteínas codificadas son enzimas, las moléculas que controlan la actividad bioquímica de la célula con una precisión admirable.

Duplicación, transcripción, traducción

El Dogma Central de la Biología, establecido por Francis H. Crick, uno de los descubridores del ADN, describe el mecanismo básico mediante el cual la información hereditaria es utilizada por los seres vivos. Pone de mani-

fiesto la direccionalidad de la información: del ADN al ARN, y del ARN a las proteínas.

En el ADN se hallan inscritos los genes. Cuando un gen es activado transcribe su información a una copia de ARN, que se dirige a los ribosomas de la célula, orgánulos donde se produce la traducción que da lugar a las proteínas. El primer paso recibe el nombre de transcripción porque el ADN y el ARN son moléculas tan semejantes que puede decirse que hablan el mismo idioma, cada nucleótido es una letra de ese idioma, y la correspondencia entre ambas moléculas es unívoca, sin más ambigüedades que los posibles errores que puedan producirse durante el proceso.

La traducción es bastante distinta. A partir de la cadena de nucleótidos que constituye el ARN se debe obtener una proteína, que en el caso más simple está formada por una cadena de aminoácidos. Hay cuatro nucleótidos distintos en el ARN y 20 aminoácidos distintos en las proteínas, de manera que para pasar del idioma de los nucleótidos al de los aminoácidos no es posible una correspondencia unívoca. Si cada nucleótido representara a un aminoácido sólo podrían codificar cuatro aminoácidos. Hacen falta tres nucleótidos para codificar los 20 aminoácidos, y entonces se plantea un problema matemático de importantes consecuencias en el proceso evolutivo: combinando cuatro nucleótidos en grupos de tres se obtienen sesenta y cuatro combinaciones posibles, es decir, "sobrarían" 44 de ellas si a cada aminoácido le correspondiera una sola triplete (codon) de nucleótidos. En realidad, todas las combinaciones posibles tienen significado, incluyendo algunos tripletes que indican signos de puntuación. El diccionario que rige

la traducción recibe el nombre de código genético.

El valor del tiempo

Cuando Carl Sagan escribió en su famosa serie de divulgación "Cosmos" un capítulo sobre el desarrollo de la vida en la Tierra, definió dos condiciones para que fuera posible el proceso evolutivo: el tiempo y la muerte. El tiempo es necesario para el desarrollo de cualquier proceso biológico, ya que estos procesos son en esencia transformaciones o cambios a lo largo del tiempo. El tiempo evolutivo se mide a menudo en millones de años, y su papel consiste en permitir el desarrollo de numerosos ciclos biológicos y dar con ello ocasión para la acumulación de cambios hereditarios por parte de los productos sucesivos de tales ciclos. Un millón de años, desde la perspectiva del proceso evolutivo, no es nada en sí mismo. Sólo si se han producido cambios hereditarios y la selección natural ha ejercido su influencia eliminando cierto número de genes (por la drástica vía de eliminar a los organismos portadores) y favoreciendo la extensión de otros, el tiempo tiene significado evolutivo.

Cabría pensar que para entender la evolución de una especie, la medida del tiempo debería hacerse en generaciones, puesto que es cada proceso reproductor quien permite la transmisión de los cambios genéticos. Cada generación es una oportunidad de fijación de nuevos caracteres en el genoma de la descendencia. Hay bacterias que se dividen cada veinte minutos, de modo que en un día, en condiciones ideales, pueden sucederse 72 generaciones (y la hipotética descendencia alcanzaría la cifra imposible de $5 \cdot 10^{21}$ bacte-

rias). Tomando 25 años como tiempo medio de generación humana, la sucesión de 72 generaciones humanas requeriría 1800 años. En ese lapso de tiempo, las bacterias habrían llegado a producir más de 47 millones de generaciones. Sin embargo, el número de generaciones no tiene gran influencia en el ritmo de aparición de las mutaciones puntuales, que han sido denominadas a menudo "mutaciones verdaderas", ya que en ellas se alteran realmente las letras que componen el mensaje genético, lo que implica cambios en su significado.

En cambio, las alteraciones o mutaciones debidas a errores en la división celular, que afectan a fragmentos de cromosomas, a cromosomas enteros o al genoma completo, sí guardan mayor relación con el número de generaciones.

El Neutralismo

En 1968, Motoo Kimura planteó su Teoría Neutralista como un reto abierto a la teoría darwinista oficial; un ataque directo a la idea de que la selección natural era la clave de la evolución. El Neutralismo afirma, en esencia, que la mayoría de las mutaciones, en especial las puntuales, no se ven sometidas al juicio de la selección natural, sino que se producen a escala molecular como cambios en la secuencia de nucleótidos que no aportan ventajas ni desventajas para la vida del individuo. Estas mutaciones "neutras" podrían así extenderse entre la población con el paso del tiempo y, a largo plazo, acumularse por deriva aleatoria.

Se ha discutido si este tipo de cambio genético merece llamarse evolutivo, ya que no existe selección ni adaptación al medio ni, a menudo, expresión efectiva del cambio en

el nivel bioquímico, como ocurre con la mayoría de los cambios de nucleótidos que ocupan el tercer lugar del tercer lugar de un codon. Dado que en el código genético se relacionan 64 tripletes de nucleótidos con 20 aminoácidos, muchos de los tripletes mutados codifican el mismo aminoácido que los no mutados, por lo que su influencia es nula.

La comprobación de este hecho y el estudio del ritmo de producción de mutaciones puntuales desde el punto de vista estadístico dio lugar a una sacudida de las teorías evolutivas que todavía continúa. Las cifras indicaban que el ritmo de variación era lo suficientemente elevado como para hacer que el aislamiento genético fuera un componente fundamental en la evolución de los organismos, tal vez, se llegó a plantear, el componente fundamental.

La Teoría Sintética no había valorado suficientemente, al parecer, las consecuencias del ritmo de aparición de mutaciones y la teoría neutralista planteaba la cuestión de un modo netamente distinto firmemente respaldada por datos procedentes de la genética molecular. La mayor parte de las mutaciones son neutras, ni buenas ni malas en el sentido en que puede actuar la selección natural, es decir, ni perjudican la supervivencia o la capacidad de dejar descendencia de los organismos ni suponen ventaja alguna. Se trata de mutaciones silenciosas, en principio intrascendentes. Es evidente, por ejemplo, que la mayor parte de las mutaciones en el tercer nucleótido del codon sólo producirían algún efecto si una segunda mutación en el mismo codon permitiera su manifestación.

Actualmente existen desacuerdos entre neutralistas y seleccionistas a la hora de expli-

car algunos hechos. Los seleccionistas tratan de fundar los cambios evolutivos en procesos debidos a la selección natural, mientras que los neutralistas buscan procesos de deriva genética, en los que el error de muestreo de una parte de una población que queda aislada reproductivamente del resto conduce a unas características genéticas distintas de las que tiene la población principal. Sin embargo, los neutralistas no rechazan la existencia de la selección natural, simplemente le atribuyen una importancia menor de lo que se creía. Por eso, el neutralismo ya no es considerado una doctrina evolutiva antidarwinista, sino un punto de vista asimilable desde el punto de vista de la Teoría Sintética, que sigue su propia evolución ajustándose progresivamente a los nuevos hechos. Francisco J. Ayala, uno de sus máximos representantes, asegura que la perspectiva actual de la Teoría Sintética es más bien la de un cambio gradual que la de una catástrofe futura debida a la aparición de nuevos conocimientos sobre la evolución.

Compartir y renovar: el papel del sexo

Teóricamente podría no existir. Podrían existir dos sexos, o tres sexos, quizá cuatro. Tenemos la impresión de que el sexo, tal como lo conocemos en nuestra especie y en las de nuestro entorno, es una propiedad inherente a la vida y no es necesariamente cierto. Se trata de un recurso añadido, útil, con éxito, pero en modo alguno imprescindible para la reproducción. El sexo tiene sentido para la evolución, no tanto para la reproducción. Las explicaciones más aceptadas indican que la función del sexo es favorecer el intercambio horizontal (entre organismos contemporáneos) de material genético.

El sexo como hecho biológico continúa sin ser bien entendido y existen muchas dudas sobre las razones de su existencia, pero apunta hacia la importancia que puede tener compartir genes con organismos vecinos, genes que de otro modo seguirían tal vez su propagándose de generación en generación a lo largo de sus líneas genealógicas independientes sin reunirse nunca en un mismo organismo.

Una bacteria que se reproduce de forma asexual, dividiéndose en dos bacterias iguales cada media hora, por ejemplo, produce en cada división dos descendientes genéticamente idénticas, lo que significa que ambas tienen copias exactamente idénticas de ADN. Son, por así decirlo, "gemelas". Cuando una bacteria aislada se reproduce asexualmente durante varias generaciones produce un clon. Un clon se caracteriza por ser una agrupación de células cuyo mensaje genético es idéntico. La forma de obtener un clon es la reproducción asexual a partir de un organismo progenitor único.

Los mecanismos de reproducción asexual de las bacterias no son perfectos, cometen errores, y, a partir de cierto momento en la descendencia asexual de la bacteria progenitora original aparecen diferencias genéticas significativas.

Además, ni siquiera las bacterias renuncian al intercambio de material genético. Mediante algunos mecanismos que son denominados "parasexuales", las bacterias pueden intercambiar genes entre sí, o adquirirlos de su entorno. Hay distintas maneras por las que estos genes adquiridos llegan a ser funcionales, pero el resultado final es que tales bacterias acaban siendo capaces de rea-

lizar acciones para las que estaban incapacitadas anteriormente.

La aparición del sexo entre los seres vivos llegó con los protozoos. Fue una invención de éxito y gran cantidad de los seres vivos que nos son más familiares utilizan mecanismos de reproducción sexual para obtener su descendencia. Excepciones aparte, (los gemelos monovitelinos o gemelos verdaderos son una de ellas), la reproducción sexual garantiza que cada descendiente disponga de una combinación genética única, con lo que la variedad genética está asegurada.

La muerte es fundamental para la vida. No sólo en el caso de los depredadores, que toman su materia y energía de sus presas. Sin muerte, persistirían a través del tiempo los mensajes genéticos desde el principio de los tiempos. Todos los lugares habitables habrían sido ocupados hace millones de años y los nuevos seres vivos no tendrían ocasión de establecerse. Tal vez la única posibilidad fuera la creación de nuevos nichos ecológicos, mediante la subdivisión de los anteriores y la progresiva especialización, pero tal proceso no podría proseguir ilimitadamente. La muerte es necesaria para la renovación de la vida y renovación de la vida es uno de los nombres de la evolución.

Hay una consecuencia inesperada de todo esto. Cuando una bacteria se divide asexualmente, (es curioso que igualmente podría decirse que se multiplica), es toda la bacteria, el organismo completo, la que se vierte en las dos bacterias hijas resultantes, que a su vez producirán dos nuevas bacterias, y así *ad infinitum*. Salvo accidente, una bacteria no muere nunca, sino que rejuvenece constantemente en su descendencia. Igual

puede decirse de los organismos pluricelulares que se reproducen por mecanismos asexuales cuando ésta es la única forma de reproducción.

En cambio, la lógica de la vida lleva a una situación muy distinta en el caso de la reproducción sexual. Weissman estableció a finales del siglo XIX la distinción entre soma y germen en los organismos celulares que se reproducen sexualmente. El germen está formado por los gametos, (espermatozoides u óvulos en el caso humano), y el soma por el resto del organismo. Si se trata de que cada uno de los descendientes sea distinto de sus progenitores e incluso de sus hermanos y hermanas, el soma, formado por células con una combinación genética determinada, no puede ser transferido a la siguiente generación, cuya configuración genética es distinta. De ahí que el soma resulte ser finalmente una cáscara, un envoltura del germen para la cual no queda más salida que la muerte una vez ha vencido su utilidad como auxiliar de la transferencia del germen. La muerte del soma, que es todo el organismo excepto algún espermatozoide u óvulo, no es ya un hecho accidental, sino una parte imprescindible del mecanismo de reproducción sexual, que adquiere su sentido a la luz del paradigma evolutivo. Haciendo abstracción de otros problemas, si los organismos no muriesen y no perdieran su funcionalidad, la renovación de genes, la eliminación de algunos de ellos, la extensión de los genes nuevos resultaría imposible. El sexo facilita la renovación genética de generación en generación, ya que permite la división en soma y germen y la aparición de la muerte del soma como consecuencia lógica del proceso.

Biodiversidad

La biodiversidad de un ecosistema es el número de especies distintas existentes en el mismo. Bajo la aparente sencillez de una definición muy esquemática y breve, como la anterior, se esconde un concepto sutil y escurridizo. La palabra "distintos", admite una amplia gradación, ya que no todas las especies son igual de "distintas" de las demás. Por otra parte, también existe diversidad genética entre individuos de la misma especie. Además, es necesario definir qué es una especie, uno de los conceptos fundamentales de la biología y piedra angular de las interpretaciones evolutivas.

En las definiciones al uso suele indicarse que una especie es un conjunto de organismos capaces de combinar sus genes entre sí produciendo descendientes capaces de producir descendientes indefinidamente. La especie es, según esto, una comunidad genética. Pero esta definición no se ajusta bien a los seres vivos que se reproducen asexualmente, entre los que se encuentran las bacterias, que comparten genes ocasionalmente y muchas veces de forma unidireccional, ya que no necesitan compartir genes para reproducirse ni desarrollarse, y muchas bacterias que ceden un fragmento de ADN a otras no reciben nada a cambio. El caso de las bacterias es importante porque gran parte de la biotecnología se basa en ellas, pero no es el único.

La especie es, con todo, el único grupo taxonómico "verdaderamente natural", mientras que otros taxones como Género, Familia, Orden, Clase, Filum o Reino admiten mayor grado de arbitrariedad. No es extraño, por lo tanto, que las distintas escuelas taxonómicas adopten criterios de clasificación distintos y

que como consecuencia de ello sus resultados sean a menudo divergentes.

Cabría esperar que, al menos en la especie, tales discrepancias no existieran, pero no es así. Una definición alternativa de especie afirmaba que "una especie es aquello que es definido como tal por especialistas solventes". La existencia de tal aforismo, no completamente en desuso, indica inequívocamente turbulencias.

Clasificar no es fácil, ni siquiera si se trata de clasificar especies, grupos naturales perfectamente reconocibles en principio. Cuando se comenzaron a hacer sistemáticamente estadísticas sanitarias, se daba la paradoja de que cada vez que se realizaba un estudio estadístico más preciso aumentaba el número de casos de la enfermedad estudiada. La explicación estaba, lógicamente, en que la mejora de los sistemas de reconocimiento permitía detectar muchos casos que anteriormente habían sido pasados por alto. Con el estudio de las especies ocurre algo parecido. En un principio la determinación de las especies dependía principalmente de criterios morfológicos. Sin embargo, la definición de especie citada más arriba no es en absoluto morfológica. Existía la posibilidad teórica de que dos especies distintas tuvieran exactamente la misma morfología externa, (de hecho ocurre en la naturaleza con relativa frecuencia). Ambas especies podrían diferenciarse solamente en algunos detalles de su comportamiento, en la ceremonia de cortejo, por ejemplo, mientras que el estudio morfológico nunca llegaría a descubrir que son especies distintas. Sólo una investigación más completa, que incluyera el estudio del cortejo o la capacidad de producir descendencia fértil, llegaría a detectar la separación.

La creación de nuevas especies

Cualquier especie existente actualmente en la Tierra procede por evolución de especies anteriores que se remontan en el tiempo hasta el tronco común del que toda forma de vida procede.

La forma más habitual de conseguir el aislamiento genético que caracteriza a las especies es la que se conoce como especiación geográfica alopátrica: dos poblaciones de la misma especie separados por barreras geográficas a lo largo del número suficiente de generaciones llegan a acumular tantas diferencias en su genoma que finalmente los cruces entre ejemplares de ambos grupos resultan improductivos.

Es difícil determinar el tiempo necesario para que ambas poblaciones se conviertan en especies diferentes. A menudo los tiempos requeridos para tal proceso son de miles de años, pero no siempre ocurre así. En un reciente trabajo de la Universidad de Londres se da cuenta de la aparición de una nueva especie de mosquito en los túneles del metro de Londres, cuya construcción data de menos de un siglo. Incluso, en el mismo estudio, se indica que pueden advertirse diferencias entre los mosquitos de los diferentes túneles.

La especiación simpátrica es aquella en que no se produce separación geográfica de poblaciones. Una sola mutación que afectara a alguna parte fundamental del mecanismo de reproducción crearía automáticamente el aislamiento genético en los ejemplares afectados, que, en el caso de sobrevivir, constituirían una nueva especie de aparición instantánea. Mutaciones que implicaran un cambio de actividad, de nocturna a diurna, por ejemplo, también podrían llevar a un aislamiento

efectivo, a partir del cual la acumulación de mutaciones incrementaría la divergencia genética. La poliploidía, citada más arriba, es uno de los mecanismos de aislamiento genético no geográfico más conocido. En los insectos, la especialización alimentaria puede llevar a producir nuevas especies sin existencia de barreras geográficas.

Evolución de la biodiversidad

A lo largo del proceso evolutivo la biosfera ha desarrollado un alto nivel de biodiversidad. Sin embargo, esta biodiversidad no se ha ido incrementando de forma constante desde el origen de la vida hasta la actualidad. La tierra es un planeta cambiante y la vida en el planeta, también. Se conocen cinco grandes extinciones y muchas otras de carácter menor, debidas principalmente a circunstancias ambientales no totalmente aclaradas. Lo cierto es que cada una de las extinciones ha producido la eliminación de grupos biológicos y otorgado a otros la oportunidad de alcanzar un nivel de preeminencia. Cada cambio ambiental es una dificultad que superar para todas las especies, y al mismo tiempo, una oportunidad para la aparición de nuevas especies y el cambio de su distribución en el territorio. La última gran extinción, la que causó la desaparición de los dinosaurios, permitió la evolución de los mamíferos y con ello que el ser humano llegara a existir. Pero la mayor de las extinciones conocidas que ha sufrido este planeta se produjo hace aproximadamente 250 millones de años, al final del Período Pérmico. El registro fósil atestigua la desaparición del 96% de las especies marinas, (las que dejan fósiles con mayor facilidad), lo que supuso el

54% de las familias. El grupo del que después se desarrollarían los mamíferos sobrevivió a duras penas a ella y al parecer nuestro linaje no anduvo lejos de haber sido extinguido en aquel lejano entonces.

La biodiversidad aumenta en los períodos de estabilidad de los ecosistemas y es mayor cuando existe una gran variedad geográfica y el espacio está compartimentado en multitud de zonas separadas por barreras que proporcionan el aislamiento de las poblaciones. Por el contrario, los rápidos cambios ambientales y la uniformidad del relieve se relacionan con una biodiversidad menor.

La naturaleza al servicio de la Humanidad

Darwin comenzó *El Origen de las Especies* hablando de las causas de la variabilidad:

“Cuando comparamos los individuos de la misma variedad o subvariedad de nuestras plantas y animales cultivados más antiguos, una de las primeras cosas que nos impresionan es que generalmente difieren más entre sí que los individuos de cualquier especie en estado natural; y si reflexionamos en la gran diversidad de plantas y animales que han sido cultivados y que han variado durante todas las edades bajo los más diferentes climas y tratos, nos vemos llevados a la conclusión de que esta gran variabilidad se debe a que nuestras producciones domésticas se han criado en condiciones de vida menos uniformes y algo diferentes de aquellas a que ha estado sometida en la naturaleza la especie madre. Hay, pues, algo de probable en la opinión propuesta por Andrew Knight, de que esta variabilidad puede estar relacionada, en parte con el exceso de alimento. Parece claro que los seres orgánicos, para que se produzca alguna variación importante, tienen que estar expuestos durante

varias generaciones a condiciones nuevas que, una vez que el organismo ha empezado a variar, continúa generalmente variando durante muchas generaciones. No se ha registrado un solo caso de un organismo variable que haya cesado de variar sometido a cultivo. Las plantas cultivadas más antiguas, tales como el trigo, producen todavía nuevas variedades; los animales domésticos más antiguos son capaces de modificación y perfeccionamiento rápidos”.

Desde la perspectiva actual puede resultar paradójico que Darwin escogiera para iniciar su libro aquello que resultó ser el punto más débil de su teoría. Cuando se publicó el origen de las especies la aparición de variabilidad en los seres vivos era un fenómeno empírico inexplicable. Ninguna teoría era capaz de dar razón de cómo se podían producir novedades heredables en los seres vivos y era más difícil aún entender cómo dichas mutaciones podían extenderse en las poblaciones. Darwin era consciente de la necesidad de disponer de una teoría capaz de explicar la aparición de la diversidad genética, ya que sin ella la selección natural no podía actuar.

Para las granjas animales, la variabilidad que importa es la intraespecífica, ya que sólo en el interior de una especie es posible realizar cruzamientos con resultados viables. Era generalmente aceptada la opinión que gran parte de los cambios se debían a la herencia de caracteres adquiridos por el esfuerzo de los progenitores, que podían ser transmitidos genéticamente a la descendencia. La idea de la herencia de los caracteres adquiridos, que forma parte de la esencia de las teorías lamarckianas, era aceptada por Darwin como una fuente más de variación genética, rechazada por el darwinismo actual.

A pesar de la débil fundamentación teórica, los resultados empíricos fueron importantes. De hecho, la mayor parte de los animales y plantas con que convivimos y de los que nos alimentamos son fruto de la actividad humana. El proceso de domesticación comenzó al menos en el Neolítico, y desde entonces se ha ido mejorando la capacidad de producción de alimentos, se han obtenido variedades de animales cada vez más adecuadas a las finalidades humanas: alimentación, energía, transporte, compañía, ... etc. Muchos de estos organismos han perdido funcionalidad debido a los cambios de la sociedad humana. Las yuntas de bueyes, los caballos de tiro, los burros de carga y otros animales son cada vez más escasos y se teme incluso su posible extinción a medio plazo. Darwin utilizó en el Origen de las especies una cantidad considerable de ejemplos extraídos de las experiencias de las granjas de la campiña inglesa.

La importancia humana

La historia de la ciencia es un buen motivo para la humildad del ser humano. Refleja la progresiva retirada de la Humanidad hacia lugares cada vez más y más discretos desde los tiempos en que la Humanidad era dueña de la Tierra, centro y razón del Universo, hasta la actualidad. Ahora vivimos en un sistema planetario más o menos vulgar, dando vueltas a una estrella que no parece tener nada de extraordinario, al margen de su importancia para nuestras vidas, en el brazo Carina Cignus de una de las muchas galaxias espirales de esta región del Universo conocido. El cuerpo humano ya no es una máquina perfecta ni extraordinaria. A princi-

pios de siglo Metschnikoff, científico de origen ruso afincado en París, citó 128 estructuras del cuerpo humano cuyo diseño hubiera debido mejorarse. Nuestra especie encaja plenamente en el esquema evolutivo. No somos tan especiales como para considerarnos fuera de la naturaleza; las leyes naturales también nos afectan. No hay abismo entre la especie humana y el resto de los animales. Desde el punto de vista evolutivo somos una especie recién llegada que, eso sí, ha armado bastante revuelo con su actividad y ha alcanzado el poder de producir la sexta gran extinción que para mucha gente ha empezado ya y se está volviendo contra nosotros mismos.

Alterando el curso de la evolución

Reconocer que formamos uno de los más recientes productos de la evolución biológica y que las reglas y criterios que se van descubriendo sobre la evolución pueden ser aplicados también a la especie humana no impide apreciar que la Humanidad a lo largo de la historia, y sobre todo durante este siglo, ha adquirido la capacidad de disponer de fuentes enormes de energía extrasomática mediante la cual transformar profundamente el medio ambiente, mucho más allá de lo que cualquier especie biológica de la que hayamos tenido noticia ha podido conseguir hasta ahora.

Sin intervención humana, la evolución biológica ha llegado a producir millones de especies, cada una de las cuales constituye un sistema biológico capaz de afrontar de forma autónoma los retos del ambiente y de integrarse funcionalmente en su ecosistema, y de dejar descendientes a lo largo de un tiempo indefinido, e inevitablemente, evolucionar.

Selección

Desde el Neolítico al menos, la Humanidad es consciente de la utilidad de manejar determinadas especies de seres vivos para obtener sus productos biológicos, su energía y su compañía. Determinadas características de los seres vivos son más deseables que otras en función de la finalidad buscada. Esta primera forma de alteración genética, es el fundamento de la mejora de las especies útiles, como el ganado doméstico y los cultivos agrícolas.

Los perros se reproducen dando más perros, las ovejas dan ovejas y los conejos dan conejos. Sin embargo, no todos los conejos, ni todos los perros ni todas las ovejas son iguales. Lo que sí ocurre es que cada organismo se asemeja a sus progenitores. Más allá del nivel de especie, la prole de una pareja de galgos estará formada por galgos, y la de una pareja de gatos siameses estará constituida por gatos siameses, evidenciando que aunque los gatos siameses pueden cruzarse con otras razas de gatos sus caracteres indudablemente se heredan. Incluso rasgos de mayor detalle se heredan y, habitualmente, puede reconocerse en la descendencia rasgos físicos que recuerdan de forma individualizada a cada uno de los progenitores.

Dado que la forma de obtener ejemplares de animales y plantas con unas determinadas características dependen de las características de los progenitores, el control de los apareamientos ha sido tradicionalmente el modo de obtener y mejorar las razas y variedades de animales y plantas útiles para la Humanidad. De hecho, las plantas que se cultivan y los animales domésticos son una creación humana, no existían antes. La agricultura y la ganadería, en su acepción tradicional, han constituido

históricamente el inicio de la Humanidad en los procedimientos de modificación genética, un inicio empírico e ignorante respecto a las causas de las modificaciones heredables pero perfectamente consciente respecto a la búsqueda de resultados.

En el proceso se produce además un empobrecimiento genético. La obtención de sólo unos cuantos tipos básicos de seres vivos en función de su utilidad lleva a restringir al máximo el número de progenitores, con lo que aquellos que se apartan de las características ideales no tienen la oportunidad de dejar descendencia, y gran cantidad de información genética se pierde definitivamente. La pérdida es mayor cuanto mayor es la eficacia del control sobre el proceso reproductor. El hecho de utilizar un ejemplar macho reproductor para fertilizar a miles de hembras con el fin de obtener un ganado homogéneo e idóneo, tal como se hace a menudo en el ganado vacuno mediante la utilización de dosis de esperma de un número muy escaso de sementales de gran valor, es un ejemplo claro de cómo se puede perder una gran cantidad de recursos genéticos a cambio de una mayor eficacia en la obtención de las características deseables.

Impacto ambiental

Desde la revolución industrial, los cambios en el medio ambiente provocados por la actividad humana no han hecho sino acelerarse. El medio ambiente es el marco en que actúa la selección natural, y las características que permiten a los seres vivos sobrevivir y evolucionar de generación en generación cambian con el entorno. De modo que el segundo paso, mucho más inconsciente e inesperado, en la modificación genética pro-

ducida por la Humanidad en muchas especies ha sido consecuencia de estos cambios ambientales.

La progresivas apropiación, utilización y alteración del medio dieron como resultado cambios ambientales que comenzaron por ser importantes a nivel muy local y han acabado por extender su influencia a toda la biosfera. La desaparición de algunos genes y la aparición aleatoria y extensión posterior de otros genes asociadas a veces a la aparición o desaparición de nuevas especies y en otros casos a cambios en las distribución proporcional de los genes en las especies existentes. Uno de los ejemplos más clásicos es el de la mariposa del abedul *Biston betularia* que fue oscureciéndose alrededor de los centros industriales ingleses a medida que lo hacían las cortezas de los abedules debido al hollín. Su valor ejemplificador aumenta si se razona que la causa del cambio es la selección natural en su sentido más estricto: las aves insectívoras ven antes a una mariposa clara que a una mariposa oscura si el fondo es oscuro, de modo las mariposas más oscuras tienen mayores probabilidades de reproducirse y transmitir sus genes a la descendencia.

El humo de las chimeneas es una consecuencia indeseable y desagradable que se ha considerado desde una actitud condescendiente como "el precio que hay que pagar" en aras del progreso. Su capacidad para alterar los ecosistemas, impidiendo el crecimiento de ciertos líquenes por ejemplo, se ha conocido mucho más tarde.

El caso de los pesticidas agrícolas es distinto, ya que en este caso se trata de liberar un producto para conseguir modificar el medio ambiente, de modo que se ajuste

mejor a la finalidad de conseguir la máxima producción en los cultivos, eliminando del entorno los organismos indeseables. Rachel Carson, en su libro "Primavera silenciosa", que despertó la conciencia ambiental en la década de 1950, planteó la necesidad de estudiar las consecuencias tan graves como ignoradas del uso indiscriminado de insecticidas. Paul Debach, en 1974 facilitaba, a caballo entre la ironía y la paradoja, una serie de recetas para provocar plagas mediante el uso repetido de insecticidas.

El efecto es bien conocido y ha sido bien estudiado. La aplicación repetida del mismo pesticida acaba produciendo un aumento explosivo de la población de la plaga que trataba de combatir. El efecto es mucho más evidente si las dosis de aplicación son bajas. Se trata de una consecuencia directa del principio canónico de la selección natural. Sólo muy pocos ejemplares resisten a la primera aplicación, pero sus descendientes heredan las características que permiten la resistencia a la acción de los pesticidas. Si la dosis es repetidamente escasa, es mayor la cantidad de supervivientes a cada tratamiento, ya que sobreviven individuos moderadamente resistentes, con lo que hay más posibilidades de que se produzcan y extiendan caracteres favorables a la resistencia. Al cabo de varias generaciones, la casi totalidad de la población de la plaga es resistente al pesticida, que ha causado la desaparición de casi todos sus enemigos naturales, y puede reproducirse libremente.

La situación guarda algún parecido con la que se está produciendo en las últimas décadas entre antibióticos y bacterias. Los antibióticos han sido durante mucho tiempo una defensa eficaz contra gran cantidad de

infecciones bacterianas, pero ya existe una cantidad considerable de cepas de bacterias resistentes a los antibióticos habituales. En la medida en que tales cepas se extiendan, septicemias, neumonías y otras afecciones debidas a bacterias pueden convertirse en una pesadilla. Es ya el caso de algunas cepas polirresistentes de *Mycobacterium tuberculosis* y de algunas otras bacterias patógenas.

Los cambios ambientales debidos a la actividad humana tienen, pues, la capacidad de alterar, de forma indirecta pero muy importante, el genoma de muchas especies, así como de producir la desaparición de muchas otras por desaparición física de sus hábitats, sin contar aquí con su directa aniquilación.

Biotechnología actual

La biotecnología, tal como se entiende actualmente, es absolutamente distinta de los mecanismos anteriores de alteración del curso evolutivo. Ni la ganadería ni la agricultura clásica consiguieron sus logros a partir del conocimiento de los genes y de una teoría de la herencia coherente. El incremento de las cosechas vegetales y de la producción animal, la mejora en calidad de los quesos y los vinos, se debieron hasta el siglo XX a la práctica artesanal de métodos empíricos.

La biotecnología, o tecnología de la vida, reúne conocimientos procedentes de un conjunto heterogéneo de disciplinas que tratan de desarrollar aplicaciones tecnológicas a través del aprovechamiento de los procesos biológicos. La enorme biodiversidad y la gran cantidad de ambientes y problemas que deben resolver permanentemente los seres vivos hacen de tales procesos un recurso muy poderoso.

Podría creerse que hay algo de humildad en sus raíces: el reconocimiento de la superioridad de los organismos para producir con eficacia moléculas simples y complejas, y también organismos. Obtener amoníaco por el método químico de Haber, modificado por Bosch y Claude, requiere una gran cantidad de energía, para someter el nitrógeno y el hidrógeno a presiones de más de 900 atmósferas, con un gran gasto de energía, mientras que una vulgar bacteria del suelo lo produce a temperatura ambiente con una facilidad pasmosa. La tentación de domesticar a la bacteria para aumentar su producción hasta niveles industriales a un coste razonable es inevitable.

Con mucho mayor motivo, la biotecnología puede facilitar la producción de moléculas biológicas complejas. La síntesis de insulina, obtenida laboriosamente por métodos químicos, proporcionó el premio Nobel a Sanger y fue la gran esperanza para miles de personas afectadas por ciertos tipos de diabetes; pero la síntesis de insulina la realizan cotidianamente ciertas células del hígado normal de gran cantidad de mamíferos sin aparente esfuerzo.

La antigua biotecnología de los quesos, los vinos, el yogur, el vinagre, el pan y otros productos los producía con facilidad incluso cuando se ignoraba que eran seres vivos los artífices de las fermentaciones. La bioquímica de los seres vivos estaba sin duda mucho más avanzada que la química humana, de modo que un deseo normal era el de llegar elaborar moléculas complejas con la sencillez y eficacia con que las células lo consiguen. El camino obvio era encargar a las propias células que elaboraran las sustancias deseadas, algo que, por cierto, consiguen los virus

desde hace millones de años. El estudio de los virus puede proporcionar respuestas acerca de cómo conseguirlo.

Hay dos aspectos de la biotecnología que han llamado especialmente la atención en los últimos tiempos: las tecnologías relacionadas con la reproducción y la ingeniería genética.

Las tecnologías de la reproducción y el desarrollo. Los estudios sobre reproducción y desarrollo tienen un interés económico enorme, pues mediante ellos se puede mejorar la producción alimenticia, y también una importancia social indudable, por cuanto muchos de estos estudios se dirigen a resolver problemas de infertilidad humana y permiten aplicaciones sobre las que en el seno de la sociedad existen opiniones fuertemente encontradas.

De ellos deriva un importante abanico de aplicaciones a personas. El tratamiento de la infertilidad, la detección de malformaciones y enfermedades congénitas en el embarazo, la implantación de embriones y los métodos contraceptivos son algunas de estas aplicaciones.

Otras investigaciones se han realizado en animales. Llama la atención el caso de la clonación, en especial si se considera la posibilidad de su aplicación a la especie humana. Actualmente, además de la famosa oveja Dolly del Instituto Roslin de Edimburgo, se han clonado vacas, ratones e incluso células humanas.

No resulta difícil encontrar ejemplos de la utilidad de tales técnicas. Una vaca de gran calidad no produce óvulos durante su embarazo, pero extirpando el embrión en su fase más temprana para implantarlo en el útero de una vaca de menos valor y realizando un tratamiento hormonal, se puede aumentar la producción de los terneros más valiosos.

La posibilidad de clonación de seres humanos ha llevado la polémica a los medios de comunicación social. Hay otras polémicas relacionadas, como la investigación con embriones humanos, o la de las madres de alquiler.

Ingeniería genética

El redescubrimiento de las leyes de Mendel en 1900 permitió comenzar a establecer una teoría genética, que una décadas más tarde demostró su eficacia en la mejora de las especies biológicas útiles.

La estructura del DNA fue descubierta en 1953, y a partir de entonces los genes dejaron de ser entes ideales para convertirse en fragmentos de moléculas reales, con propiedades físicas y químicas determinadas y susceptibles de manipulación mediante técnicas propias de la física y de la química.

Actualmente, el manejo de material genético comienza a parecerse a la edición de textos o películas. Cortar, copiar y pegar son tareas habituales en biotecnología. Los problemas derivados de la complejidad de los sistemas biológicos impiden aún que las cosas sean sencillas, de todos modos.

Uno de esos problemas es la organización del mensaje genético. Sólo una parte del DNA de las células eucarióticas es portadora de mensajes genéticos; hay genes que dirigen la expresión de otros genes, existen genes distintos que condicionan la expresión de otros, existen genes que actúan de distinto modo en respuesta a mecanismos aún no conocidos y, en el caso humano, no se ha completado el conocimiento del genoma y será mucho más difícil establecer el significado de cada una de las secuencias y sus complejas interacciones.

Puede entenderse la manipulación genética como un mecanismo humano, es decir, externo y dirigido, mediante el cual los seres vivos pueden transmitirse genes horizontalmente y extenderlos a una velocidad explosiva.

Los genes alterados que se extienden no tienen porque ser "buenos" para los organismos manipulados. La consecución de frutas sin semilla puede ser un logro espectacular para el comercio frutero humano, pero en principio son una catástrofe para el ciclo vital natural de los frutales, que invierten una gran cantidad de esfuerzo en acumular glúcidos para incrementar sus posibilidades de supervivencia mediante una semilla... que ya no existe. Tal organismo depende completamente de quien manipuló su genoma y extendió su cultivo, eliminando con ello las variedades silvestres.

Es difícil señalar los límites del poder de la ingeniería genética en medicina. Es la gran esperanza contra el aumento de la resistencia a los antibióticos de las bacterias patógenas. Se prevé la fabricación de "balas mágicas" y vacunas contra el cáncer. La manipulación de gametos y embriones, (tema enormemente polémico en el caso humano), podría permitir la eliminación de las enfermedades de origen genético. Diseñar animales con genes humanos que puedan servir para sustituir órganos humanos. Disponer de bancos de tejidos celulares apropiados para sustituir tejidos dañados en pacientes humanos. El diseño de seres humanos a la carta y el control sobre el envejecimiento entran dentro de lo posible.

En campos como la alimentación, la producción de medicamentos, la minería, la industria medioambiental y otros, las posi-

bilidades pueden parecer cosa de magia. Frutas que no se pudren y contienen vacunas frente a ciertas enfermedades. Plantas muy productivas y resistentes a las enfermedades, capaces de resistir duras condiciones climáticas. Animales modificados para aumentar su velocidad de crecimiento y la proporción de aquellas partes más apreciadas como comestibles. Purificación de minerales en minería. Producción de sustancias. Procesado de residuos y descontaminación del medio. Asociación de componentes biológicos y electrónicos que permitan la comunicación directa entre el cerebro y los ordenadores.

La enumeración anterior no es una lista al azar de posibilidades. Hay realidades y proyectos en marcha en cada caso. La revolución biotecnológica puede cambiar nuestras vidas en el plazo de una o dos décadas.

Los recursos poderosos pueden ofrecer al mismo tiempo grandes ventajas y grandes peligros. Los xenotrasplantes pueden actuar como "caballos de Troya" mediante los cuales algunos virus podrían llegar a adaptarse a la especie humana y crear graves enfermedades. Los alimentos transgénicos incorporan genes cuya actuación en el organismo humano podría resultar imprevisible. Los cultivos a los que se han añadido genes para proporcionarles resistencia a las plagas, (como el que produce la toxina insecticida natural del *Bacillus thuringiensis*), pueden acelerar el proceso evolutivo de incremento de resistencia a la toxina de las especies, y el gen podría ser transmitido, mediante algunos virus, a malas hierbas que tendrían entonces una defensa adicional. Bacterias capaces de degradar los plásticos serían una gran ayuda o una gran catástrofe según su ámbito de actuación y la

capacidad humana para controlarlas. Además, persisten las guerras, y, por ejemplo, un centenar de kilogramos de esporas de ántrax bastaría para aniquilar a toda la población de una ciudad. La ingeniería genética comporta también todos estos riesgos.

La apropiación del tiempo

En el proceso evolutivo normal cada línea filogenética es independiente del resto. Los caballos, los ratones, los cerdos y los seres humanos compartimos muchas moléculas, puesto que pertenecemos al mismo grupo taxonómico, el de los mamíferos. Las cuatro especies citadas fabrican insulina en sus hígados respectivos y la función de la insulina es similar en todos ellos. No es una coincidencia, ello se debe a que las cuatro proceden de un antecesor común que ya fabricaba insulina. Sin embargo, las moléculas de insulina respectivas no son idénticas, sino que muestran diferencias significativas. A lo largo del tiempo, en la medida en que el grupo de los mamíferos se fue diversificando, se fueron acumulando mutaciones en las moléculas de los distintos organismos y la insulina es una de entre los miles de moléculas que muestran las huellas de esa historia. La diferencia en la secuencia de aminoácidos de las respectivas insulinas indica el tiempo transcurrido desde la separación en ramas distintas de las especies indicadas.

Como ya se ha indicado, en la naturaleza, la transmisión horizontal de genes entre distintas especies no ocurre sino muy esporádicamente. La moderna biotecnología permite realizar la transmisión horizontal de genes de forma cada vez más eficaz. Es posible tomar un gen de una especie, incluirlo en el

genoma de otra y activarlo. Genes que no adquiriría una célula en un millón de años de evolución pueden ser insertados en horas. La ingeniería dispone ya de un imponente arsenal de recursos y es capaz de cortar y unir con precisión fragmentos de DNA en un lugar determinado, a veces con utilización de virus previamente modificados. Existen métodos para amplificar miles de veces fragmentos de DNA. Se ha aprendido a utilizar la capacidad de ciertas enzimas para añadir o quitar grupos químicos de los polinucleótidos. Es posible aislar un gen determinado de un cromosoma y modificarlo con posterioridad para incorporarlo en otra célula y producir la proteína que codifica.

No sólo es posible. Es real, ya se ha hecho. Se ha secuenciado completamente el genoma de una veintena de microorganismos, entre ellos los causantes de la tuberculosis y de la sífilis. Se trata ahora de llegar a comprender su significado, lo que se ha conseguido ya en parte. Este conocimiento debe ser la base del próximo arsenal terapéutico, el nuevo recurso frente a los agentes patógenos resistentes a los antibióticos actuales.

La evolución requiere tres mecanismos básicos: mutación, selección y aislamiento genético. La biotecnología tiene capacidad para alterar los tres mecanismos. Más aún, puede incluso crearlos, diseñarlos en función de sus intereses. Se dispone de agentes mutágenos, de filtros de selección de moléculas y organismos, se puede aislar a las especies.

La evolución llevada a cabo por la vida en nuestro planeta a lo largo de 4000 millones de años no es reproducible. Es un proceso histórico, y cualquier acontecimiento puede alterar el devenir posterior. Pero sí es

posible acortar los plazos de evolución destinados a la producción de una molécula o un organismo con unas características concretas. Es posible una evolución dirigida. La biotecnología tiende a la apropiación del tiempo evolutivo.

En evolución, el tiempo conduce a la biodiversidad. El zoólogo Edward O. Wilson, en su libro "La diversidad de la vida" fundamenta de forma ejemplar la necesidad de conservar de la biodiversidad y, en un pasaje revelador, señala por qué las especies nuevas no pueden sustituir a las desaparecidas.

"En conclusión, las especies pueden ser creadas rápidamente, y la diversidad puede por tanto expandirse de forma explosiva. Nuestro conocimiento de la evolución, muy imperfecto, nos dice muy poco acerca de por qué la vida tiene ese potencial. Dadas las circunstancias adecuadas, una nueva especie puede surgir en una o varias generaciones.

Esta visión del origen de la diversidad plantea una inquietante cuestión, con matices éticos: si la evolución puede ocurrir rápidamente, con el número de especies rápidamente restaurado, ¿por qué debemos preocuparnos por la extinción de las especies? La respuesta es que las nuevas especies son habitualmente especies de escaso valor. Pueden ser muy diferentes en sus rasgos externos, pero son aún genéticamente similares a las formas ancestrales y a las especies hermanas que las rodean. Si ocupan un nuevo nicho, probablemente lo hacen con relativa ineficiencia. No han sido aún bien ajustadas mediante el vasto número de mutaciones y episodios de selección natural necesarios para instalarse sólidamente en la comunidad de organismos en que nacieron. Parejas de especies hermanas recientemente creadas son a menudo tan parecidas en sus dietas, así como en preferen-

cias de cría, susceptibilidad a enfermedades concretas y otros rasgos biológicos, que no pueden coexistir. Cada una tiende a imponerse a la otra por competencia. Al final ocupan diferentes áreas, de modo que las comunidades locales no se enriquecen con la presencia de ambas.

La gran biodiversidad local requiere largos lapsos de tiempo geológico y la acumulación de amplios reservorios de genes únicos. Los ecosistemas más ricos se construyen lentamente, a lo largo de millones de años. Además, de forma fortuita, sólo unas pocas nuevas especies son capaces de instalarse en nuevas zonas adaptativas para crear algo espectacular y ensanchar los límites de la biodiversidad. Un panda o una sequoia representan una magnitud de evolución que se produce sólo raramente. Se necesita un golpe de suerte y un largo período de pruebas, experimentos y fracasos. Dado que una creación es parte de una profunda historia, y el planeta no tiene los recursos ni nosotros el tiempo de verla repetida".

Asoma en las líneas anteriores el valor del patrimonio histórico de cada ser vivo, la dimensión del tiempo como recurso evolutivo necesario para la adaptación precisa de las especies y la integración de los ecosistemas.

Las especies y las moléculas creadas por la vida han sufrido múltiples procesos de mutación y selección, son el resultado de la supervivencia a miles de millones de años de evolución y han demostrado su capacidad de afrontar con éxito los retos del medio ambiente. Partiendo de esa diversidad, seleccionada entre millones de especies y moléculas que ya no existen, la probabilidad de hallar recursos útiles para la alimentación, la salud y el medio ambiente es enorme. Privada de los productos de la biodiversidad, la biotecnología se vería obligada a recorrer el

camino a ciegas. La historia de la vida en la Tierra es única, no es repetible, y es la nuestra. No tenemos otra. Lo delata cada uno de los detalles de cada uno de los organismos que habitan el planeta. No se puede olvidar que la evolución biológica se permitió esculpir su obra maestra eliminando caracteres en número incontable porque dispuso de una riqueza genética que con el tiempo resultó ser infinita.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala, F. J. Vagaries of the molecular clock. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1997, jul 94:15, 7776-83.
- Bottrell, Dale G.; Barbosa, Pedro. y Gould, Fred. (1998). Manipulating natural enemies by plant variety selection and modification: A realistic strategy? Annual Review of Entomology, 1998. 43:347-367.
- Bowler, P.J. 1992. Evolution. The history of an idea. Berkeley: Univ. California Press.
- Carson, Rachel. (1980). Primavera silenciosa. Barcelona: Grijalbo.
- Debach, Paul. (1977). Lucha biológica contra los enemigos de las plantas. Madrid: Mundi-Prensa.
- Dobzhansky, Th., Ayala, F. J., Stebbins, G. L. y Valentine, J. W. 1980. Evolución: Barcelona. Ed. Omega.
- González Candelas, Fernando. 1996. Introducción a la Teoría de la Evolución. Valencia: Universitat de València.
- Gould, Stephen Jay. Ever since Darwin. New York: W. W. Norton.
- Haseltine. Búsqueda de genes para el diseño de nuevas medicinas. Investigación y Ciencia. 1997. 248:16-21.
- Kimura, Motoo. Teoría neutralista de la evolución molecular. Investigación y Ciencia. 1980. 40:46-57.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., Cox, M.m. 1993. Principios de Bioquímica. Barcelona: Ed. Omega.
- Levy, Stuart B. La resistencia contra los antibióticos. Investigación y Ciencia. 1998. 260:14-21.
- Mayr, Ernst. (1992). Una larga controversia: Darwin y el darwinismo. Barcelona: Crítica.
- Mindell, David P; y Thacker Christine E. Rates of molecular evolution: Phylogenetic issues and applications. Annu. Rev. Ecol. Syst. 1996. 27:279-303.
- Muñoz, Emilio. (1991) Genes para cenar. Madrid: Temas de Hoy.
- Sagan, Carl. Cosmos. (1992). Barcelona: RBA.
- Wilson, Edward O. (1992). The diversity of life. London: Penguin Books.