

Hubo una vez una célula de la que descendemos todos los seres vivos que han sido y son en la Tierra, desde la bacteria del ántrax hasta los dinosaurios, de los geranios al perro del vecino. Los investigadores del instituto Salk (California) Juan Carlos Izpisúa Belmonte, Diego Rasskin y Ángel Raya explican en este capítulo cómo la evolución ha propiciado la exuberante variedad de la vida

9. LA EVOLUCIÓN

De la sopa primitiva al gazpacho andaluz



JUAN CARLOS IZPISÚA BELMONTE / DIEGO RASSKIN / ÁNGEL RAYA

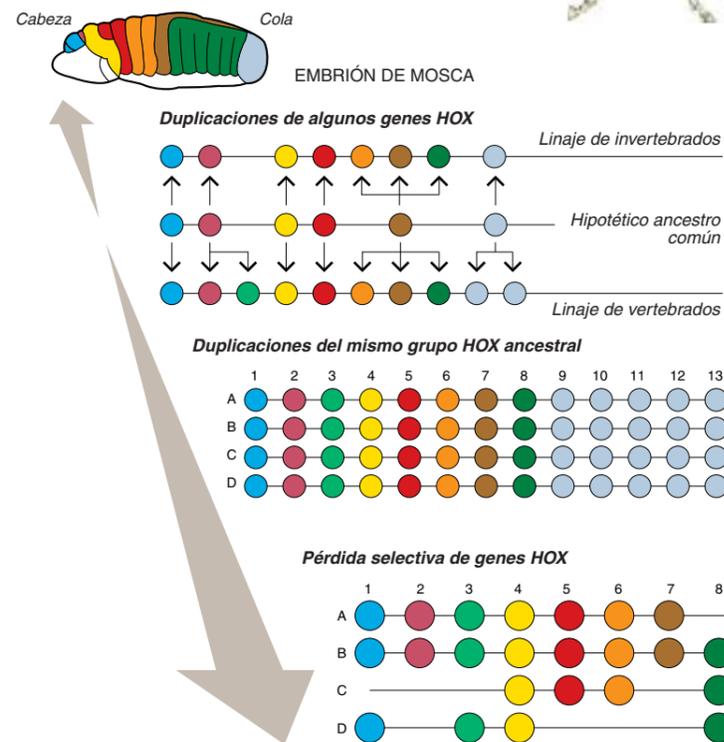
La historia del origen de la vida va ligada a la historia de la Tierra como cuerpo celeste, que comenzó su andadura hace unos 4.600 millones de años. Desde el comienzo de la condensación del planeta hasta la aparición de las primeras trazas de actividad orgánica registradas pasaron alrededor de mil millones de años, es decir, la vida apareció en la Tierra hace al menos 3.600 millones de años. Y desde la sopa primitiva hasta la aparición de la especie humana pasaron otros 3.600 millones de años. Mil millones de años para crear vida y 3.600 para cocinar un gazpacho, de lo que se deduce la complejidad intrínseca de la gastronomía humana.

Siempre embebida en consideraciones religiosas, a la vida se la ha visto como un milagro, un don de los dioses que nos mostraban su omnipotencia diseñando los intrincados detalles de las estructuras orgánicas. ¿Cómo, si no, pudo haberse originado una estructura tan compleja como el ojo humano?, aún se preguntan los creacionistas, apoyados en el dogma religioso, ignoran datos científicos que apuntan claramente a que la vida se originó a partir de lentos y fortuitos procesos químico-físicos en los albores de la existencia de nuestro planeta. Y todas las especies que pueblan o han poblado la Tierra en el pasado son el fruto de un proceso imparabile e incontestable: la evolución.

A principios del siglo XX se comenzó a trabajar en ideas plausibles y reproducibles acerca del origen de la vida. Debemos al científico ruso A. I. Oparin y al británico J. B. S. Haldane los primeros conceptos acerca de la *sopa primitiva*, un escenario del origen de la vida en donde los

La evolución de los genes maestros

La evolución de los genes HOX proporciona un punto de partida para comprender la relación entre la genética y los grandes cambios de forma que originan nuevas especies. Los organismos invertebrados, como la mosca, sólo poseen un grupo de genes HOX y se supone que el ancestro de todos los vertebrados tenía también un solo grupo. Una serie de duplicaciones del grupo completo dió lugar a los vertebrados. Algunos genes de cada grupo se fueron perdiendo.

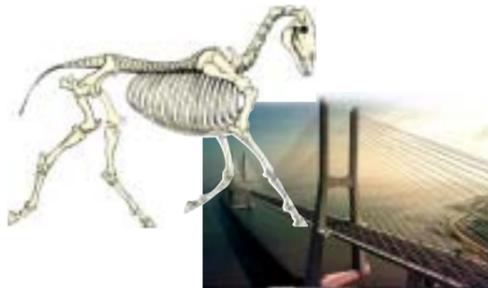


Cada círculo representa un gen. El color de cada uno sirve para ver en qué zonas del embrión se activan durante el desarrollo. En los animales, estos genes se activan secuencialmente en el tiempo y en el espacio empezando por la cabeza y terminando por la cola. La aparición de nuevos genes mediante la duplicación de los ya existentes es un mecanismo común que puede dar lugar a varias especies diferentes. En la mayoría de los casos, los cambios genéticos no producen ningún resultado en la forma y la función del organismo. En muchos otros, el organismo es inviable. Sólo unos pocos casos salen adelante.

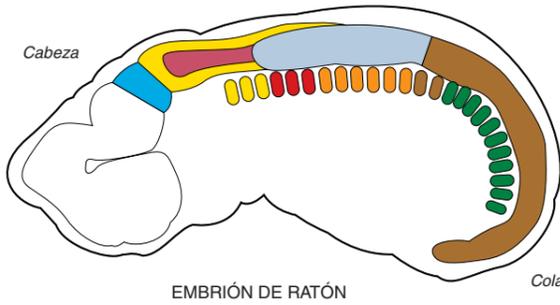
Fuente: Elaboración propia.

compuestos orgánicos se habrían sintetizado de manera espontánea en las aguas de los océanos. En este hipotético caldo, los *coacervados* o gotas de grasa que se autoorganizan de manera espontánea englobando moléculas presentes en suspensión (como si fueran membranas celulares) formarían los primeros organismos

de la Tierra. Un experimento clave de la biología, llevado a cabo por S. L. Miller en 1956, demostró que la síntesis espontánea de compuestos orgánicos era posible en el medio oceánico de entonces. Miller puso agua, amoníaco, metano e hidrógeno, y los sometió a descargas eléctricas periódicas durante una semana. Al anali-



El esqueleto de un vertebrado terrestre y la estructura de un puente colgante guardan muchos puntos en común. Los dos son un juego entre la forma y la función dependientes de los materiales para su construcción. Mientras que en arquitectura el diseño debe ajustarse a la función, en biología es la forma la que permite la función. La función de una estructura esta permanentemente a prueba en la vida de un organismo y durante la historia de una especie, convirtiéndose en el blanco principal de la selección natural. Pero la función se encuentra muy restringida por las reglas del cambio de forma. En la evolución no vale todo, hay que jugar con lo que permite la forma.



EL PAÍS

zar el resultado, comprobó que se habían sintetizado aminoácidos, urea y otros compuestos orgánicos. Desde entonces, múltiples experimentos han probado que es posible sintetizar espontáneamente casi todos los compuestos orgánicos necesarios para generar un sistema vivo primitivo.

Aunque muchos de los detalles de las teorías de Oparin ya no tienen vigencia, el concepto fundamental del origen de los compuestos orgánicos se sigue sosteniendo. Otro problema ha sido tratar de averiguar cómo se originó el material genético, ya que la síntesis de ADN se hace gracias a la acción de las polimerasas, proteínas que necesitan, para su fabricación, la presencia de genes. Una manera de saltarse este círculo vicioso es pensar en un mundo primitivo donde la información genética estaba almacenada en moléculas de ARN, ya que, al tener propiedades enzimáticas, habría sido capaz de promover su propia síntesis, sin la necesidad de proteínas especializadas. Más adelante, esa información se traduciría a cadenas de ADN, que, por su mayor estabilidad, suplantaría al ARN como almacén genético universal.

Un juego de amores y odios

La idea de que las especies evolucionan es tan vieja como la filosofía griega. Empédocles veía la transformación de las especies como un juego de fuerzas de amor y odio que hacía que distintas partes del cuerpo se unieran o rechazaran, creando distintas combinaciones, a veces aberrantes, hasta llegar a formar un organismo funcionalmente aceptable. Las teorías más serias acerca del mecanismo de la evolución proceden del siglo XIX. Jean Baptiste de Lamarck y Charles Darwin (junto con Alfred Wallace) propusieron las dos teorías que se han mantenido vigentes hasta hoy, si bien el lamarckismo, al menos en su versión más radical, tiene un menor impacto.

La teoría de Lamarck propone la herencia de caracteres adquiridos, es decir, aquellas características conseguidas por los padres se transmiten a la siguiente generación, y así sucesivamente. Hoy día se sabe que existen algunos caracteres adquiridos. Uno de estos

Distintos héroes para cada momento

LA HISTORIA DE LA TIERRA se divide en etapas atendiendo a los distintos fenómenos geológicos o biológicos que van marcando el paso de unas a otras. Cada etapa tiene sus héroes, sus faunas y floras. La etapa más larga, el precámbrico, alcanza desde el origen de la vida hasta hace unos 540 millones de años. Los héroes de esta etapa son, sin duda, las bacterias, que, entre otras cosas, fueron responsables de transformar la atmósfera primitiva de la Tierra, rica en CO₂, en una atmósfera de oxígeno parecida a la que conocemos hoy día, posibilitando el origen de organismos como nosotros. Antes

del final de esta etapa, que duró más de 3.000 millones de años, ya aparecieron organismos eucariotas (hace unos 1.500 millones de años) y los primeros organismos invertebrados (hace 800 millones de años). El origen de la vida en la Tierra (posiblemente hace unos 3.600 millones de años) sucedió alrededor de mil millones de años después de la solidificación de nuestro planeta. Sin embargo, para que aparecieran los primeros eucariotas (células con núcleo) pasaron otros 2.000 millones de años, y casi otros 1.000 millones más para que lo hicieran los animales pluricelulares. De algún modo, es

más fácil generar un organismo vivo primitivo que transformarlo en uno complejo.

El comienzo de la era paleozoica marca lo que se conoce como la *explosión cámbrica*, el origen de la mayor parte de los grupos de organismos, hace 540 millones de años. Aparecen los animales vertebrados, cuyos protagonistas durante el paleozoico serían los peces. Al final de esta era comenzaría la conquista de la tierra con la aparición de los primeros anfibios, hace unos 300 millones de años. Durante el mesozoico aparecieron los reptiles, las aves y los mamíferos. Con una duración de poco me-

nos de 200 millones de años, ésta es la era de los dinosaurios, que terminaría hace 65 millones de años con el impacto de un gigantesco meteorito en Yucatán. Este episodio dio origen a la actual era, el cenozoico, protagonizada por los mamíferos. *Homo*, el género al que pertenece nuestra especie se originó al final de esta era, en algún lugar de África hace entre tres y cuatro millones de años.

En esta fascinante aventura de la vida, las bacterias siguen ahí para recordarnos nuestros humildes orígenes hace casi 4.000 millones de años.

mecanismos consiste en la modificación del ADN por medio de la *metilación* de las bases. De este modo se consigue que la experiencia de un individuo modifique la información genética que pasará a la descendencia. Pero el mecanismo más aceptado hoy día, conocida como evolución a través de la selección natural, procede de las ideas de Darwin y Wallace.

La teoría evolutiva basada en la selección natural tiene los siguientes elementos. En primer lugar, se reconoce que los individuos de una población se reproducen de manera imperfecta, es decir, los hijos son distintos a los padres, presentan *variación*. Por otro lado, se postula que, debido a la escasez de recursos, estos individuos compiten entre sí para obtenerlos (no hay más que fijarse en las palomas de una plaza tratando de conseguir migas de pan). El resultado, a largo plazo, es que aquellos individuos que puedan competir mejor dejarán más descendencia que el resto, haciendo que el conjunto de la población posea caracteres más parecidos a los de estos individuos más *aptos*. La selección natural es justamente este proceso por el cual los individuos más aptos se seleccionan frente a los menos aptos, por eso se habla de *presión selectiva*. Con tiempo suficiente, postulaba Darwin, estas poblaciones darán lugar a una nueva especie y el ciclo comenzará de nuevo.

A mediados del siglo XX se llevó a cabo la *síntesis* entre las teorías de Darwin y el conocimiento acumulado con la investigación genética. Con esta integración se logró relacionar el efecto de las mutaciones sobre los genes como mecanismo evolutivo universal. A partir de entonces, la teoría de la evolución se ha identificado, únicamente, con la acción indirecta de la selección natural sobre los genes. Este concepto afirma que, en una especie bajo presión selectiva, se elegirán los individuos cuyos genomas se encuentren mejor adaptados a las condiciones de su entorno. Esta simplificación asume que cualquier carácter de un organismo tiene razón de ser (es *adaptativo*), olvidando que muchos de ellos sólo cambian por su asociación con otros caracteres. Además, se ha demostrado que la mayoría de las mutaciones no son adaptativas, sino neutrales, sin afectar ni a la forma ni a la función de los organismos.

El énfasis en la lucha por la supervivencia en un mundo de recursos escasos ha hecho de la teoría darwinista una plataforma para lanzar una ideología social individualista e insolidaria que ha distorsionado el pensamiento de uno de los grandes científicos de todos los tiempos (sin olvidar que muchos de sus escritos llevan la marca neoliberal, racista, sexista e imperialista de la época). No cabe duda de que las sociedades evolucionan y de que muchos de los comportamientos sociales y culturales tienen su origen en nuestro pasado evolutivo. Pero extrapolar directamente el conocimiento de la biología de nuestro planeta para explicar la cultura humana debe hacerse con muchísimo tiento, para no caer en simplificaciones que dejen de lado el complejo entramado cultural que han tejido las distintas civilizaciones del mundo.

Cambiar y seguir cambiando

—Aquí es necesario correr cuanto puedas para quedarte en el mismo sitio —dijo la Reina Roja. La evolución de las especies sigue el mismo guión ideado por Lewis Carroll en *Alicia a través del espejo*. Las especies cambian

para no perderse la oportunidad de existir, a medida que las condiciones externas también cambian. Y esas alteraciones se ven en la forma, la función y el comportamiento de los organismos. En esencia, un colibrí es un tiranosaurio que ha logrado sobrevivir a las contingencias de su entorno. Para ello, la transformación que ha tenido que sufrir, a lo largo de millones de años, no es nada desdeñable. La mayor parte de los cambios están relacionados con las transformaciones que sufre el genoma de generación en generación debido a las múltiples mutaciones que se suceden en la larga cadena de ADN de las células germinales. Pero también hay otros medios de adquirir secuencias nuevas de ADN, como, por ejemplo, la llamada *transmisión horizontal*, por la cual pedazos de ADN de un organismo pueden pasar a otro viajando en un virus.

Las duplicaciones de genes preexistentes son moneda común en la evolución de las especies. Este tipo de mecanismo re-

suelve varios problemas, ya que un gen que codifica una proteína útil, al duplicarse, puede mutar y *explorar* nuevas secuencias que pueden hacer que la nueva proteína pase a tener una nueva función. Así, por ejemplo, los genes homeóticos, aquellos factores de transcripción tan importantes en la especificación de las partes del cuerpo en animales, se encuentran dentro del genoma en grupos ordenados (ver gráfico). En organismos invertebrados hay sólo un grupo de genes Hox, igual que en el hipotético ancestro de todos los vertebrados. En estos últimos, incluida la especie humana, este grupo de genes se ha multiplicado para formar hasta cuatro grupos (aunque en otros vertebrados ha habido más duplicaciones, como en el pez cebra, que tiene seis grupos).

Otros mecanismos que pueden generar especies nuevas operan sobre el momento y la rapidez con que una estructura comienza a desarrollarse o deja de hacerlo (heterocronías). Este

JOSÉ LUIS SANZ

CATEDRÁTICO DE PALEONTOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

“Parece divertido pensar en la idea de que todos seamos descendientes de un ser extraterrestre”

José Luis Sanz es geólogo, profesor de paleontología y experto en la biología evolutiva de los dinosaurios. Sus investigaciones sobre el origen y evolución de las aves han colocado a España en lugar de excepción dentro de la paleontología mundial.

Pregunta. ¿Qué aporta la dimensión evolutiva al estudio de la biodiversidad actual?

Respuesta. La biología evolutiva es la única rama de la ciencia que posee los conceptos y los métodos para analizar cómo se ha organizado la materia viva y qué mecanismos han generado la biodiversidad actual.

P. ¿Qué hay de cierto en la hipótesis del origen extraterrestre de la vida?

R. La hipótesis de la panespermia (*sembrado* vital de mundos a través del universo mediante esporas en meteoritos o cometas) se la atribuyen al premio Nobel de Química (1903) S. A. Arrhenius. Francis Crick propuso también, en 1981, que la vida era de origen extraterrestre. En la última década, una serie de experimentos han avalado esta hipótesis al demostrar que las esporas pueden resistir condiciones extremas de aceleración e impacto y que podrían resistir en el espacio exterior un viaje *corto* (por ejemplo, Marte-Tierra) en pequeños fragmentos de roca. Algunos astrofísicos afirman que, si existen o han existido microorganismos en Marte, su transferencia viable a la Tierra es altamente probable. Hay una corriente de opinión científica cada vez mayor favorable a la idea de que la panespermia puede ser un fenómeno usual en el universo. Parece divertido pensar en la idea de que to-



El paleontólogo José Luis Sanz.

dos seamos descendientes de un ser extraterrestre.

P. Todos los organismos poseen un alto grado de complejidad. Sin embargo, desde nuestra postura antropocéntrica, nos gusta pensar que somos la especie más compleja de la historia evolutiva del planeta. ¿Cuál es el punto de vista de un paleontólogo al respecto?

R. El incremento en la complejidad de los organismos podría proporcionar una *flecha direccional* a la evolu-

ción. Pero no está claro de qué estamos hablando cuando decimos complejidad. Dos paleontólogos americanos, A. H. Knoll y R. K. Bambach, han sugerido recientemente que en la historia de los organismos vivos existe una dirección de incremento del espacio ecológico utilizado por las especies. Desde este punto de vista, los seres humanos somos singulares por el desarrollo de un control intencional y global del medio ambiente. En otros sentidos, la supuesta sin-

gularidad humana no parece tan evidente. Por ejemplo, en lo relativo a la complejidad estructural. No es evidente que seamos más complejos morfológicamente que un delfín o un chimpancé.

P. Las extinciones son tan importantes en la dinámica evolutiva como el origen de especies nuevas. ¿Hay una vida media para cada especie? ¿Qué cabe esperar para la especie humana? ¿Nos extinguiremos?

R. El registro fósil muestra claramente que las especies tienen un momento de aparición y otro de extinción. No hay una manera exacta para “medir” la vida media de las especies, que pueden existir desde millones hasta decenas de millones de años, dependiendo del linaje al que pertenece cada una. Parece obvio que el destino del hombre es extinguirse, aunque poseamos ciertas singularidades que tienen que afectar al proceso. Dos preguntas inmediatas son cómo y cuándo. La segunda es de difícil contestación. Con la primera surgen multitud de especulaciones: riesgos tecnológicos, políticos, catástrofes naturales, la drástica alteración de los ecosistemas del planeta propiciada por la actividad humana, incluso la posibilidad de ser arrasados por una invasión extraterrestre. Hay posiciones radicales como la de John Maddox, editor de la revista *Nature* durante 23 años, quien afirmó recientemente que la raza humana ha tomado la decisión de sobrevivir y “al infierno con el resto del ecosistema”. Estas drásticas declaraciones han de situarse, no obstante, dentro del concepto filosófico-científico de que el hombre forma parte de la naturaleza y, por tanto, de los procesos históricos que la afectan.

El énfasis en la lucha por la supervivencia ha hecho de la teoría darwinista una plataforma para lanzar una ideología social individualista e insolidaria

La evolución une a todos los seres en una cadena común de interrelaciones históricas. Conocer sus mecanismos permite dar sentido a lo que ocurre en el presente

mecanismo es el responsable en gran medida del nacimiento de nuestra especie. El cráneo humano es el resultado de un desarrollo más lento que el de nuestros ancestros primates, por lo que tiene mucho más tiempo para crecer y desarrollarse. Por eso el cráneo adulto de nuestra especie se asemeja más al cráneo del bebé de un chimpancé que al cráneo de un chimpancé adulto.

La evolución une a todos los seres de la Tierra en una cadena común de interrelaciones históricas. Conocer sus mecanismos nos permite comprender y dar sentido a lo que ocurre en el presente. Tanto los estudios que se centran en el pasado, analizando los fósiles, como los que lo hacen en el presente, analizando las especies que pueblan la Tierra, deben formar parte del esfuerzo conjunto por armar el rompecabezas de la vida. Por eso es tan importante que la investigación paleontológica y geológica complemente la investigación biológica.