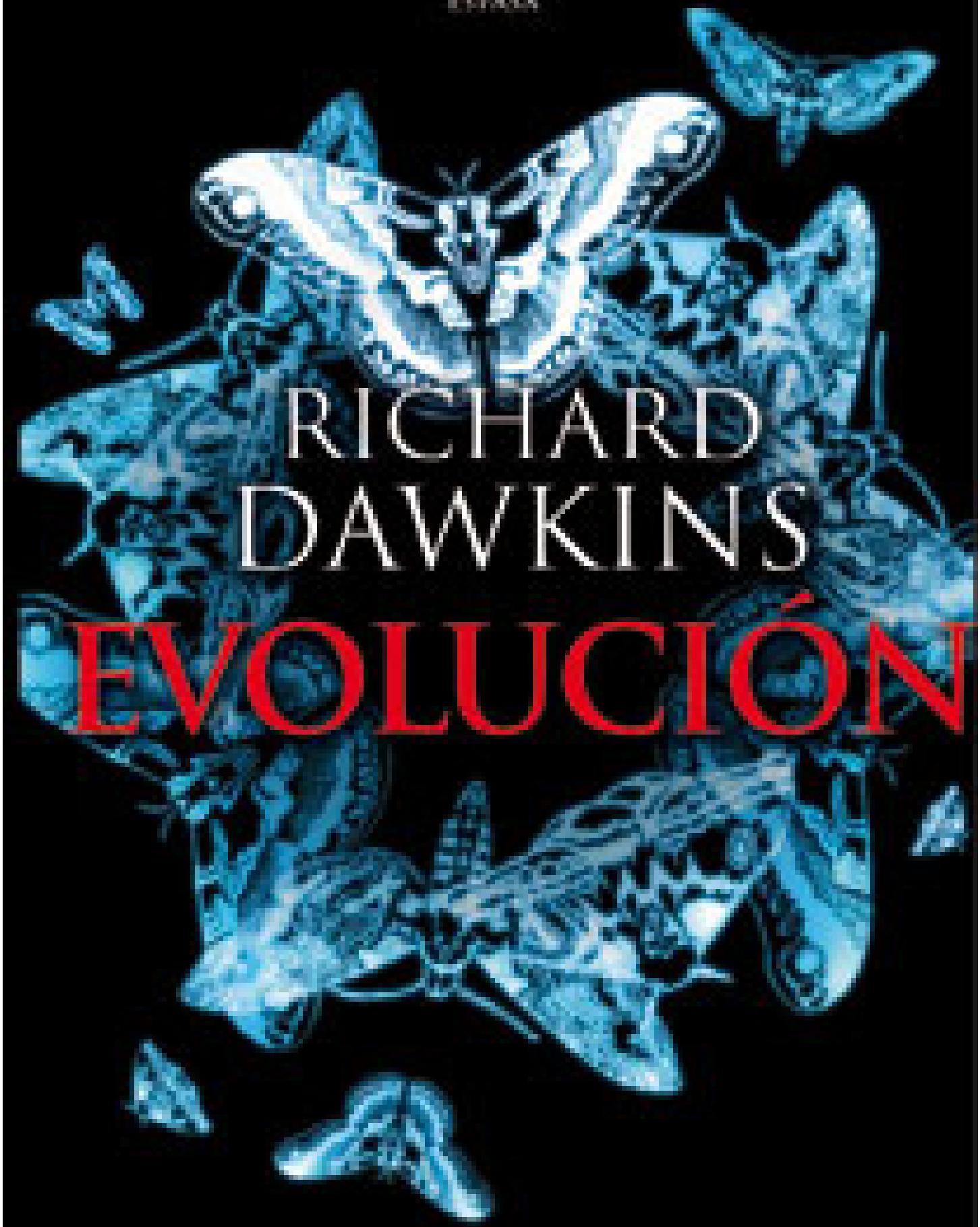
ESPASA



RICHARD DAWKINS

EVOLUCIÓN

EL MAYOR ESPECTÁCULO SOBRE LA TIERRA

ESPASA

EVOLUCIÓN

RICHARD DAWKINS

El mayor espectáculo sobre la Tierra

e-BOOK

Para Josh Timonen

PRÓLOGO

Cada día aparecen nuevas pruebas que respaldan la evolución, y son más sólidas que nunca. Al mismo tiempo, aunque resulte paradójico, la oposición mal informada también cobra más fuerza de la que puedo recordar. Este libro es mi resumen personal de las pruebas que demuestran que la «teoría» de la evolución es un hecho real —tan irrefutable como cualquier otro hecho de la ciencia—.

Este no es el primer libro que escribo sobre la evolución, y debo explicar qué es lo que lo hace diferente. Podría definirse como mi eslabón perdido. *El gen egoísta* y *El fenotipo extendido* ofrecían una versión poco habitual de la conocida teoría de la selección natural, pero no hablaban sobre la evidencia de que la evolución realmente haya ocurrido. Mis tres libros siguientes, cada uno a su manera, trataban de identificar, y de deshacer, distintas barreras del conocimiento. Estos libros, *El relojero ciego, El río del Edén* y (mi favorito) *Escalando el monte improbable,* respondían a preguntas como «¿qué utilidad tiene medio ojo», «¿qué utilidad tiene media ala?», «¿cómo puede funcionar la selección natural si la mayoría de las mutaciones tienen efectos negativos?». No obstante, aunque estos tres libros despejaban algunas dudas importantes, no mostraban pruebas reales de que la evolución sea un hecho. Mi libro más extenso, *El cuento del antepasado,* exponía todo el curso de la historia de la vida, en forma de una especie de peregrinaje chauceriano en busca de antepasados, hacia atrás en el tiempo, pero de nuevo asumía como cierto el hecho de la evolución.

Al revisar estos libros me di cuenta de que en ninguno de ellos aparecían pruebas del hecho de la evolución, y ese era un problema importante que debía zanjar. El año 2009 me pareció un buen momento para hacerlo, ya que se celebra el bicentenario del nacimiento de Darwin y el 150.º aniversario de la publicación de *El origen de las especies.* Como es lógico, no soy el único que se percató de esta coincidencia, y en este

año han visto la luz obras excelentes, entre las que destacaría el libro de Jerry Coyne *Why Evolution is True* [Por qué la evolución es verdad]. La muy favorable reseña que escribí sobre esta obra en el *Times Literary Supplement* puede consultarse en http://richarddawkins.net/article,3594,Heat-the-Hornet,Richard-Dawkins.

El título provisional que mi agente literario, el visionario e infatigable John Brockman, sugirió a los editores para mi libro fue *Solo una teoría*. Después se dio cuenta de que Kenneth Miller ya se nos había adelantado utilizándolo para su larguísima contestación a una de esas demandas judiciales por las que a veces se deciden los planes de estudios científicos (un juicio en el que desempeñó un papel heroico). En cualquier caso, siempre tuve dudas sobre la idoneidad del título de mi libro, y estaba dispuesto a archivarlo cuando me di cuenta de que el título perfecto llevaba tiempo esperándome en otro estante. Hace varios años, un admirador anónimo me envió una camiseta en la que aparecía el siguiente eslogan jocoso: «Evolución, el mayor espectáculo del mundo, el único juego en la ciudad». De vez en cuando se me pasaba por la cabeza comenzar una conferencia con ese título, y de pronto comprendí que sería un título idóneo para este libro, aunque si lo utilizaba completo iba a resultar demasiado largo. Lo reduje a *Evolución. El mayor espectáculo sobre la Tierra*. Por otra parte, «Solo una teoría», precavidamente encerrado entre signos de interrogación para evitar que los creacionistas lo sacaran de contexto, sería un estupendo título para el primer capítulo.

He recibido ayuda de varias formas y de parte de mucha gente, como Michael Yudkin, Richard Lenski, George Oster, Caroline Pond, Henri D. Grissino-Mayer, Jonathan Hodgkin, Matt Ridley, Peter Holland, Walter Joyce, Yan Wong, Will Atkinson, Latha Menon, Christopher Graham, Paula Kirby, Lisa Bauer, Owen Selly, Victor Flynn, Karen Owens, John Endler, Iain Douglas-Hamilton, Sheila Lee, Phil Lord, Christine DeBlase y Rand Russell. Sally Gaminara y Hillary Redmond, quienes, junto con sus (respectivos) equipos de Gran Bretaña y Estados Unidos, me han prestado un magnífico apoyo. En tres ocasiones durante los últimos pasos de producción del libro han aparecido nuevos e importantes descubrimientos en la prensa científica. En cada una de esas ocasiones pregunté tímidamente si se podrían alterar los ordenados y complejos procedimientos de publicación para incluir estos nuevos descubrimientos. Las tres veces, en lugar del gruñido que cabría esperar de cualquier editor

ante estas molestas incorporaciones de última hora, Sally y Hilary aceptaron las propuestas con un entusiasmo alentador y movieron cielo y tierra para hacerlas efectivas. Gillian Somerscales resultó ser igual de entusiasta y servicial en la labor de revisión y organización del libro, que llevó a cabo con auténtica inteligencia y sensibilidad.

Mi esposa, Lalla Ward, ha sido una vez más mi mayor soporte, con un valor infatigable, unas muy útiles críticas estilísticas y sus clásicas y elegantes sugerencias. El libro se concibió y empezó a escribirse durante mis últimos meses en la cátedra que lleva el nombre de Charles Simonyi, y se terminó después de haberme jubilado. Como despedida de la cátedra Simonyi, catorce años y siete libros después, me gustaría expresar de nuevo mi profundo agradecimiento a Charles. Lalla coincide conmigo en la esperanza de que nuestra amistad siga viva por muchos años.

Este libro está dedicado a Josh Timonen, con mi agradecimiento hacia él y hacia el pequeño y esforzado grupo que trabajó originalmente en la creación de RichardDawkins.net. En la red se conoce a Josh como un inspirado diseñador web, pero eso no es más que la punta de un increíble iceberg. El talento creativo de Josh ha dejado huella, y la imagen del iceberg apenas refleja la enorme versatilidad de su contribución a nuestro esfuerzo común y el magnífico sentido del humor con que lo hizo.

1

¿SOLO UNA TEORÍA?

Imagine que es usted un profesor de latín y de historia de Roma ansioso por transmitir su entusiasmo por el mundo antiguo —por las elegías de Ovidio y las odas de Horacio, la poderosa economía de la gramática latina tal y como se muestra en la oratoria de Cicerón, las sutilezas de estrategia en las guerras púnicas, el liderazgo de Julio César y los voluptuosos excesos de los últimos emperadores—. Es una gran empresa y lleva tiempo, concentración y dedicación. Aun así, usted descubre que está malgastando su tiempo continuamente y que su clase ve distraída su atención por un grupo de ignorantes vocingleros (como académico del latín, usted diría mejor *ignorami)* que, con apoyo político y especialmente económico, conspiran sin descanso para persuadir a sus desafortunados alumnos de que los romanos nunca existieron. Nunca hubo un Imperio romano. El mundo entero comenzó a existir solo un poco antes de lo que alcanza la memoria viva. El español, el italiano, el francés, el portugués, el catalán, el occitano, el retorromano: todas estas lenguas y sus dialectos aparecieron de forma espontánea e independiente, y nada deben a ningún antecedente como el latín. En lugar de dedicar toda su atención a la noble vocación de académico del mundo clásico y profesor, se ve forzado a emplear su tiempo y su esfuerzo en una denodada defensa de la proposición de que los romanos existieron alguna vez: una defensa contra una exhibición de prejuicio ignorante que le haría llorar si no estuviera tan ocupado luchando contra ella.

Si mi fantasía sobre el profesor de latín le parece muy caprichosa, veamos un ejemplo más realista. Imagine que es un profesor de historia más reciente y que sus lecciones sobre la Europa del siglo XX se ven boicoteadas, interrumpidas o desbaratadas de alguna otra forma por grupos políticamente poderosos y bien financiados de revisionistas del holocausto.

A diferencia de mis negadores de Homero, los negadores del holocausto existen de verdad. Hacen ruido, son superficialmente plausibles y expertos en parecer bien formados. Están apoyados por el presidente de, al menos, un Estado poderoso actual e incluyen, como mínimo, a un obispo de la Iglesia Católica Romana. Imagine que, como profesor de historia europea, se enfrenta continuamente a demandas beligerantes para que se «enseñe la controversia», y se dedique «el mismo tiempo» a la «teoría alternativa» de que el holocausto nunca ocurrió, que fue inventado por un grupo de conspiradores sionistas. Intelectuales relativistas de moda intervienen para insistir en que no hay una verdad absoluta: si el holocausto ocurrió es una cuestión de creencia personal; todos los puntos de vista son igualmente válidos y deben ser igualmente «respetados».

Hoy día, la situación de muchos profesores de ciencia no es menos desesperada. Cuando intentan exponer el principio central de la biología; cuando honestamente sitúan el mundo de lo vivo en un contexto histórico —lo que quiere decir evolución—; cuando exploran y explican la naturaleza de la vida misma, son acosados y bloqueados, fastidiados e incluso intimidados con la amenaza de perder sus empleos. Cada ataque les hace, cuando menos, malgastar tiempo. Es frecuente que reciban cartas intimidatorias de los padres y que tengan que aguantar sonrisas sarcásticas y brazos cruzados de niños a los que les han lavado el cerebro. Les obligan a utilizar libros de texto aprobados por el Gobierno en los que la palabra «evolución» ha sido sistemáticamente eliminada o sustituida por «cambio en el tiempo». Hubo una época en la que casi nos reíamos de este tipo de cosas y las calificábamos de fenómeno típico estadounidense. Pero ahora los profesores del Reino Unido y el resto de Europa están sufriendo esos mismos problemas, en parte por la influencia recibida de Estados Unidos, pero sobre todo por la creciente presencia del islamismo en las aulas —alentado por el compromiso oficial del «multiculturalismo» y el temor a ser tachados de racistas—.

A menudo se afirma, y con razón, que el clero y los teólogos más experimentados no tienen problema alguno con la evolución y, en muchos casos, apoyan activamente a los científicos en este sentido. Con frecuencia esto es cierto, según mi experiencia como colaborador, en dos ocasiones diferentes, del entonces obispo de Oxford, ahora lord Harries. En 2004 escribimos un artículo conjunto en el S*unday Times* cuyas palabras finales eran: «A día de hoy no hay nada que debatir. La evolución es un hecho y,

desde un punto de vista cristiano, uno de los más grandes trabajos de Dios». La última frase fue escrita por Richard Harries, pero estábamos de acuerdo sobre todo el contenido del artículo. Dos años antes, el obispo Harries y yo habíamos escrito una carta conjunta al primer ministro, Tony Blair, que decía lo siguiente:

Estimado primer ministro:

Escribimos como un grupo de científicos y obispos para expresar nuestra preocupación por la enseñanza de la Ciencia en la facultad de Tecnología Municipal Emmanuel, en Gateshead.

La evolución es una teoría científica de gran poder explicativo, capaz de dar cuenta de un gran número de fenómenos en muchas disciplinas diferentes. Puede ser refinada, confirmada e incluso alterada radicalmente siguiendo las evidencias. No es, como sostienen los portavoces de esta facultad, una «posición de fe» de la misma categoría que la explicación bíblica de la creación, que tiene una función y un propósito diferentes.

El asunto va más allá de lo que se está enseñando actualmente en una facultad. Hay una preocupación creciente sobre qué será enseñado y cómo será enseñado en la nueva generación de colegios religiosos. Creemos que los currículos de estos centros, así como el de la facultad de Tecnología Municipal Emmanuel, tienen que ser supervisados estrictamente para que ambas disciplinas de Ciencia y Estudios Religiosos sean respetadas de manera adecuada.

Sinceramente suyos,

Ilmo. Richard Harries, obispo de Oxford; Sir David Attenborough, miembro de la Royal Society; Ilmo. Christopher Herbert, obispo de St. Albans; Lord May of Oxford, presidente de la Royal Society; John Enderby, catedrático, secretario de Física, Royal Society; Ilmo. John Oliver, obispo de Hereford; Ilmo. Mark Santer, obispo de Birmingham; Sir Neil Chalmers, director del Museo de Historia Natural; Ilmo. Thomas Butler, obispo de Southwark; Sir Martin Rees, astrónomo real, miembro de la Royal Society; Ilmo. Kenneth Stevenson, obispo de Portsmouth; Patrick Bateson, catedrático, secretario de Biología, Royal Society; Ilmo. Crispian Hollis, obispo católico romano de Portsmouth; Sir Richard Southwood, miembro de la Royal Society; Sir Francis Graham-Smith, anterior secretario de Física, Royal Society; Richard Dawkins, catedrático, miembro de la Royal Society.

El obispo Harries y yo preparamos esta carta a toda prisa. Por lo que recuerdo, los firmantes fueron el cien por cien de aquellos a los que preguntamos. No hubo desacuerdo por parte de los científicos, ni de los obispos.

El arzobispo de Canterbury no tiene problemas con la evolución, ni los tiene el papa (dejando aparte el antiguo dilema sobre la coyuntura paleontológica precisa en la que se inyectó el alma humana), ni tampoco los sacerdotes formados o los profesores de Teología. Este es un libro sobre la evidencia positiva de que la evolución es un hecho. La intención no es hacer un libro antirreligioso. Eso ya lo he hecho, vistiendo otra camiseta, y este no es el sitio para ponérsela otra vez. Los obispos y los teólogos que han aceptado la evidencia de la evolución han desistido de luchar en contra de ella. Algunos pueden haberlo hecho a regañadientes, otros, como Richard Harries, con entusiasmo, pero todos, excepto los deplorablemente desinformados, se han visto forzados a aceptar el hecho de la evolución. Quizá creen que Dios ayudó a comenzar el proceso y tal vez se inhibió en su desarrollo posterior. Probablemente piensan que Dios puso en marcha el Universo en primer lugar y solemnizó su nacimiento con un conjunto armonioso de leyes y constantes físicas calculadas para alcanzar algún propósito inescrutable en el que todos tenemos un papel que desempeñar. Pero, con reticencias en algunos casos, felizmente en otros, los hombres y las mujeres más razonables de la Iglesia aceptan la evidencia de la evolución.

Lo que no debemos hacer es asumir complacientemente que, porque los obispos y el clero con un determinado grado de formación aceptan la evolución, también lo hacen sus congregaciones. Como se documenta en el Apéndice, hay una amplia evidencia de lo contrario a partir de las encuestas de opinión. Más del 40% de los estadounidenses niegan que los humanos hayamos evolucionado a partir de otros animales, y piensan que nosotros, y por extensión toda la vida, fue creada por Dios en los últimos cien mil años. La cifra no es tan alta en Gran Bretaña, pero aun así es preocupantemente elevada. Y debería ser tan preocupante para las iglesias como para los científicos. Este libro es necesario. Utilizaré la expresión «negadores de la historia» para designar a aquellas personas que niegan la evolución: quienes afirman que la edad del mundo se mide en miles de años en lugar de en miles de millones de años y creen que los humanos

caminaron con los dinosaurios —que constituyen más del 40% de la población de Estados Unidos—. La cifra equivalente es más alta en algunos países, más baja en otros, pero un 40% es un alto porcentaje; me referiré de vez en cuando a los negadores de la historia como los *cuarentaporcentistas.*

Volviendo a los obispos y teólogos ilustrados, sería bueno que hicieran un esfuerzo un poco mayor para combatir la estupidez anticientífica que ellos mismos deploran. Demasiados predicadores, aunque están de acuerdo en que la evolución es cierta y que Adán y Eva nunca existieron, van alegremente al púlpito e incluyen en su sermón un argumento moral o teológico sobre Adán y Eva sin mencionar que, por supuesto, Adán y Eva ¡nunca existieron realmente! Si se les pregunta, se defenderán diciendo que la intención era solo simbólica, quizá relacionada con el «pecado original» o con las virtudes de la inocencia. Pueden añadir de manera tajante que, como es lógico, nadie sería tan tonto como para tomar sus palabras en sentido literal. Pero ¿saben eso las congregaciones? ¿Cómo puede saber la persona que está en el banco de la iglesia o sobre la alfombra para los rezos qué partes de la Escritura han de tomarse literalmente y cuáles desde un punto de vista simbólico? ¿Realmente resulta tan fácil de discernir para un feligrés no ilustrado? En demasiados casos la respuesta es claramente negativa, y cualquiera debe ser disculpado por sentirse confundido. Si no me cree, consulte el Apéndice.

«Yo sigo afirmando que no es más que una teoría»

Imagen 1

Piense en eso, obispo. Tenga cuidado, vicario. Están jugando con dinamita, tonteando con un malentendido que está esperando a producirse —se podría decir que casi destinado a aparecer si no se previene—. ¿No deberían tener más cuidado al hablar en público para que su *sí* sea *sí* y su *no* sea *no?* Por miedo a la condena eterna, ¿no sería preferible combatir ese malentendido popular tan extendido y prestar apoyo activo y entusiasta a los científicos y los profesores de ciencia?

Los negadores de la historia están entre aquellos a los que me dirijo en este libro. Pero, y quizá esto sea más importante, aspiro a llegar a aquellos que, sin ser negadores de la historia, conocen a alguno, incluso miembros de su propia familia o de su Iglesia, y no se encuentran suficientemente preparados para argumentar el caso.

La evolución es un hecho. Más allá de una duda razonable, más allá de una duda seria, más allá de una duda sana, informada, inteligente, más allá de cualquier duda, la evolución es un hecho. La evidencia a favor de la evolución es al menos tan fuerte como la evidencia a favor del holocausto, aun incluyendo a los testigos directos del holocausto. Es la pura verdad

que somos primos de los chimpancés, primos algo más lejanos de los monos, primos más lejanos todavía de los oricteropos y los manatíes, aún más distantes primos de los plátanos y los nabos..., puede continuar la lista tanto como desee. Esto no tendría por qué ser cierto. No es cierto de forma autoevidente, tautológica ni obvia. No tendría por qué ser cierto, pero lo es. Sabemos que es así porque una cantidad creciente de pruebas lo sustenta. La evolución es un hecho y esta obra lo demostrará. Ningún científico reputado lo discute y ningún lector objetivo lo dudará cuando cierre el libro.

¿Por qué, entonces, hablamos de la *teoría* de la evolución de Darwin, y de ese modo parece que proporcionamos consuelo espurio a aquellos de creencia creacionista —los negadores de la historia, los *cuarentaporcentistas*— que piensan que la palabra «teoría» es una concesión que les otorga algún tipo de tanto o de victoria?

¿QUÉ ES UNA TEORÍA? ¿QUÉ ES UN HECHO?

¿Solo una teoría? Veamos lo que significa «teoría». El *Oxford English Dictionary* aporta dos definiciones (en realidad son más, pero estas son las relevantes aquí).

> **teoría (acepción 1):** Esquema o sistema de ideas o afirmaciones mantenidas como una explicación de un grupo de hechos o fenómenos; hipótesis que ha sido confirmada o establecida por observación o experimento y está propuesta o aceptada como explicatoria de los hechos conocidos; afirmación de lo que se mantiene que son leyes generales, principios o causas de algo conocido u observado.
>
> **teoría (acepción 2):** Hipótesis propuesta como una explicación; por lo tanto, una mera hipótesis, especulación, conjetura; idea o conjunto de ideas sobre algo; opinión o noción individual.

Obviamente, los dos significados son bastante diferentes entre sí. Y la respuesta corta a mi pregunta sobre la teoría de la evolución es que los científicos están usando la acepción 1, mientras que los creacionistas están —quizá erróneamente, quizá con sinceridad— optando por la acepción 2. Un buen ejemplo de la acepción 1 es la teoría heliocéntrica del Sistema Solar, la teoría de que la Tierra y los otros planetas orbitan alrededor del

Sol. La evolución se ajusta a la acepción 1 perfectamente. La teoría de la evolución de Darwin es, de hecho, un «esquema o sistema de ideas o afirmaciones». Explica una cantidad enorme de «hechos o fenómenos» y, por consenso informado general, es una «afirmación de lo que se mantiene que son leyes generales, principios o causas de algo conocido u observado». Realmente está muy lejos de una «mera hipótesis, especulación, conjetura». Los científicos y los creacionistas están entendiendo la palabra «teoría» de dos formas muy diferentes. La evolución es una teoría en el mismo sentido que la teoría heliocéntrica. En ningún caso se debe usar la palabra «solo», como en «solo una teoría».

Con respecto al argumento de que la evolución nunca ha sido «probada», la prueba es una noción que ha intimidado a los científicos hasta la desconfianza. Los matemáticos pueden probar cosas —desde un punto de vista estricto ellos son los únicos que pueden—, pero lo más que los científicos pueden hacer es fallar al refutar cosas mientras señalan el enorme esfuerzo del intento. Incluso una teoría tan aceptada como que la Luna es más pequeña que el Sol no puede, para satisfacción de algunos filósofos, ser probada de igual forma que podría serlo el teorema de Pitágoras. Pero la acumulación masiva de evidencias que la sustentan es tan importante que negarle estatus de «hecho» parecería ridículo para todos menos para los pedantes. Lo mismo se cumple para la evolución. La evolución es un hecho en el mismo sentido que es un hecho que París está en el hemisferio norte. Aunque las hachas de la lógica mandan en la ciudad [1], algunas teorías están más allá de la duda razonable y las llamamos «hechos». Cuanto más enérgica y rigurosamente se intente refutar una teoría, si esta sobrevive al asalto, más se acerca a lo que el sentido común alegremente llama un «hecho».

Podría seguir utilizando «acepción 1 de “teoría”» y «acepción 2 de “teoría”», pero los números se olvidan con facilidad. Necesito palabras que los sustituyan. Ya tenemos una buena palabra para «acepción 2 de “teoría”». Es «hipótesis». Todo el mundo entiende que una hipótesis es una idea tentativa a la espera de confirmación (o refutación), y es precisamente de esa provisionalidad de lo que la evolución se ha desprendido ahora, aunque todavía estaba cargada de ella en tiempos de Darwin. La acepción 1 de «teoría» es más difícil. Estaría bien seguir usando simplemente «teoría» como si la acepción 2 no existiera. De hecho, se podría defender la eliminación de la acepción 2 porque tiende a

confundir y no es necesaria, dado que tenemos «hipótesis». Desafortunadamente, la acepción 2 de «teoría» es de uso común y no podemos prohibirla porque sí. Por tanto, voy a permitirme la considerable —pero perdonable— licencia de tomar prestada de las matemáticas la palabra «teorema» para la acepción 1. Realmente es un préstamo engañoso, como veremos, pero creo que el riesgo de la confusión se compensa con los beneficios. Como gesto de disculpa hacia los matemáticos ofendidos, voy a cambiar la palabra a *teoremum*. Primero voy a explicar el uso matemático exacto de «teorema», mientras que al mismo tiempo aclaro mi anterior afirmación de que, en sentido estricto, solo los matemáticos están legitimados para *probar* algo (los abogados no lo están a pesar de sus bien remuneradas pretensiones).

Para un matemático, una prueba es una demostración lógica de que una conclusión procede necesariamente de los axiomas que se asumen. El teorema de Pitágoras es necesariamente cierto, puesto que asumimos los axiomas de Euclides, como el de que las rectas paralelas nunca se cruzan. Estaría perdiendo el tiempo si midiera miles de triángulos rectángulos para intentar encontrar uno que no cumpla el teorema de Pitágoras. Los pitagóricos lo probaron, cualquiera puede seguir la prueba, es cierto y eso es todo.

Los matemáticos utilizan la idea de prueba para hacer una distinción entre «conjetura» y «teorema», lo que tiene un parecido superficial con la distinción que hace el *Oxford English Dictionary* entre las dos acepciones de «teoría». Una conjetura es una proposición que parece cierta pero que nunca ha sido probada. Se convertiría en un teorema si se llegase a probar. Un ejemplo famoso es la conjetura de Goldbach, que sostiene que cualquier número entero par puede ser expresado como la suma de dos números primos. Los matemáticos no han podido refutarla para todos los números pares hasta trescientos mil millones de millones de millones, y el sentido común, sin mayores problemas, la llamaría el teorema de Goldbach. Sin embargo, nunca ha sido probada, a pesar de que se han ofrecido cuantiosos premios por lograrlo, y los matemáticos se niegan a situarla en el pedestal reservado a los teoremas. Si alguien encuentra alguna vez una prueba, será ascendida de conjetura de Goldbach a teorema de Goldbach, o quizá a teorema de X, donde X será el inteligente matemático que encuentre la prueba.

Carl Sagan hizo un uso sarcástico de la conjetura de Goldbach en su respuesta a quienes aseguraban haber sido abducidos por alienígenas:

> Ocasionalmente recibo una carta de alguien que está en «contacto» con extraterrestres. Se me invita a «preguntarles cualquier cosa». A lo largo de los años he preparado una lista de preguntas. No debemos olvidar que los extraterrestres están muy avanzados. Pregunto, por tanto, cosas como «Por favor, proporcióneme una prueba corta del último teorema de Fermat». O de la conjetura de Goldbach... Nunca recibo una respuesta. Por otro lado, si pregunto algo como «¿deberíamos ser buenos?», casi siempre recibo una respuesta. Estos alienígenas siempre están dispuestos a responder a cualquier cosa vaga, especialmente si involucra los clásicos juicios emocionales. Pero sobre algo específico, en lo que hay una oportunidad de descubrir si realmente saben algo más allá de lo que la mayoría de los humanos saben, solo hay silencio.

El último teorema de Fermat, como la conjetura de Goldbach, es una proposición sobre números para la que nadie ha encontrado una excepción. Probarla ha sido algo así como el santo grial para los matemáticos desde 1637, cuando Pierre de Fermat escribió en el margen de un viejo libro de matemáticas: «Tengo una prueba realmente maravillosa... que este margen es demasiado estrecho para contener». Finalmente fue probada por el matemático inglés Andrew Wiles en 1995. Antes de eso, algunos matemáticos pensaban que debería haber sido llamada «conjetura». Dada la extensión y complejidad de la prueba de Wiles, y su dependencia de métodos y conocimientos avanzados del siglo XX, la mayoría de los matemáticos piensan que Fermat estaba (honestamente) equivocado al afirmar que lo había probado. Cuento la historia solo para ilustrar la diferencia entre una conjetura y un teorema.

Como ya he dicho, voy a tomar prestado de los matemáticos el término «teorema», pero lo voy a denominar *teoremum* para diferenciarlo de un teorema matemático. Un *teoremum* científico, como la evolución o el heliocentrismo, es una teoría que se ajusta a la acepción 1 del diccionario de Oxford:

> Ha sido confirmada o establecida por observación o experimento y está propuesta o aceptada como explicatoria de los hechos conocidos; afirmación de lo que se mantiene que son leyes generales, principios o causas de algo conocido u observado.

Un *teoremum* científico no se ha probado —es imposible hacerlo— de la forma en que se prueba un teorema matemático. Pero el sentido común lo trata como un hecho, al igual que la «teoría» de que la Tierra es redonda y no plana es un hecho, y la teoría de que las plantas verdes obtienen la energía del Sol es un hecho. Todos son *teoremums* científicos: apoyados por cantidades masivas de evidencias, aceptados por todos los observadores informados, hechos no discutidos en el sentido ordinario del término. Como ocurre con todos los hechos, si nos ponemos pedantes, es innegable que nuestros instrumentos de medida y los órganos de los sentidos con los que los leemos pueden ser víctimas de un fraude a gran escala. Como dijo Bertrand Russell: «Todos pudimos haber empezado a existir hace cinco minutos, dotados de memorias listas para ser usadas, con agujeros en nuestros calcetines y pelo que necesita un corte». Dada la evidencia ahora disponible, para que la evolución fuese algo diferente a un hecho requeriría un fraude similar por parte del creador, algo que pocos creyentes estarían dispuestos a aceptar.

Ahora debemos examinar la definición que el diccionario incluye para «hecho». Esto es lo que dice el diccionario de Oxford (de nuevo hay varias definiciones, pero esta es la relevante):

> **hecho:** Algo que ha ocurrido realmente o que es así; algo que se sabe con certeza que es de esa naturaleza; por lo tanto, una verdad particular conocida por la observación o el testimonio auténtico, como oposición a lo meramente inferido, o a la conjetura o ficción; un dato o experiencia, a diferencia de las conclusiones que puedan derivarse de él.

Observemos que, al igual que un *teoremum*, un hecho, en este sentido, no tiene el mismo estatus riguroso que un teorema matemático probado, que se extrae necesariamente de un conjunto asumido de axiomas. Además, «la observación o el testimonio auténtico» pueden estar terriblemente equivocados y están sobrevalorados en los tribunales de justicia. Experimentos psicológicos nos han proporcionado algunas demostraciones demoledoras, que deberían prevenir a cualquier jurista antes de dar una importancia excesiva a la evidencia de un «testigo ocular». Un ejemplo famoso fue el llevado a cabo por el profesor Daniel J. Simons, de la Universidad de Illinois. Media docena de jóvenes fueron filmados durante veinticinco segundos de pie, alrededor de un círculo, mientras se pasaban entre sí un par de pelotas de baloncesto. Nosotros, los

sujetos del experimento, vemos la grabación. Los jugadores entran y salen del círculo y cambian de lugar según se pasan las pelotas, de tal forma que la escena es muy activa y compleja. Antes de mostrarnos la grabación se nos dice que tenemos que realizar determinada tarea para evaluar nuestra capacidad de observación. Tenemos que contar el número total de veces que las pelotas pasan de una persona a otra. Al final de la prueba, se escriben los resultados totales, pero —sin que lo sepamos los espectadores — ¡esa no es la prueba real!

Después de ver la grabación y recoger los resultados, el investigador deja caer su bomba. «¿Y cuántos vieron el gorila?». La mayoría de la audiencia se queda asombrada: en blanco. El investigador vuelve a mostrar la grabación, pero esta vez pide a la audiencia que la contemple de forma relajada, sin intentar contar nada. Sorprendentemente, a los nueve segundos, un hombre con un disfraz de gorila entra paseando tranquilamente hasta el centro del círculo de los jugadores, se para a mirar hacia la cámara, golpea su pecho como si mostrara un desprecio beligerante hacia la evidencia de los testigos visuales y, finalmente, se marcha con la misma despreocupación con la que llegó. Allí estaba, a plena vista durante nueve segundos, y nadie lo vio. Jurarían ante un tribunal de justicia que no había ningún hombre disfrazado de gorila, y jurarían que habían estado mirando con una concentración más intensa de lo habitual durante los veinticinco segundos, precisamente porque estaban contando los pases. Se han realizado muchos experimentos de este tipo con resultados similares y con parecidas reacciones de estupefacta incredulidad cuando finalmente se muestra la verdad a la audiencia. El testimonio de los testigos visuales, «la observación real», «un dato de la experiencia»; todos son, o al menos pueden ser, poco fiables. Evidentemente, esta falta de fiabilidad de los observadores es explotada sobre el escenario por los prestidigitadores mediante técnicas deliberadas de distracción.

La definición del diccionario de «hecho» menciona «observación», o «testimonio auténtico», como contraposición a «lo *meramente* inferido» (la cursiva es mía). El tono peyorativo que implica este «meramente» es un poco descarado. La inferencia cuidadosa puede ser más fiable que la «observación», por mucho que nuestra intuición proteste y le cueste admitirlo. Yo mismo me quedé estupefacto cuando no vi al gorila de Simons, y me mostré francamente incrédulo ante la posibilidad de que en realidad hubiese estado allí. Más triste y más sabio después de ver la

grabación por segunda vez, nunca más daré a un testimonio de un testigo ocular una preferencia automática sobre la evidencia científica indirecta. Debería mostrarse la grabación del gorila, o algo parecido, a todos los jurados antes de que se retiraran a deliberar sobre su veredicto. A los jueces también.

La verdad es que la inferencia tiene que estar basada en última instancia en la observación mediante nuestros órganos sensoriales. Por ejemplo, utilizamos nuestros ojos para observar la salida impresa de una máquina de secuenciar ADN o del Gran Colisionador de Hadrones. Pero —con toda la intuición en contra— la observación directa de un presunto suceso (por ejemplo, un asesinato) no es necesariamente más fiable que la observación indirecta de sus consecuencias (como el ADN de una mancha de sangre) mediante una máquina de hacer inferencias bien construida. Es más fácil que se haga un reconocimiento equivocado de una identidad a partir del testimonio de un testigo directo que de la inferencia indirecta derivada de la prueba del ADN. Y, por cierto, hay una larga y triste lista de personas que han sido condenadas erróneamente a partir del testimonio de testigos oculares, y más tarde liberadas —algunas veces después de muchos años— debido a nuevas evidencias obtenidas a partir de análisis de ADN. Desde que se admiten en los tribunales las pruebas de ADN, solo en Texas han sido exoneradas treinta y cinco personas previamente condenadas. Y estas son solo las que siguen vivas. Dada la celeridad y el gusto con que este estado hace cumplir la pena de muerte (durante sus seis años como gobernador, George W. Bush firmó, de media, una condena a muerte cada quince días), tenemos que asumir que un número importante de personas ejecutadas se habría salvado si la prueba del ADN hubiera estado disponible a tiempo.

Este libro se tomará la inferencia seriamente —no la *mera* inferencia, sino la inferencia científica correcta— y mostraré con el incuestionable poder de la inferencia que la evolución es un hecho. Obviamente, la gran mayoría del cambio evolutivo es invisible a la observación de los testigos oculares. La mayor parte ocurrió antes de que naciéramos y, en cualquier caso, es en general demasiado lento como para que pueda ser percibido durante la vida de un individuo. Igual de cierta es la continua separación entre África y América del Sur, que ocurre, como veremos en el capítulo 9, demasiado despacio como para poder percibirla. En la evolución, como en la deriva continental, lo único a lo que tenemos acceso es a la inferencia

después del evento, por la razón obvia de que nosotros no existimos hasta después del mismo. Pero no subestimemos ni durante un nanosegundo el poder de esta inferencia. La lenta deriva que separa América del Sur de África es hoy en día un hecho establecido en el sentido habitual del término «hecho», igual que lo es nuestra ascendencia común con los puercoespines y las granadas.

Somos como detectives que llegan a la escena después de que se haya cometido un crimen. La acción del asesino se ha desvanecido en el pasado. El detective no tiene posibilidad de ser testigo del crimen real con sus propios ojos. En cualquier caso, el experimento del disfraz de gorila y otros similares nos han enseñado a no confiar demasiado en nuestros ojos. Lo que *tiene* el detective son las huellas que quedan, y se puede confiar bastante en ellas. Hay huellas de pies, huellas dactilares (y ahora también huellas de ADN), manchas de sangre, cartas, diarios. El mundo es de la forma que el mundo debería ser si esta historia y esta otra, pero no esa ni esa otra, hubiesen conducido hasta el presente.

La diferencia entre las dos definiciones de «teoría» que da el diccionario no es un abismo insalvable, como muestran muchos ejemplos históricos. En la historia de la ciencia, los *teoremums* a menudo comienzan como «meras» hipótesis. Como en el caso de la teoría de la deriva continental, una idea puede incluso comenzar su andadura sumergida en el ridículo, antes de progresar a dolorosos pasos hasta el estatus de *teoremum* o de hecho aceptado. Este no es un punto filosóficamente difícil. El hecho de que algunas creencias ampliamente sostenidas en el pasado hayan resultado ser concluyentemente erróneas no significa que debamos temer que las futuras evidencias demuestren siempre lo equivocado de nuestras creencias. Lo vulnerable que sean estas dependerá, entre otras cosas, de lo fuerte que sea la evidencia a su favor. La gente solía creer que el Sol era más pequeño que la Tierra porque tenía una evidencia inadecuada. Ahora tenemos pruebas, no disponibles antes, que muestran de modo indiscutible que es mucho más grande, y podemos tener una confianza total en que estas evidencias nunca serán reemplazadas. No es una hipótesis temporal que hasta el momento ha sobrevivido a la refutación. Nuestras creencias actuales sobre muchas cosas pueden refutarse, pero con total confianza podemos hacer una lista de ciertos hechos que nunca serán refutados; la evolución y la teoría heliocéntrica no siempre estuvieron entre ellos, pero ahora lo están.

Los biólogos distinguen a veces entre el *hecho* de la evolución (todas las cosas vivas están emparentadas) y la *teoría* de aquello que la dirige (normalmente se refieren a la selección natural y suelen contrastarla con teorías rivales, como la de Lamarck del «uso y desuso» y la «herencia de las características adquiridas»). Pero el mismo Darwin pensó en ambos conceptos en un sentido provisional, hipotético y especulativo. Eso fue así porque en aquellos días la evidencia disponible era menos convincente y todavía era posible para los científicos reputados debatir sobre la evolución y la selección natural. Hoy día no es posible discutir el hecho de la evolución misma —se ha graduado y convertido en un *teoremum* o un hecho obviamente aceptado—, pero todavía podría dudarse (solo) de si la selección natural es su principal fuerza conductora.

Darwin explicó en su autobiografía cómo, en 1838, leyendo «por diversión» (Matt Ridley sospecha que fue por sugerencia de Harriet Martineau, la inteligente amiga de su hermano Erasmus) el libro de Malthus *Ensayo sobre el principio de la población,* recibió la inspiración para hablar de la selección natural: «Aquí, al fin, tengo una teoría con la que trabajar». Para Darwin, la selección natural era una hipótesis que podía ser cierta o no. Sobre la evolución pensaba lo mismo. Lo que ahora llamamos el «hecho de la evolución» constituía en 1838 una hipótesis para la que era necesario recopilar evidencias. Para 1859, la fecha en que publicó *El origen de las especies,* Darwin ya había acumulado suficientes evidencias como para impulsar la cuestión de la evolución; no así el asunto de la selección natural, muy lejos todavía de alcanzar el estatus de hecho. En realidad, fue esta elevación desde el nivel de hipótesis a la categoría de hecho lo que ocupó a Darwin a lo largo de la mayor parte de su gran libro. Tal elevación se ha mantenido, de modo que hoy ninguna mente seria alberga dudas y los científicos hablan, al menos de modo informal, del *hecho* de la evolución. Todos los biólogos de prestigio están de acuerdo en que la selección natural es una de las fuerzas más importantes, aunque —en ello insisten algunos más que otros— no la única. Incluso si no es la única, todavía tengo que encontrar a un biólogo serio que pueda señalar una alternativa a la selección natural como fuerza conductora de la evolución *adaptativa* —la evolución hacia una mejora positiva—.

En el resto de este libro demostraré que la evolución es un hecho innegable y descubriré su sorprendente poder, simplicidad y belleza. La evolución está dentro de nosotros, alrededor de nosotros, entre nosotros, y

sus huellas están incrustadas en rocas de tiempos inmemoriales. Dado que en la mayoría de los casos no vivimos lo suficiente como para observar la evolución con nuestros ojos, volveremos sobre la metáfora del detective que llega a la escena del crimen después de los hechos y ha de hacer inferencias. Los elementos que conducen a los científicos a inferir el hecho de la evolución son mucho más numerosos, más convincentes, más irrefutables que cualquier informe de testigos oculares que se haya podido utilizar en cualquier juicio, en cualquier centuria, para establecer la culpabilidad en cualquier crimen. ¿Pruebas más allá de una duda razonable? ¿Duda *razonable?* Este es el eterno eufemismo.

2

PERROS, VACAS Y COLES

¿Por qué Darwin tardó tanto tiempo en aparecer en escena? ¿Qué retrasó la llegada de la humanidad a esa idea sencilla y luminosa que parece, al verla, mucho más simple de entender que las ideas matemáticas que nos había dado Newton dos siglos antes, o incluso Arquímedes dos milenios antes? Se han sugerido muchas respuestas. Quizá nuestras mentes estaban cohibidas por el tiempo total que debe pasar para que se lleven a término los grandes cambios —por el desajuste entre lo que ahora llamamos tiempo geológico profundo y el tiempo de vida y de comprensión de la persona que intenta entenderlo—. Quizá fue el adoctrinamiento religioso lo que nos retrajo. O quizá fue la sobrecogedora complejidad de un órgano vivo, por ejemplo un ojo, cargado como está con la cautivadora ilusión de haber sido diseñado por un maestro ingeniero. Probablemente todo tuvo que ver. Pero Ernst Mayr, el gran abuelo de la síntesis neodarwiniana, que murió en 2005 a la edad de cien años, sostenía insistentemente una posibilidad diferente. Para Mayr la culpable era la antigua doctrina filosófica del —por darle un nombre moderno— esencialismo. El descubrimiento de la evolución fue retenido por la mano muerta de Platón [2].

LA MANO MUERTA DE PLATÓN

Para Platón, la «realidad» que creemos ver son sombras proyectadas sobre la pared de nuestra caverna por la temblorosa luz de un fuego de campamento. Como otros pensadores clásicos griegos, Platón era en el fondo un geómetra. Cada triángulo dibujado en la arena es una sombra imperfecta de la *esencia* verdadera del triángulo. Las líneas del triángulo

esencial son líneas euclídeas puras, con longitud pero sin grosor, líneas definidas como infinitamente estrechas y que nunca se cruzan cuando son paralelas. Los ángulos del triángulo esencial suman exactamente dos ángulos rectos, ni un picosegundo de arco más o menos. Esto no ocurre con los triángulos dibujados en la arena: el triángulo de la arena, para Platón, es una sombra precaria del triángulo esencial ideal.

La biología, según Mayr, está asolada por su propia versión de esencialismo. El esencialismo biológico trata a los tapires y a los conejos, a los pangolines y a los dromedarios, como si fueran triángulos, rombos, parábolas o dodecaedros. Los conejos que vemos son lánguidas sombras de la «idea» perfecta del conejo, del conejo platónico ideal, esencial, que anda por algún sitio en el espacio conceptual junto con todos los átomos perfectos de la geometría. Los conejos de carne y hueso pueden variar, pero sus variaciones se ven siempre como desviaciones defectuosas de la esencia ideal del conejo.

¡Qué imagen tan desesperadamente antievolutiva! El platónico ve cada cambio en los conejos como una desviación desordenada del conejo esencial, y siempre habrá resistencia al cambio —como si todos los conejos reales estuvieran unidos por una cuerda invisible al conejo esencial en el cielo—. La visión evolutiva de la vida es radicalmente opuesta. Los descendientes pueden desviarse indefinidamente de la forma ancestral y cada desviación se convierte en un ancestro potencial para variaciones futuras. De hecho, Alfred Rusell Wallace, codescubridor con Darwin, aunque de forma independiente, de la evolución por selección natural, llamó a su artículo «Sobre la tendencia de las variedades a desviarse indefinidamente de su tipo original».

Si hay un «conejo estándar», no es otro que el centro de una distribución con forma de campana de conejos variables, que saltan y corretean. Y la distribución cambia con el tiempo. Según pasan las generaciones puede llegar un punto, que no está bien definido, en el que la norma de lo que llamamos conejos se haya desviado tanto que merezca un nombre diferente. No hay una «conejidad» permanente, no hay esencia de conejo colgando en el cielo, solo poblaciones de individuos con bigotes nerviosos, coprófagos, de largas orejas y peludos con una distribución estadística determinada por las variaciones de tamaño, forma, color y propensiones. Las largas orejas que solían ser el extremo de una distribución antigua pueden, más tarde en tiempo geológico, llegar a ser el

centro de una nueva distribución. Dado un número suficientemente grande de generaciones, puede no haber solapamiento entre distribuciones de ancestros y de descendientes: las mayores orejas entre los ancestros pueden ser más cortas que las orejas más cortas entre los descendientes. Todo fluye, nada está estático, como dijo Heráclito, otro filósofo griego. Después de un millón de años puede ser difícil creer que los animales descendientes tuvieran alguna vez a los conejos como ancestros. Sin embargo, en ninguna generación durante este proceso evolutivo estuvo el tipo dominante de la población lejos del tipo modal de la generación anterior o de la siguiente generación. Esta forma de pensar es lo que Mayr llamó «pensamiento de poblaciones». Para él, el pensamiento de poblaciones era la antítesis del esencialismo. Según Mayr, la razón por la que Darwin llegó tan excesivamente tarde a la escena histórica fue porque todos tenemos —bien sea por la influencia griega o por otra razón— el esencialismo grabado en nuestro ADN mental.

Para aquellos que están estancados en las ideas platónicas, un conejo es un conejo. Sugerir que la «conejidad» constituye una especie de nube en movimiento de medias estadísticas, o que hoy un conejo típico puede ser diferente del conejo típico de hace un millón de años o del típico conejo de dentro de un millón de años, parece violar un tabú interno. De hecho, los psicólogos que estudian el desarrollo del lenguaje nos dicen que los niños son esencialistas naturales. Quizá tienen que serlo si quieren mantenerse cuerdos mientras sus mentes en desarrollo dividen las cosas en categorías discretas y designan a cada una con un nombre. No sorprende que la primera tarea de Adán, en el mito del Génesis, fuera poner nombre a todos los animales.

Y no sorprende, desde el punto de vista de Mayr, que los humanos hayamos tenido que esperar a nuestro Darwin hasta bien entrado el siglo XIX. Para expresar hasta qué extremo es antiesencialista la evolución, consideremos lo siguiente. Desde el punto de vista evolutivo del «pensamiento de poblaciones», cada animal está ligado a todos los demás animales, por ejemplo, un conejo a un leopardo, a través de una cadena de intermediarios, cada uno tan parecido al siguiente que los individuos de cada eslabón podrían en principio aparearse con sus vecinos en la cadena y generar descendencia fértil. No se puede violar el tabú esencialista de modo más concienzudo. Y no es un vago experimento mental restringido a la imaginación. Según la evolución, realmente hay una serie de animales

intermedios que conectan un conejo con un leopardo, y todos vivieron y respiraron, todos habrían sido clasificados exactamente en la misma especie que sus vecinos inmediatos de cada lado de esa larga y deslizante cadena. De hecho, la serie completa constituye un puente continuo desde el conejo al leopardo —aunque, como veremos más tarde, nunca hubo un «conepardo»—. Hay puentes similares desde el conejo hasta el tejón australiano, desde el leopardo hasta la langosta, desde cada animal o planta hasta todos los demás. Quizá haya razonado usted mismo por qué este sorprendente resultado se deriva necesariamente de la visión evolutiva del mundo, pero déjeme expresarlo de otra forma. Lo llamaré el experimento mental de la horquilla.

Cojamos un conejo, cualquier conejo hembra (elegimos arbitrariamente las hembras por conveniencia: no implica ninguna diferencia para el argumento). Pongámoslo cerca de su madre. Ahora pongamos a la abuela cerca de la madre y así sucesivamente en el tiempo, a través de millones de años, en una interminable cadena de conejas, cada una colocada entre su hija y su madre. Caminemos ahora por la línea de conejas, hacia atrás en el tiempo, examinándolas cuidadosamente como un general que pasa revista a las tropas. A medida que avancemos veremos que las conejas más ancianas son ligeramente diferentes de los conejos modernos a los que estamos acostumbrados. Pero el ritmo del cambio será tan lento que no podremos apreciar la tendencia de una generación a otra, de la misma forma que no es posible ver el movimiento de la manecilla de las horas en nuestros relojes —como tampoco apreciar el crecimiento de un niño, solo constatar, más tarde, que se ha convertido en un adolescente, y luego en un adulto—. Una razón adicional por la que no vemos el cambio en los conejos de una generación a la siguiente es que, en un siglo cualquiera, la variación dentro de la población general será normalmente mayor que la existente entre madres e hijas. Por lo que, si tratamos de distinguir el movimiento de la «manecilla de las horas» comparando madres con hijas, o incluso abuelas con nietas, las pequeñas diferencias que podamos observar pasarán inadvertidas ante las existentes entre los amigos y parientes de las conejas que retozan por las praderas de los alrededores.

Sin embargo, de modo incesante e imperceptible, según retrocedamos por la línea encontraremos ancestros que se parecen cada vez menos a un conejo y cada vez más a una musaraña (y no mucho a ninguno de los dos).

Llamaré a una de esas criaturas «la curva de la horquilla» por razones que se harán evidentes. Este animal es el ancestro común más reciente (en la línea de las hembras, pero eso no es importante) que los conejos comparten con los leopardos. No sabemos exactamente qué aspecto tenía, pero se deduce del enfoque evolutivo que necesariamente tuvo que existir. Como todos los animales, era un miembro de la misma especie que sus hijas y su madre. Continuemos ahora nuestro paseo, pero ya hemos girado en la curva de la horquilla y estamos andando hacia adelante en el tiempo, dirigiéndonos hacia los leopardos (entre los muchos y muy variados descendientes de la horquilla, ya que encontraremos continuamente desviaciones en la línea, donde elegiremos la dirección que por fin nos lleve a los leopardos). Cada animal del tipo de las musarañas que aparece en nuestro camino hacia adelante es seguido ahora por su hija. Lentamente, poco a poco, de forma casi imperceptible, los animales del tipo de las musarañas cambian, a través de tipos intermedios que no se parecen a ningún animal moderno pero sí se parecen mucho entre sí, quizá pasando por tipos intermedios que se asemejan vagamente a las comadrejas, hasta que, sin percibir ningún cambio brusco, llegamos al leopardo.

Hay algunas cosas que debemos aclarar sobre este experimento mental. Primero, hemos elegido caminar desde el conejo hacia el leopardo, pero insisto en que podríamos haber elegido ir desde el puercoespín hacia el delfín, del walabi a la jirafa o del ser humano al bacalao. El asunto es que para cualesquiera dos animales tiene que haber un camino de horquilla que los una, por la simple razón de que todas las especies comparten un antepasado con todas las demás especies: todo lo que tenemos que hacer es andar hacia atrás desde una especie hasta el antepasado compartido, luego dar la vuelta en la horquilla y caminar hacia delante en dirección a la otra especie.

Segundo, podemos ver que estamos hablando solo sobre la localización de una cadena de animales que une a un animal moderno con otro animal moderno. No estamos haciendo *evolucionar* un conejo hasta convertirse en un leopardo. Supongo que podríamos decir que estamos *desevolucionando* hacia la curva de la horquilla, y luego evolucionando hacia el leopardo desde allí. Como veremos en un capítulo posterior, lamentablemente es necesario explicar, una y otra vez, que las especies modernas no evolucionan hacia otras especies modernas, solo comparten

antepasados: son primas. Esto, como veremos, es también una respuesta a esa pregunta común tan inquietante: «Si los humanos hubieran evolucionado a partir de los chimpancés, ¿cómo es que hay todavía chimpancés por aquí?».

Tercero, en nuestro avance desde el animal de la curva de la horquilla hemos escogido arbitrariamente el camino que conducía al leopardo. Ese es un camino real de historia evolutiva, pero, para insistir en este importante punto, hemos ignorado muchas bifurcaciones por las que podríamos haber continuado la evolución hacia otros innumerables destinos finales —ya que el animal de la curva de la horquilla es el antepasado común no solo de conejos y leopardos, sino de una gran parte de los mamíferos modernos.

El cuarto punto, que ya he comentado, es que por muy radicales y amplias que sean las diferencias entre los extremos de la horquilla —el conejo y el leopardo, por ejemplo—, cada paso que los une a lo largo de la cadena es muy, muy, pequeño. Cada individuo en la cadena es tan parecido a sus vecinos como se espera que lo sean las madres y las hijas. Y *más* parecido a sus vecinos en la cadena, como también he mencionado, que a los típicos miembros de la población de los alrededores.

Podemos ver cómo este experimento mental irrumpe en el elegante templo griego de las formas platónicas ideales igual que un elefante en una cacharrería. Y se puede comprobar cómo, si Mayr estaba en lo cierto acerca de que los humanos están profundamente impregnados de preconcepciones esencialistas, también podría tener razón sobre por qué históricamente encontramos la evolución tan difícil de digerir.

La palabra «esencialismo» no fue inventada hasta 1945 y, por tanto, Darwin no la conocía. Pero él estaba muy familiarizado con la versión biológica, en forma de «inmutabilidad de las especies», y gran parte de su esfuerzo estuvo dirigido a combatirlo bajo ese nombre. De hecho, en varios libros de Darwin —más aún en otros que en *El origen de las especies*— solo se captará completamente su intención si se evitan las presuposiciones modernas sobre la evolución y se recuerda que gran parte de sus lectores habrían sido esencialistas que no dudaban de la inmutabilidad de las especies. Una de las armas más convincentes que tenía Darwin para argumentar en contra de esta supuesta inmutabilidad era la evidencia que aportaba la domesticación, y es la domesticación lo que nos ocupará el resto de este capítulo.

ESCULPIENDO EL ACERVO GENÉTICO

Darwin sabía mucho sobre la reproducción de animales y plantas. Se relacionaba con colombófilos y horticultores, y le gustaban los perros [3]. No solo el primer capítulo de *El origen de las especies* trata sobre variedades domésticas de animales y plantas; Darwin también escribió un libro entero sobre el tema. *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación* tiene capítulos sobre perros y gatos, caballos y asnos, cerdos, vacas, ovejas y cabras, conejos, palomas (dos capítulos; Darwin sentía un afecto especial por las palomas), pollos y otras aves y plantas, incluidas las sorprendentes coles. Las coles son una afrenta vegetal al esencialismo y a la inmutabilidad de las especies. La col salvaje, *Brassica oleracea*, es una planta común, vagamente parecida a una versión salvaje de la col doméstica. En solo unos pocos siglos, blandiendo los cinceles finos y gruesos proporcionados por las técnicas de la reproducción selectiva, los horticultores han esculpido esta insulsa planta para transformarla en vegetales tan sorprendentemente diferentes entre sí y de su antepasado común como el brócoli, el colirrábano, la col verde, las coles de Bruselas, las berzas, el romanesco y, por supuesto, los diferentes tipos de vegetales que se conocen normalmente como coles.

Otro ejemplo familiar es la transformación del lobo, *Canis lupus,* en las aproximadamente doscientas razas de perros, *Canis familiaris,* reconocidas como diferentes por el UK Kennel Club, el Club del Perro del Reino Unido, y el número todavía mayor de razas que están aisladas genéticamente entre sí por las reglas de tipo racista de la reproducción con pedigrí.

Casualmente, el antepasado salvaje de todos los perros domésticos parece ser el lobo y solo el lobo (aunque su domesticación puede haberse producido independientemente en varios lugares del mundo). Los evolucionistas no siempre han pensado eso. Darwin, junto con muchos de sus contemporáneos, sospechó que varias especies de cánidos salvajes, los lobos y los chacales entre ellos, habían intervenido en la ascendencia de nuestros perros domésticos. El etólogo austriaco Konrad Lorenz, ganador del Premio Nobel, opinaba de la misma forma. Su libro *Cuando el hombre encontró al perro,* publicado en 1949, sugiere la idea de que las razas de

perros domésticos se dividen en dos grandes grupos: las derivadas de los chacales (la mayoría) y las derivadas de los lobos (las favoritas de Lorenz, entre las que se incluyen los chows). Parece que Lorenz no tenía evidencia para establecer esta dicotomía, aparte de las diferencias que creyó adivinar en las personalidades y caracteres de las razas. La cuestión se mantuvo abierta hasta que llegó la evidencia molecular para resolverla. Ahora no hay duda. Los perros domésticos no tienen ascendencia de chacal en absoluto. Todas las razas de perros son lobos modificados: ni chacales, ni coyotes, ni zorros.

El argumento principal que quiero plantear a partir de la domesticación es su sorprendente capacidad para cambiar la forma y el comportamiento de los animales, y la velocidad con que lo hace. Los criadores son casi como alfareros que trabajan con una arcilla eternamente maleable, o como escultores con cincel, que van tallando perros o caballos, o vacas o coles, a su antojo. Volveré a esta imagen en breve. La relevancia de la evolución no natural es que, aunque el agente que selecciona sea el hombre y no la naturaleza, el proceso es exactamente el mismo. Esta es la razón por la que Darwin dio tanta importancia a la domesticación al comienzo de *El origen de las especies.* Cualquiera puede entender el principio de la evolución por selección artificial. La selección natural es igual, salvo por un pequeño detalle.

Hablando estrictamente, no es el cuerpo del perro o el de la col lo que el criador-escultor talla, sino el acervo genético de la raza o la especie. La idea de un acervo genético es básica para el cuerpo de conocimiento y la teoría que lleva el nombre de «síntesis neodarwinista». El propio Darwin no sabía nada de eso. No era parte de su mundo intelectual, como no lo eran los genes. Él sabía, por supuesto, que las características van en familias; también, que la descendencia tiende a parecerse a sus padres y hermanos; entendía que determinadas características de los perros y las palomas son dominantes. El concepto de un acervo genético tiene significado solo a la luz de la ley de Mendel de segregación independiente de los rasgos hereditarios. Darwin nunca conoció las leyes de Mendel, porque a pesar de ser contemporáneos el monje austriaco publicó sus descubrimientos en una revista alemana que aquel nunca leyó.

Un gen mendeliano es una entidad de tipo todo-o-nada. Cuando somos concebidos, lo que recibimos de nuestro padre no es una sustancia que se va a mezclar con la que recibimos de nuestra madre como cuando

combinamos pintura roja y azul para obtener púrpura. Si la herencia funcionara realmente así (como se pensaba en tiempos de Darwin), todos seríamos un promedio mediocre a mitad de camino entre nuestros dos progenitores. En ese caso, toda la variación desaparecería rápidamente de la población (sin importar a qué ritmo mezclemos pintura púrpura con pintura púrpura, nunca se recuperan el azul y el rojo originales). Sin embargo, cualquiera puede ver fácilmente que no existe una tendencia intrínseca a que disminuya la variación en una población. Mendel mostró que esto ocurre porque, cuando los genes paternos y los genes maternos se combinan en un niño (él no utilizó la palabra «gen», que no se acuñó hasta 1909), no es como mezclar pinturas, es más bien como barajar una y otra vez un conjunto de naipes. Hoy en día, sabemos que los genes son trozos de código de ADN que no están físicamente separados entre sí como las cartas, pero el principio mantiene su validez. Los genes no se mezclan; se barajan. Podríamos decir que se barajan mal, con grupos de cartas que se mantienen unidos durante varias generaciones antes de que el azar los separe.

Cualquiera de nuestros óvulos (o espermatozoides en el caso de los varones) contiene bien una versión de nuestro padre de un gen en particular, bien una versión de nuestra madre, pero no una mezcla de ambos. Y ese gen en particular llegó de uno y solo uno de nuestros cuatro abuelos; y de uno y solo uno de nuestros ocho bisabuelos [4].

Desde nuestra perspectiva, debería haber sido obvio desde el principio. Cuando se cruza a un macho con una hembra, se espera obtener un hijo o una hija, no un hermafrodita [5]. También, con lo que sabemos ahora, cualquiera sentado en un sillón podría haber generalizado el mismo principio de todo o nada para la herencia de todas y cada una de las características. Resulta curioso que el mismo Darwin estuviera extraordinariamente cerca de hacerlo, pero se detuvo justo antes de establecer la conexión. En 1866 escribió lo siguiente en una carta a Alfred Wallace:

> Mi querido Wallace:
>
> No creo que entiendas lo que quiero decir con la no-mezcla de ciertas variedades. No se refiere a la fertilidad. Un ejemplo lo explicará. Crucé los guisantes *Painted Lady y Purple*, que son variedades de muy diferente color, y

> obtuve, incluso en la misma vaina, ambas variedades intactas, pero ninguna intermedia. Algo parecido a esto, pienso, debe de ocurrir en principio con tus mariposas... Aunque estos casos son en apariencia tan maravillosos, no sé si lo son realmente más que el que cada hembra en el mundo produzca descendientes machos y hembras diferentes.

Darwin estuvo *así de cerca* de descubrir la ley de Mendel que impide la mezcla de (lo que ahora llamamos) genes [6]. El caso es análogo a la afirmación, por parte de varios apologistas ofendidos, de que otros científicos victorianos, por ejemplo Patrick Matthew y Edward Blyth, habían descubierto la selección natural antes que Darwin. En cierto sentido es verdad, como Darwin reconoció, pero pienso que la evidencia muestra que no entendieron realmente su *importancia*. A diferencia de Darwin y Wallace, ellos no la vieron como un fenómeno *general* con trascendencia universal —con el poder de dirigir la evolución de todas las cosas vivas en el camino de la mejora positiva—. De la misma forma, esta carta a Wallace muestra que Darwin estuvo tentadoramente cerca de darse cuenta de que no mezclarse era una de las características de la herencia. Pero no apreció su generalidad y, en particular, no la vio como una respuesta al acertijo de por qué la variación no desaparecía automáticamente de las poblaciones. Eso quedó para los científicos del siglo XX, que trabajaron sobre el descubrimiento [7] que Mendel anticipó a su época.

Ahora el concepto de acervo genético ya comienza a tener sentido. Una población que se reproduzca sexualmente como, digamos, todas las ratas de la isla Ascensión, remotamente aislada en el Atlántico Sur, está barajando continuamente todos los genes de la isla. No hay una tendencia intrínseca a que cada generación se haga menos variable que la generación anterior, ni una tendencia hacia individuos intermedios más mediocres y grises. Los genes se mantienen intactos, pasando del cuerpo de un individuo al de otro según transcurren las generaciones, pero no *mezclándose* unos con otros, nunca contaminándose entre sí. En un momento cualquiera, los genes están en los cuerpos de las ratas, o se están desplazando al cuerpo de nuevas ratas a través de los espermatozoides. Pero si miramos en perspectiva a través de muchas generaciones, vemos todos los genes de rata de la isla combinándose como si fueran cartas de una única baraja: un único acervo de genes.

Estoy suponiendo que el acervo genético de rata en una isla pequeña y aislada como Ascensión es un acervo autocontenido y bien combinado, en el sentido de que los antepasados recientes de cualquier rata podrían haber vivido en cualquier lugar de la isla, pero probablemente no fuera de la isla, con la excepción esporádica de algún polizón de un barco. Pero el acervo genético de las ratas en una masa extensa de tierra como Eurasia sería mucho más complejo. Una rata que viviera en Madrid tendría genes derivados de antepasados que habrían vivido en el extremo oeste de Eurasia en lugar de en, digamos, Mongolia o Siberia, pero no debido a barreras específicas al flujo de genes (que también existen), sino a las enormes distancias existentes. Al intercambio sexual le lleva tiempo hacer llegar un gen desde un extremo a otro del continente. Incluso sin la existencia de barreras físicas o cadenas montañosas, el flujo de genes a través de una gran masa de tierra es tan lento que recibe el nombre de «viscoso». Casi todos los genes de una rata que viviera en Vladivostok derivarían de antepasados del Este. La combinación, como en la isla Ascensión, forma parte del acervo genético eurasiático, pero este no está barajado homogéneamente debido a las grandes distancias que existen. Además, ciertas barreras parciales como las cadenas montañosas, los grandes ríos o los desiertos se interpondrían en el camino de la combinación homogénea, estructurando y complicando el acervo genético. Estas complicaciones no devalúan la idea del acervo genético. El acervo genético perfectamente combinado es una abstracción útil, como la abstracción matemática de una línea recta perfecta. Los acervos genéticos reales, incluso en islas pequeñas como Ascensión, son aproximaciones imperfectas, solo barajadas parcialmente. Cuanto más pequeña y menos fragmentada sea la isla, mejor será la aproximación al ideal abstracto de un acervo genético perfectamente combinado.

Solo para redondear la idea sobre el acervo genético, cada animal individual que vemos en una población es una *muestra* del acervo genético de su época (o mejor de la época de sus padres). No hay una tendencia intrínseca a que algunos genes aumenten o disminuyan su frecuencia. Pero, cuando *hay* una disminución o un aumento sistemáticos de la frecuencia con la que aparece un gen particular dentro de un acervo genético, eso es precisamente lo que quiere decir evolución. La pregunta, por tanto, es:

¿por qué debería producirse una disminución o un aumento sistemáticos en la frecuencia de un gen? Ahí es, por supuesto, donde las cosas comienzan a ponerse interesantes, y llegaremos a ello en su momento.

Algo gracioso ocurre con los acervos genéticos de perros domésticos. Los criadores de pequineses o de dálmatas con pedigrí dedican mucho esfuerzo a evitar que los genes pasen de un acervo genético a otro. Se guardan los archivos genealógicos y el mestizaje es lo peor que puede ocurrir en el libro de un criador. Es como si cada raza de perro estuviera encarcelada en su pequeña isla Ascensión, separada de todas las demás razas. Pero la barrera que impide el cruce de razas no es el océano, sino las reglas humanas. Desde un punto de vista geográfico todas las razas se solapan, pero pueden vivir en islas separadas debido a la forma en que sus dueños establecen las oportunidades de apareamiento. Por supuesto, de vez en cuando las reglas se rompen. Como una rata que se ha colado de polizón en un viaje a isla Ascensión, una hembra de galgo, digamos, se suelta de la correa y se aparea con un spaniel. Pero los cachorros resultantes, por muy encantadores que sean, son expulsados de la isla llamada Galgo con Pedigrí. Esta se mantiene como una isla de galgos puros. Otros galgos de pura raza aseguran que el acervo genético de la isla virtual llamada Galgo continúa sin contaminar. Hay cientos de «islas» fabricadas por el hombre, una para cada raza de perro con pedigrí. Cada una es una isla virtual, en el sentido de que no está localizada geográficamente. Los galgos con pedigrí o pomeranios se pueden encontrar en muchos lugares diferentes, y se utilizan coches, barcos y aviones como transporte para los genes de un lugar geográfico a otro. La isla genética virtual que es el acervo genético de los pequineses se solapa geográficamente, pero no genéticamente (excepto cuando una hembra abandona el refugio), con la isla genética virtual que constituye el acervo genético de los bóxer, y con la isla genética que conforma el de los San Bernardo.

Volvamos ahora al comentario que inició mi discusión sobre los acervos genéticos. Dije que si los criadores humanos son vistos como escultores, lo que están tallando con sus cinceles no es carne de perro, sino acervos genéticos. Parece que es carne de perro porque el criador podría anunciar su intención de, por ejemplo, acortar el hocico de las futuras generaciones de bóxers. Como producto final de ese propósito habrá un hocico más corto, como si se hubiese aplicado un cincel sobre la cara de

sus antepasados. Pero, como hemos visto, un bóxer típico de cualquier generación es una muestra del acervo genético del momento. Es el acervo genético que ha sido tallado y modelado a lo largo de los años. Los genes responsables de los hocicos largos han sido cincelados a partir del acervo genético y reemplazados por genes responsables de hocicos cortos. Cada raza de perros, desde el teckel hasta el dálmata, desde el bóxer hasta el borzoi, desde el caniche hasta el pequinés, desde el gran danés hasta el chihuahua, ha sido tallada, cincelada, amasada y modelada, pero no literalmente en carne y hueso, sino en su acervo genético.

No todo se hace tallando. Muchas de nuestras razas familiares de perros han sido derivadas como híbridas a partir de otras, a veces muy recientemente, por ejemplo en el siglo XIX. La hibridación, por supuesto, representa una violación deliberada del aislamiento de los acervos genéticos en islas virtuales. Algunos esquemas de hibridación se diseñan con tanto cuidado que los criadores se ofenden si se habla de sus productos como perros cruzados o mestizos (de esta forma se describió a sí mismo el presidente Obama). El «labradoodle» es un híbrido entre el caniche estándar y un labrador retriever, el resultado de una cuidadosa búsqueda de las mejores virtudes de ambas razas. Los propietarios de los labradoodles han creado sociedades y asociaciones iguales a las de los perros de pura raza. Hay dos escuelas de pensamiento en el fantástico mundo de los labradoodles, así como de otras hibridaciones similares. Por un lado están los que disfrutan creándolos a partir de caniches y labradores. Por otro, los que tratan de crear un nuevo acervo genético del que saldrán auténticos labradoodles cuando se crucen dos perros de esa raza. Por ahora se están recombinando genes de segunda generación de labradoodles que crean más variedades de las que supuestamente saldrían del cruce de dos perros con pedigrí. Así es como han surgido muchas de las razas «puras»: han pasado por una etapa intermedia de alta variación, reducida posteriormente a lo largo de generaciones de cuidadosa crianza.

Algunas veces, nuevas razas de perro comienzan con la adopción de una única mutación importante. Las mutaciones son los cambios aleatorios en los genes que constituyen el material crudo para la evolución por selección no aleatoria. En la naturaleza, las grandes mutaciones raramente sobreviven, pero a los genetistas les gusta tenerlas en el laboratorio porque son fáciles de estudiar. Las razas de perro con patas muy cortas, como los pachones y los teckel, las adquirieron en un solo paso gracias a una

mutación genética llamada acondroplasia, ejemplo clásico de una gran mutación que difícilmente sobreviviviría en la naturaleza. Una mutación similar es responsable del enanismo humano más común: el tronco es de tamaño normal, pero las piernas y los brazos son más cortos. Otras rutas genéticas producen razas en miniatura que conservan las proporciones del original. Los criadores de perros consiguen cambios en el tamaño y la forma seleccionando combinaciones de unas cuantas mutaciones importantes, como la acondroplasia, y muchos otros genes menores. No necesitan entender la genética para conseguir los cambios. Sin llegar a comprenderla, solo eligiendo quién se cruza con quién, podemos seleccionar cualquier tipo de característica deseada. Esto es lo que los criadores de perros, y en general los criadores de animales y de plantas, consiguieron siglos antes de que nadie supiera nada sobre genética. Ello nos suministra una lección sobre la selección natural, y es que la naturaleza, como es obvio, no entiende ni es consciente de nada de todo esto.

El zoólogo estadounidense Raymon Coppinger sugiere que los cachorros de diferentes razas son mucho más parecidos entre sí que los adultos. Los cachorros no se pueden permitir ser diferentes porque su actividad prioritaria es mamar, y mamar implica los mismos desafíos para todas las razas. En particular, para ser bueno mamando, un cachorro no puede tener un hocico muy largo, como el borzoi o el retriever. Esa es la razón por la que todos los cachorros parecen pugs (raza de perros muy pequeños y chatos). Podríamos decir que un pug es un adulto al que la cara no le ha crecido correctamente. La mayoría de los perros, después de destetarse, desarrollan un hocico relativamente alargado. Los pugs, bulldogs y pequineses no lo hacen; les crecen otras partes del cuerpo mientras que los hocicos retienen sus proporciones infantiles. El término técnico para esto es «neotenia» y lo encontraremos de nuevo cuando lleguemos a la evolución humana en el capítulo 7.

Si todas las partes de un animal crecen al mismo ritmo, de tal forma que el adulto es una réplica uniformemente inflada del cachorro, se dice que crece isométricamente. El crecimiento isométrico es bastante raro. En el crecimiento alométrico, en cambio, las diferentes partes crecen a ritmos diferentes. A menudo, los ritmos de crecimiento de las diversas partes del animal mantienen alguna relación matemática simple entre sí, fenómeno este que fue investigado especialmente por sir Julian Huxley en los años

treinta del siglo XX. Las distintas razas de perro alcanzan sus formas diferentes por medio de genes que cambian las relaciones de crecimiento alométrico entre las partes del cuerpo. Por ejemplo, los bulldogs consiguen su semblante *churchiliano* de una tendencia genética hacia un crecimiento más lento de los huesos nasales. Esto tiene efectos contundentes en el crecimiento relativo de los huesos de alrededor y, de hecho, sobre todos los tejidos circundantes. Uno de esos efectos es que el paladar se eleva hasta una posición extraña, de tal forma que los dientes del bulldog sobresalen y el animal tiene tendencia a babear. Los bulldogs también tienen dificultades para respirar, característica que comparten con los pequineses. Incluso su nacimiento resulta problemático, porque su cabeza es desproporcionadamente grande. La mayoría —si no todos— de los bulldogs que podemos ver han nacido por cesárea.

Con los borzois ocurre todo lo contrario. Tienen hocicos extraordinariamente largos. De hecho, dicho alargamiento empieza antes de nacer, lo que resulta atípico. Probablemente esto disminuye la eficiencia de los cachorros de borzoi para mamar con respecto a los de otras razas. Coppinger especula con que el deseo humano de alargar el hocico de los borzois, recurriendo para ello a la cría selectiva, ha alcanzado un límite, establecido por la capacidad de mamar de los cachorros.

¿Qué lecciones hemos aprendido de la domesticación del perro? Primero, la gran variedad de razas, desde el gran danés hasta el yorkshire, desde los scotties hasta los airedales, desde los ridgebacks hasta los teckel, desde los galgos hasta los San Bernardo, demuestra lo fácil que es para la selección no aleatoria de genes —«el tallado y modelado» de los acervos genéticos— producir cambios realmente dramáticos en la anatomía y el comportamiento, y a gran velocidad. De manera sorprendente, pueden estar implicados muy pocos genes. Aun así, los cambios son tan grandes —las diferencias entre razas tan impresionantes— que cabría esperar que a la evolución le hubiese costado millones de años en lugar de solo unos cuantos siglos. Si se puede conseguir semejante cambio evolutivo en solo unos pocos siglos o incluso décadas, imagine qué se podría haber conseguido en diez o cien millones de años.

Observando el proceso a través de los siglos, no es exagerado afirmar que los criadores de perros han tomado su carne como arcilla y la han comprimido, estirado y modelado para darle la forma que han querido. Por supuesto, como señalé antes, realmente hemos estado amasando no carne

de perro, sino el acervo genético del perro. Y «tallado» es un término metafórico más preciso que «modelado». Algunos escultores trabajan modelando un pedazo de arcilla hasta darle la forma deseada. Otros toman un trozo de piedra o madera y lo tallan *quitándole* pequeños fragmentos con un cincel. Obviamente, los amantes de los perros no tallan la forma de estos animales eliminando trozos de carne. Pero hacen algo parecido a tallar los acervos genéticos por sustracción. Aun así es un proceso más complejo que la mera sustracción. Miguel Ángel tomó un único pedazo de mármol y le fue quitando material hasta desvelar el *David* que se escondía dentro. No se añadió nada. Los acervos genéticos, sin embargo, están recibiendo nuevos elementos continuamente, por ejemplo, por mutación, y al mismo tiempo están sometidos a supresiones no aleatorias causadas por la muerte. La analogía con la escultura termina aquí y no debe ser forzada más allá, como veremos de nuevo en el capítulo 8.

La idea de escultura recuerda los cuerpos sobremusculados de los culturistas y de equivalentes no humanos como la raza de vacas *Belgian Blue*. Esta fábrica andante de filetes ha sido creada a partir de una alteración genética llamada «doble musculatura». Hay una sustancia denominada «miostatina» que limita el crecimiento muscular. Si se desactiva el gen que fabrica la miostatina, los músculos crecen más de lo normal. A veces se da el caso de que un gen dado puede mutar en más de una forma para producir el mismo resultado, y de hecho se puede deshabilitar el gen productor de miostatina de formas diferentes, con el mismo efecto. Otro ejemplo es la cría del cerdo llamado *Black Exotic,* o perros de diversas razas que muestran la misma musculatura exagerada por idéntica razón. Los culturistas humanos consiguen un físico similar mediante un régimen extremo de ejercicio y, a menudo, utilizando esteroides anabolizantes: ambas técnicas son manipulaciones ambientales que remedan los genes de la *Belgian Blue* y del *Black Exotic*. El resultado final es análogo y esa es una lección en sí misma. Los cambios genéticos y ambientales pueden producir resultados idénticos. Si queremos criar un niño para que gane una competición de culturismo y disponemos de algunos siglos para ello, podemos empezar con la manipulación genética, modificando exactamente el mismo gen extraño que caracteriza a las vacas *Belgian Blue* y a los cerdos *Black Exotic*. De hecho se sabe que hay humanos que tienen supresiones del gen de la miostatina y tienden a estar anormalmente musculados. Si comenzamos con un niño mutante y

hacemos que también levante pesas (presumiblemente las vacas y los cerdos no se dejan hacer esto), podríamos terminar con algo más grotesco que Míster Universo.

La oposición política a la selección eugenésica en humanos cae a veces en la falsa premisa de que es imposible. No solo es inmoral, suele decirse, sino que además no funcionaría. Lamentablemente, decir que algo es moralmente incorrecto o políticamente reprobable no es lo mismo que decir que no funcionaría. A mí no me cabe duda de que, si uno se lo propone y cuenta con el tiempo y el poder político suficientes, podría conseguir una raza de culturistas superiores, o de saltadores de altura o de lanzadores de peso; de pescadores de perlas, luchadores de sumo o velocistas; o (sospecho, aunque con menos confianza debido a que no hay precedentes animales) de músicos superiores, poetas, matemáticos o catadores de vino. La razón por la que tengo confianza en la cría selectiva para el desarrollo de las habilidades atléticas es que las cualidades que se necesitan son muy similares a las que, según se ha demostrado, funcionan en la cría de caballos de carreras y de enganche, de galgos y de perros de trineo. La razón por la que también tengo mucha confianza en la posibilidad práctica (aunque no en la conveniencia política ni moral) de la cría selectiva de rasgos mentales u otras características únicamente humanas se basa en los pocos fallos ocurridos en los intentos de cría selectiva en animales, aun en rasgos que podrían parecer sorprendentes. ¿Quién habría pensado, por ejemplo, que los perros podrían ser seleccionados por sus habilidades en el pastoreo, como «señaladores» o en peleas contra toros?

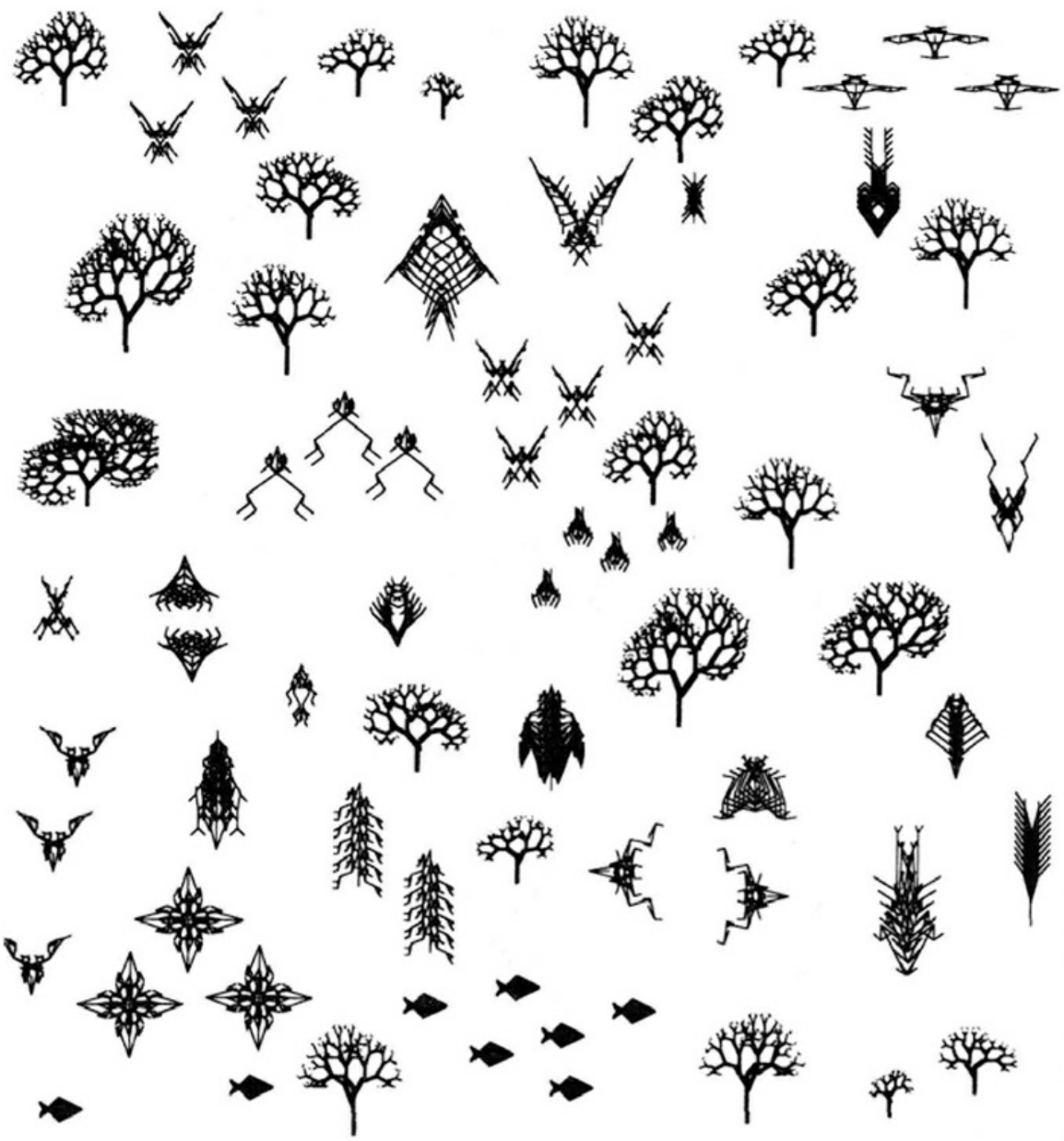
¿Queremos vacas que den mucha leche, muchísima más de la que sería necesaria para alimentar a las crías? La cría selectiva puede proporcionárnoslas. Las vacas pueden ser modificadas para que desarrollen ubres grandes y desgarbadas y para que continúen dando cantidades copiosas de leche por tiempo indefinido, mucho más allá del periodo normal de lactancia de un ternero. Como es evidente, esta técnica no se ha utilizado para criar yeguas lecheras, pero ¿querría alguien apostar a que lo conseguiríamos si lo intentáramos? Y por supuesto, lo mismo sucedería con las mujeres lecheras si alguien lo intentase. Muchas mujeres, embaucadas por el mito de que los pechos grandes son atractivos, pagan grandes cantidades de dinero para que los cirujanos les implanten silicona, con (para mi gusto) resultados poco llamativos. ¿Duda alguien de que, una

vez que se hayan sucedido suficientes generaciones, se podría conseguir la misma deformidad por reproducción selectiva, en la línea de las vacas frisonas?

Hace unos veinticinco años desarrollé una simulación por ordenador para ilustrar el poder de la selección artificial: una especie de juego de ordenador equivalente al cultivo de rosas de concurso o la cría de perros o ganado. Al jugador se le presenta en la pantalla una lista de nueve formas —«biomorfos computacionales»—, siendo la que ocupa el lugar central el «padre» de las otras ocho. Todas las formas se construyen bajo la influencia de, más o menos, una docena de «genes», simplemente números que pasan de «padres» a «hijos» con la posibilidad de que intervengan en el camino pequeñas «mutaciones». Una mutación es solo un pequeño incremento o decremento en el valor numérico del gen del padre. Cada forma se construye bajo la influencia de un conjunto particular de números, que son los valores particulares de su docena de genes. El jugador mira a la lista de nueve formas y, sin ver los genes, elige la forma preferida de «cuerpo» que quiere que se reproduzca. Los otros ocho biomorfos desaparecen de la pantalla, el elegido se desplaza al centro y «genera» ocho nuevos «hijos» mutantes. El proceso se repite durante tantas «generaciones» como tiempo tenga el jugador, y la forma media de los «organismos» en la pantalla «evoluciona» gradualmente a medida que pasan las generaciones. Solo los genes pasan de generación en generación, por lo que, seleccionando los biomorfos a ojo, el jugador está seleccionando genes sin darse cuenta. Esto es lo que ocurre cuando los criadores eligen perros o rosas para reproducirlos.

Eso en cuanto a la genética. El juego comienza a ponerse interesante cuando consideramos la «embriología». La embriología de un biomorfo en la pantalla es el proceso por el cual sus «genes» —esos valores numéricos — influyen en su forma. Se pueden imaginar embriologías diferentes, y yo he probado muchas de ellas. Mi primer programa, llamado «El relojero ciego», usa una embriología de «crecimiento de árbol». Un «tronco» principal se divide en dos «ramas»; luego, cada rama se divide en dos ramas a su vez, y así sucesivamente. El número de ramas y sus ángulos y longitudes están bajo control genético, determinado por el valor numérico de los genes. Una característica importante de la embriología de árbol es

que es *recursiva*. No me extenderé ahora en esta idea, pero significa que una única mutación tiene siempre un efecto sobre todo el árbol, y no solo sobre una parte del mismo.



Biomorfos del programa «El relojero ciego»

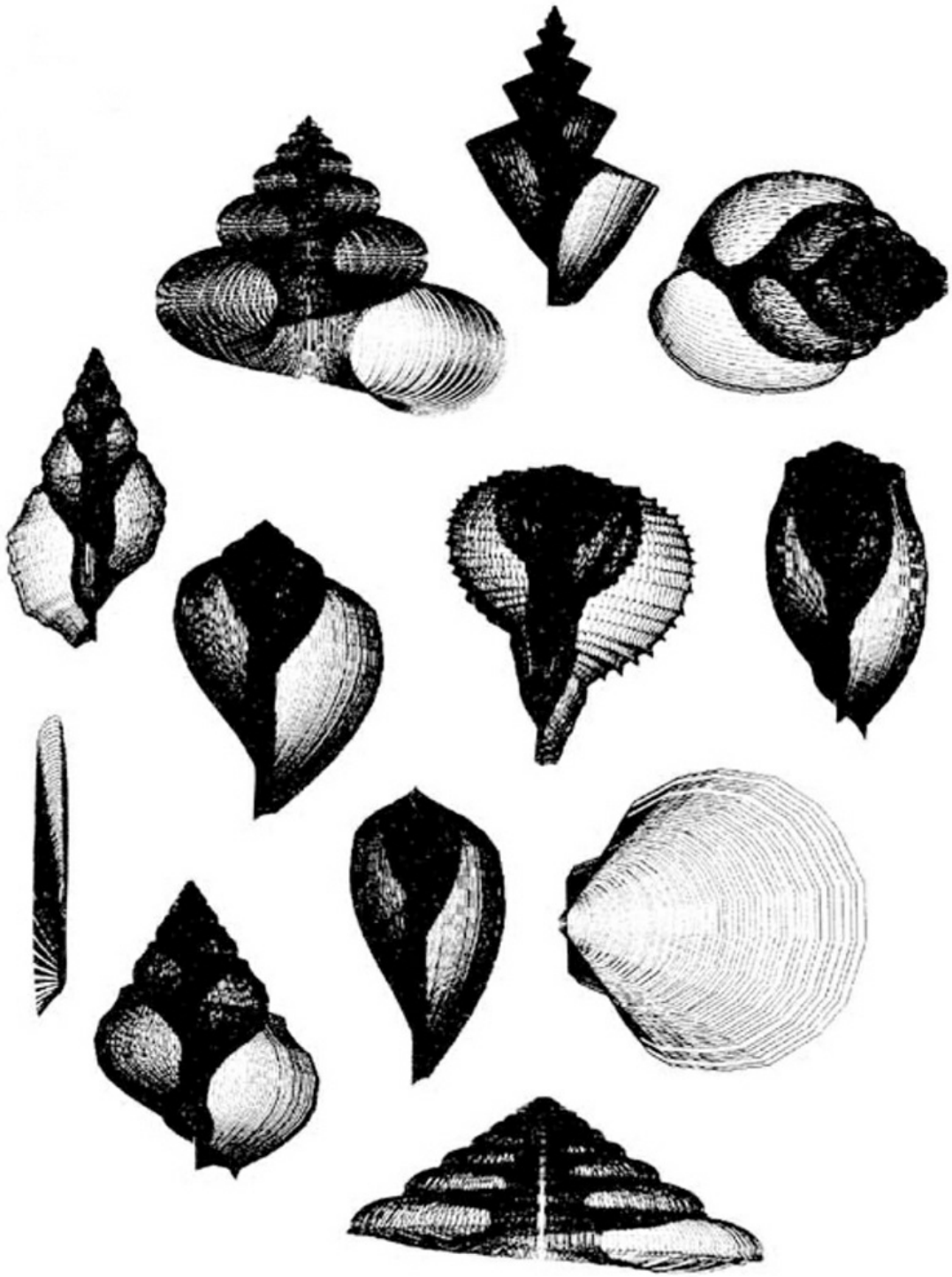
Imagen 2

Aunque el programa de «El relojero ciego» comienza con un árbol simple, rápidamente deriva hacia un maravilloso mundo de formas evolucionadas, muchas de ellas de una extraña belleza, y algunas —

dependiendo de las intenciones del jugador humano— llegan a parecerse a criaturas familiares como los insectos, las arañas o las estrellas de mar. En la imagen anterior se puede observar un «safari park» de criaturas que un solo jugador (yo) encontró en los vericuetos y cloacas de este extraño país de las maravillas computacional. En una versión posterior amplié la embriología para permitir que los genes controlaran el color y la forma de las «ramas» del árbol.

Un programa más elaborado llamado «Artromorfos», que ideé junto con Ted Kaehler, quien trabajaba entonces para la compañía Apple Computer, incorpora una «embriología» con algunas características específicamente diseñadas para producir «insectos», «arañas», «ciempiés» y otras criaturas similares a los artrópodos. En mi libro *Escalando el monte improbable* explico en detalle los «artromorfos» junto con los «biomorfos», los «conchomorfos» (moluscos computacionales) y otros programas de este tipo.

Como suele ocurrir, las matemáticas de la embriología de las conchas se conocen bien, así que la selección artificial es capaz, utilizando mi programa «Conchomorfos», de generar formas con un parecido extremadamente alto a las de los seres vivos (ver figura). Volveremos sobre estos programas en el capítulo final para defender un argumento completamente diferente. Aquí los hemos introducido con el propósito de ilustrar el poder de la selección artificial, incluso en un entorno computacional extremadamente simplificado. En el mundo real de la agricultura y la horticultura, en el mundo de los columbófilos o de los criadores de perros, la selección artificial puede conseguir mucho más. Los «biomorfos», los «artromorfos» y los «conchomorfos» solo ilustran el principio, de una forma parecida a como la selección artificial misma va a ilustrar el principio que subyace tras la selección natural —en el próximo capítulo—.



Conchomorfos: conchas generadas por ordenador con formas derivadas de la selección artificial

Imagen 3

Darwin dispuso de experiencia de primera mano sobre el poder de la selección artificial y le otorgó el honor de aparecer en el primer capítulo de *El origen de las especies*. Con ello facilitaba a sus lectores la tarea de divulgar su gran apuesta: el poder de la selección natural. Si los criadores humanos pueden transformar un lobo en un pequinés, o una col salvaje en una coliflor, en tan solo unos cuantos siglos o milenios, ¿por qué no deberían los supervivientes no aleatorios de plantas y animales salvajes hacer lo mismo a lo largo de millones de años? Esta va a ser la conclusión de mi próximo capítulo; pero mi estrategia será continuar primero con el proceso de facilitar el camino hacia la comprensión de la selección natural.

3

EL CAMINO DE ROSAS HACIA LA MACROEVOLUCIÓN

En el capítulo 2 se mostraba cómo el ojo humano, trabajando con la cría selectiva durante muchas generaciones, esculpe y modela el cuerpo del perro para que tome una increíble cantidad de formas, colores, tamaños y patrones de comportamiento. Pero somos humanos y estamos acostumbrados a hacer elecciones que son deliberadas y planificadas. ¿Hay otros animales que hacen las mismas cosas que los criadores humanos, quizá sin la deliberación o intención, pero con los mismos resultados? Sí, y ellos llevan adelante el sistemático programa de persuasión de este libro. Este capítulo se embarca en un proceso de seducción de la mente, paso a paso, a medida que nos trasladamos del territorio familiar de la cría de perros y la selección artificial al descubrimiento fundamental, por parte de Darwin, de la selección natural, a través de algunos estadios intermedios muy coloridos. El primero de estos estadios intermedios en el camino de la seducción (¿sería demasiado llamarlo «camino de rosas»?) nos lleva al meloso mundo de las flores.

Las rosas silvestres son pequeñas flores agradables, bonitas, pero no como para prodigarles calificativos y denominaciones del tipo «Paz» o «Adorable señorita» u «Ofelia». Las rosas silvestres tienen un aroma delicado, inconfundible, pero no tan cautivador como para merecer nombres como «Día de los caídos» o «Elizabeth Harkness» o «Nube fragante». El ojo humano y la nariz humana se pusieron a trabajar con las rosas silvestres, haciéndolas más grandes, dándoles forma, cambiando sus hábitos de crecimiento y, finalmente, introduciéndolas en sofisticados programas de hibridación hasta que hoy, después de décadas de habilidosa cría selectiva, hay cientos de variedades con premios, cada una con su propio nombre evocativo o conmemorativo. ¿A quién no le gustaría tener una rosa con su nombre?

LOS INSECTOS FUERON LOS PRIMEROS DOMESTICADORES

Las rosas cuentan la misma historia que los perros, pero con una diferencia, que es relevante para nuestra estrategia de persuasión. La flor de la rosa, incluso antes de que los ojos y las narices humanas se embarcaran en su trabajo de cincelado genético, debía su propia existencia a millones de años de un modelado muy similar por parte de los ojos y las narices de los insectos (bueno, de sus antenas, que es con lo que huelen los insectos). Y lo mismo se puede aplicar a todas las flores que embellecen nuestros jardines.

El girasol, *Helianthus annuus*, es una planta de América del Norte cuya forma silvestre se parece a un aster o a una margarita grande. Los girasoles cultivados actualmente han sido modificados hasta el punto de que sus flores tienen el tamaño de un plato de postre [8]. Los girasoles «Mamut», obtenidos originalmente en Rusia, llegan a alcanzar entre cuatro y seis metros de altura, el diámetro de su cabeza se acerca a los treinta centímetros —lo que supera en más de diez veces el tamaño del disco de un girasol silvestre— y normalmente desarrollan una sola cabeza por planta en lugar de las muchas flores más pequeñas que tiene la planta silvestre. Los rusos comenzaron a cultivar esta flor americana, dicho sea de paso, por razones religiosas. Durante Cuaresma y Adviento, la Iglesia Ortodoxa prohíbe el uso de aceite para cocinar. Por una razón que yo —poco instruido en las profundidades de la teología— no presumo de entender, el aceite de girasol se excluyó de esta prohibición [9]. Este hecho desencadenó una presión económica que condujo al cultivo selectivo del girasol. Mucho antes de la era moderna, sin embargo, los nativos americanos habían cultivado estas flores tan nutritivas y espectaculares para alimentarse, para teñir y para decorar, y consiguieron resultados intermedios entre el girasol silvestre y los extravagantes ejemplares de los cultivadores modernos. Pero antes de eso, una vez más, los girasoles, como todas las flores de brillantes colores, deben su existencia al cultivo selectivo realizado por los insectos.

Lo mismo se puede decir de la mayoría de las flores que conocemos —probablemente todas las de un color distinto al verde y cuyo olor difiere del habitual olor a planta—. Los insectos no han hecho todo el trabajo —

en algunas flores, los polinizadores que llevaron a cabo la cría selectiva inicial fueron colibríes, murciélagos o incluso ranas—, pero el principio es el mismo. Las flores de jardín han sido mejoradas todavía más por el ser humano, pero las flores silvestres con las que empezamos nos llamaron la atención, en primer lugar, porque los insectos y otros agentes selectivos estuvieron ahí antes que nosotros. Generaciones de colibríes y otros polinizadores naturales eligieron a generaciones de flores ancestrales. Es un ejemplo perfectamente válido de la cría selectiva, con la pequeña diferencia de que los criadores eran insectos y colibríes, no humanos. Yo creo, desde luego, que la diferencia es pequeña; puede que usted no, en cuyo caso todavía me queda trabajo de persuasión por hacer.

¿Qué nos puede hacer pensar que hay una gran diferencia? Por alguna razón, los humanos cultivan *conscientemente*, digamos, la rosa púrpura de tono más próximo al negro que pueden, y lo hacen para satisfacer un impulso estético o porque piensan que otra gente pagará dinero por ella. Los insectos no lo hacen por razones estéticas, sino por razones de... bueno..., aquí necesitamos retroceder y repasar todo el asunto de las flores y su relación con sus polinizadores. Esto es lo que sabemos. Por razones en las que no voy a entrar, la esencia de la reproducción sexual es que uno no se fertilice a sí mismo. Si se hiciera, de entrada tendría poco sentido preocuparse por la reproducción sexual. El polen debe ser transportado de alguna forma de una planta a otra. Las plantas hermafroditas, que tienen partes masculinas y femeninas dentro de una flor, normalmente se toman muchas molestias para evitar que la parte masculina fertilice a la femenina. El mismo Darwin estudió la ingeniosa forma en que las onagras lo consiguen.

Si damos por supuesta la necesidad de fertilización cruzada, ¿cómo consiguen las flores transportar el polen a través del espacio físico que las separa de otras flores de la misma especie? La forma obvia es utilizando el viento, y muchas plantas hacen uso de él. El polen es un polvo fino y ligero. Si se libera suficiente cantidad en un día de viento, uno o dos granos tendrán la suerte de aterrizar en el sitio adecuado sobre una flor de la especie adecuada. Pero la polinización mediante el aire es un derroche. Se necesita producir una cantidad enorme de polen, como bien saben los que padecen la fiebre del heno. La mayor parte de los granos de polen

aterrizan en algún lugar diferente al que deberían y se desperdicia toda la energía y el costoso *matériel*. Hay una forma más efectiva de dirigir el polen.

¿Por qué las plantas no eligen la opción animal y caminan por los alrededores en busca de otra planta de la misma especie, para después copular con ella? Esta es una pregunta más difícil de lo que parece. No basta simplemente con afirmar que las plantas no caminan, pero me temo que tendremos que aceptarlo de momento [10]. El hecho es que las plantas no caminan. Pero los animales caminan. Y los animales vuelan y tienen sistemas nerviosos capaces de dirigirlos hacia objetivos particulares con formas y colores específicos. Así que, si hubiera alguna forma de persuadir a un animal de que se embadurnara con polen y luego caminara, o preferiblemente volara, hacia otra planta de la especie adecuada...

Bien, la respuesta no es un secreto: eso es exactamente lo que ocurre. La historia es en algunos casos muy compleja y siempre fascinante. Muchas flores utilizan comida como soborno, normalmente néctar. Quizá «soborno» sea una palabra muy fuerte. ¿Mejor «pago por los servicios recibidos»? Me gustan las dos expresiones siempre y cuando no las interpretemos en el sentido humano. El néctar es un jarabe dulce que fabrican las plantas solo y específicamente para pagar y recargar a las abejas, mariposas, colibríes, murciélagos y otros medios de transporte de alquiler. Es costoso de fabricar, pues se lleva una parte de la energía de la luz solar atrapada por las hojas, que son los paneles solares de las plantas. Desde el punto de vista de las abejas y de los colibríes, es combustible de aviación de alta energía. La energía atrapada en los azúcares del néctar podría ser utilizada para otra función en la economía de la planta, quizá para fabricar raíces o para llenar los almacenes subterráneos que llamamos tubérculos o bulbos, o incluso para elaborar grandes cantidades de polen para dispersarlo a los cuatro vientos. Evidentemente, a una gran cantidad de especies de plantas les compensa «pagar» a los insectos y los pájaros por sus alas y recargar sus músculos con azúcar. No es una ventaja abrumadora, sin embargo, ya que algunas plantas utilizan la polinización aérea, presumiblemente porque los detalles de sus circunstancias económicas inclinan la balanza en ese sentido. Las plantas mantienen una economía de su energía y, como en cualquier economía, hay diferentes opciones que compensan más o menos, según las circunstancias. Esta es una lección importante en la evolución, dicho sea de paso. Diferentes

especies hacen cosas de modos distintos y a menudo no comprendemos esas disparidades hasta que hemos estudiado la economía completa de la especie.

Si la polinización aérea está en un extremo de la cadena de técnicas de fertilización cruzada —¿deberíamos llamarlo el «extremo derrochador»?—, lo que hay en el otro extremo, ¿sería la «bala mágica»? Se puede confiar en muy pocos insectos para que vayan como una bala mágica directos desde la flor donde cogieron el polen hasta otra de la especie adecuada. Algunos van a cualquier flor antigua, o posiblemente a cualquier flor del color adecuado, y aun así es una cuestión de suerte que esta sea de la misma especie que la flor que acaba de pagarle con néctar. Sin embargo, hay algunos ejemplos maravillosos de flores que están muy cerca del extremo de la bala mágica en esta cadena. Muy arriba en la lista se encuentran las orquídeas, y no es ninguna sorpresa que Darwin les dedicara todo un libro: *La fecundación de las orquídeas.*

Darwin y el codescubridor de la selección natural, Wallace, fijaron su atención sobre una sorprendente orquídea de Madagascar, *Angraecum sesquipedale* (véanse páginas en color 4-5), y ambos hicieron la misma extraordinaria predicción que se confirmó triunfalmente más tarde. La orquídea tiene nectarios tubulares que llegan a alcanzar más de once pulgadas, según la regla de Darwin. Esto son casi treinta centímetros. Una especie cercana, *Angraecum longicalcar,* posee apéndices para conducir el néctar aún más largos, de hasta cuarenta centímetros (más de quince pulgadas). En su libro, Darwin predijo, basándose únicamente en la existencia de *A. sesquipedale,* que debía de haber «polillas capaces de extender (la lengua) hasta una longitud de entre diez y once pulgadas». Cinco años más tarde, Wallace (no está claro si había leído el libro de Darwin) mencionó varias polillas cuyas probóscides estaban cerca de ser suficientemente largas como para satisfacer el requisito.

> He examinado cuidadosamente las probóscides de un espécimen de *Macrosila cluentius* de Sudamérica en la colección del Museo Británico y he descubierto que tiene ¡nueve pulgadas y cuarto de longitud! Otro de África tropical *(Macrosila morgani)* tiene siete pulgadas y media. Una especie que tuviera una probóscide dos o tres pulgadas más larga podría alcanzar el néctar de las flores más grandes de *Angraecum sesquipedale*, cuyos nectarios varían en longitud de diez a catorce pulgadas. Se puede predecir que existe en Madagascar

una polilla con esas características; y los naturalistas que visiten la isla deberían buscarla con tanta confianza como los astrónomos buscaron el planeta Neptuno, —¡y tendrán el mismo éxito!—.

En 1903, después de la muerte de Darwin, pero aún en vida de Wallace, se descubrió una polilla desconocida hasta ese momento que resultó satisfacer la predicción de Darwin/Wallace, y fue honrada con el nombre subespecífico *praedicta*. Pero ni siquiera la *Xanthopan morgani praedicta*, «la polilla halcón de Darwin», está suficientemente bien dotada para polinizar la *A. longicalcar*, y la presencia de esta flor nos anima a sospechar, con la misma confianza con la que Wallace se refirió al descubrimiento del planeta Neptuno, de la existencia de una polilla con una lengua todavía más larga. Dicho sea de paso, este pequeño ejemplo muestra la falsedad, una vez más, de la afirmación de que la ciencia de la evolución no puede ser predictiva porque trata sobre la historia pasada. La predicción de Darwin/Wallace es perfectamente válida, aun cuando la polilla *praedicta* haya existido antes de que ellos la hicieran. Estaban prediciendo que, en algún momento en el futuro, alguien descubriría una polilla con la lengua suficientemente larga como para alcanzar el néctar dentro de la *A. sesquipedale*.

Los insectos tienen buena visión en color, pero todo su espectro está desplazado hacia el ultravioleta y se aleja del infrarrojo. Como nosotros, ven el amarillo, el verde, el azul y el violeta. Sin embargo, a diferencia de nosotros también ven bien en el rango del ultravioleta; y no ven el rojo en «nuestro» extremo del espectro. Si se tiene una flor tubular roja en el jardín se puede hacer una buena apuesta, aunque no una predicción segura, de que en su hábitat natural no es polinizada por insectos, sino por pájaros, que ven bien en el extremo rojo del espectro —quizá por colibríes, si es una planta del Nuevo Mundo, o por suimangas, si es del Viejo Mundo—. Las flores que nosotros vemos sin color pueden estar espléndidamente decoradas con manchas o franjas para beneficio de los insectos, aunque es una ornamentación que no podemos percibir porque somos ciegos al ultravioleta. Muchas flores guían a las abejas hacia la tierra mediante marcas pintadas sobre su superficie con pigmentos ultravioleta que el ojo humano no puede ver.

La onagra *(Oenothera biennis)* nos parece amarilla. Pero si se toma una fotografía con un filtro ultravioleta se puede ver un patrón que las abejas reconocen, pero que nosotros no podemos ver con visión normal (véanse páginas de color 4-5). En la fotografía aparece como rojo, pero es un «color falso»: una elección arbitraria hecha en el proceso fotográfico. No significa que las abejas lo vean como rojo. Nadie sabe qué aspecto tiene el ultravioleta (o el amarillo o cualquier otro color) para una abeja (ni siquiera sabemos cómo vemos nosotros el rojo —una vieja historia filosófica—).

Una pradera llena de flores es la Times Square de la naturaleza, el Piccadilly Circus de la naturaleza. Un cartel de neón moviéndose despacio, que cambia de semana en semana a medida que las diferentes flores entran en la estación, y es cuidadosamente anunciado por pistas tales como la duración cambiante de los días, que sirve para sincronizarse con otras flores de la misma especie. Esta extravagancia floral, salpicada por los verdes lienzos de una pradera, ha sido moldeada y coloreada, magnificada y engalanada por las elecciones anteriores realizadas por los ojos de los animales: los ojos de las abejas, de las mariposas, de los sírfidos. En los bosques del Nuevo Mundo tendríamos que añadir a la lista los del colibrí, y en los bosques africanos, los de las suimangas.

A propósito, los colibríes y las suimangas no tienen una relación particularmente cercana. Tienen un aspecto y un comportamiento parecidos porque la evolución les ha hecho converger en la misma forma de vida, revoloteando alrededor de las flores y el néctar (aunque también comen insectos). Sus largos picos, especialmente aptos para penetrar los nectarios, se extienden con lenguas todavía más largas. Las suimangas tienen menos capacidad de maniobra en vuelo que los colibríes, que pueden incluso volar hacia atrás como un helicóptero. Los esfinge colibríes también son convergentes, aunque desde una posición mucho más lejana en el reino animal, y son también consumados revoloteadores con lenguas espectacularmente largas (los tres tipos de libadores de néctar pueden verse en la página a color 5).

Volveremos a la evolución convergente más tarde, después de que entendamos correctamente la selección natural. En este capítulo nos están seduciendo las flores, que nos llevan paso a paso, marcando el camino hacia esa comprensión. Los ojos de los colibríes, los ojos de los esfinge colibríes, los ojos de las mariposas, los ojos de los sírfidos, los ojos de las

abejas están dirigidos especialmente hacia las flores silvestres, generación tras generación, proporcionándoles forma, color, olor, dándoles patrones y moteados de forma casi idéntica a como harían más tarde los ojos humanos con las variedades de jardín; y con perros, vacas, coles y maíz.

Para la flor, la polinización mediante los insectos representa una enorme ventaja en su economía en comparación con la polinización por diseminación al viento. Incluso si una abeja visita flores de manera indiscriminada, libando con promiscuidad de los botones de oro a las azulinas, de las amapolas a las celidonias, un grano de polen adherido a su peludo abdomen tiene mucha mayor probabilidad de llegar al objetivo adecuado —una segunda flor de la misma especie— de la que tendría si fuera esparcido por el viento. Sería un poco más efectiva con una abeja con preferencia por un color particular, digamos el azul. O con una abeja que, aunque no prefiera a largo plazo un color, tienda a adquirir hábitos de color, de tal forma que elija colores según los viajes. Mejor aún sería un insecto que visitara flores de una única especie. Y hay flores, como la orquídea de Madagascar, inspirada en la predicción de Darwin/Wallace, cuyo néctar está disponible únicamente para ciertos insectos que se especializan en ese tipo de flor y se benefician de su monopolio sobre ella. Estas polillas de Madagascar son las «balas mágicas» definitivas.

Desde el punto de vista de una polilla, las flores que proporcionan néctar de forma fiable son como dóciles vacas lecheras. Desde el punto de vista de las flores, las polillas que trasladan de forma segura su polen a otras flores de la misma especie son como un servicio de transporte urgente o como palomas mensajeras bien entrenadas. Cada lado podría decir que ha domesticado al otro, criándolo selectivamente para que haga un trabajo mejor que el que hacía antes. Los criadores humanos de rosas de concurso han obtenido efectos en las flores casi exactamente de los mismos tipos que los que han conseguido los insectos —solo exagerándolos un poco—. Los insectos cultivan flores para que sean brillantes y vistosas. Los jardineros las hacen aún más brillantes y vistosas. Los insectos lograron que las rosas tengan una fragancia agradable. Luego llegamos nosotros e hicimos que lo fuera más todavía. No deja de ser una coincidencia afortunada que las fragancias que gustan a las abejas y a las mariposas nos gusten a nosotros también. Las flores como la apestosa Benjamín *(Trillium erectum)* o la flor cadáver *(Amorphophallus titanum)*, que utilizan moscas de la carne o escarabajos carroñeros como

polinizadores, nos resultan nauseabundas, porque desprenden el olor de la carne en putrefacción. Supongo que los domesticadores humanos no realzan sus aromas.

Por supuesto que la relación entre los insectos y las flores es una calle de dos sentidos y no debemos dejar de mirar en las dos direcciones. Los insectos pueden «seleccionar» flores para que sean más bonitas, pero no porque ellos disfruten de la belleza [11]. Más bien, las flores se benefician de ser percibidas como atractivas por los insectos. Los insectos, al elegir las flores más atractivas para visitarlas, «seleccionan», de manera inadvertida, su belleza floral. Al mismo tiempo, las flores escogen a los insectos por su habilidad para polinizar. Por lo que, de nuevo, deduzco que los insectos seleccionan a las flores por su capacidad de proporcionar néctar, como granjeros que se decantan por frisonas con ubres enormes. Pero a las flores les interesa racionar su néctar. Si un insecto se sacia, no tendrá incentivo para seguir y buscar una segunda flor —malas noticias para la primera flor, para la que una segunda visita, la de polinización, es el objetivo de todo el ejercicio—. Desde el punto de vista de las flores, se debe mantener un delicado equilibrio entre proporcionar demasiado néctar (no hay visita a una segunda flor) y demasiado poco (no hay incentivo para visitar la primera flor).

Los insectos han «ordeñado» a las flores por su néctar y las han seleccionado para que tengan más producción —probablemente encontrando resistencia por parte de las flores, como hemos visto—. ¿Habrán seleccionado los apicultores (o los horticultores, pensando en los intereses de los apicultores) flores para que sean todavía más productivas en néctar, igual que los granjeros hacen con las vacas frisonas y las de Jersey? Me gustaría saber la respuesta. Mientras tanto, no hay duda del paralelismo entre los horticultores, como seleccionadores de flores olorosas y bonitas, y las abejas y mariposas, los colibríes y las suimangas.

TÚ ERES MI SELECCIÓN NATURAL

¿Existen otros ejemplos de cría selectiva realizada por ojos no humanos? Sí, claro. Piense en el apagado y camuflado plumaje de un faisán hembra y compárelo con el llamativo macho de la misma especie.

No cabe duda de que, si su supervivencia individual fuera lo único que importara, el macho de faisán dorado «preferiría» parecerse a la hembra, o a una versión crecida de cómo era de polluelo. La hembra y los pollos están muy bien camuflados y esa es la forma que tendría el macho si su supervivencia individual fuese prioritaria. Lo mismo pasa con otros faisanes, como el *Lady Amherst* y el más familiar faisán común. Los machos parecen extravagantes y peligrosamente atractivos para los depredadores, pero cada especie de una forma muy diferente. Las hembras están camufladas, tienen un color pardo y todas las especies son muy parecidas. ¿Qué está pasando aquí?

Variedades de gallina: tres ilustraciones del libro de Darwin. La variación de los animales y las plantas bajo domesticación

Imagen 4-5-6

Una forma de explicarlo es como Darwin lo haría: «selección sexual». Pero otra forma —que se adapta mejor a mi camino de rosas— es «cría selectiva de machos por parte de las hembras». Los colores brillantes pueden atraer depredadores, pero atraen también a los faisanes hembra. Generaciones de hembras han elegido aparearse con machos brillantes,

relucientes, en lugar de con las criaturas marrones o pardas en que se habrían convertido los machos de no haber intervenido la presión selectiva de las hembras. Lo mismo hicieron las hembras de los pavos reales, criando de modo selectivo pavos reales macho; las hembras del ave del paraíso, y muchas otras especies de aves, mamíferos, peces, anfibios, reptiles e insectos, grupos en los que las hembras (normalmente ellas, por razones en las que no necesitamos entrar) son las que eligen entre los machos competidores. Tal como ocurre con las flores de jardín, los criadores humanos de faisanes han mejorado el trabajo de selección anterior de los faisanes hembra, produciendo variantes espectaculares del faisán dorado, por ejemplo, aunque más bien han elegido dos o tres mutaciones en lugar de dar forma gradual al ave a lo largo de generaciones de cría selectiva. Los humanos también han criado de modo selectivo algunas variedades sorprendentes de palomas (que Darwin conocía de primera mano) y de gallinas, descendientes de un pájaro del Lejano Oriente, el ave roja de la jungla *Gallus gallus*.

Este capítulo versa principalmente sobre la selección mediante los ojos, pero otros sentidos pueden hacer lo mismo. Los aficionados han criado canarios tanto por su forma de cantar como por su apariencia. El canario salvaje es un pinzón marrón muy poco espectacular desde un punto de vista visual. Los criadores selectivos han cogido la paleta de colores que ofrece la variación aleatoria genética y han creado un color suficientemente distintivo como para que aparezca en el nombre del pájaro: canario amarillo. Por otro lado, la denominación del pájaro viene del nombre de las islas [12], no al revés, como sucede en el caso de las Islas Galápagos, cuya designación procede de la palabra española empleada para *tortoise*. Pero los canarios son conocidos por su forma de cantar y esto también ha sido modificado y enriquecido por los criadores humanos. Se han producido varios tipos de cantantes, como los Rollers, que han sido seleccionados para cantar con el pico cerrado, los Waterslagers, cuyo canto suena como el agua burbujeando, y los Timbrados, que producen notas metálicas similares al sonido de las campanas, junto con un charloteo parecido al de las castañuelas que recuerda sus orígenes españoles. Los cantos seleccionados por domesticación son más largos, más intensos y más frecuentes que los de tipo ancestral salvaje. Pero todos ellos, tan apreciados, han sido obtenidos

a partir de elementos que se encuentran en los canarios salvajes, al igual que los hábitos y habilidades de varias razas de perros proceden de elementos que se encuentran en el repertorio conductual de los lobos [13].

Una vez más, los criadores humanos se han limitado a trabajar sobre los esfuerzos selectivos anteriores de los pájaros hembra. A lo largo de generaciones, los canarios hembra seleccionaron inadvertidamente machos por su capacidad para cantar, eligiendo aparearse con aquellos cuyos trinos resultaban especialmente atractivos. En el caso particular de los canarios sabemos algo más. Los canarios (y las tórtolas domésticas) han sido ampliamente elegidos para la investigación sobre hormonas y comportamiento reproductivo. Se sabe que en ambas especies el sonido de la vocalización del macho (incluso de una grabación en una cinta) hace que se hinche el ovario de las hembras y segregue hormonas que las sitúan en un estado favorable a la reproducción y las vuelven más receptivas al apareamiento. Podríamos decir que los canarios machos manipulan a las hembras cantándoles. Es casi como si estuvieran administrándoles inyecciones de hormonas. Podríamos decir también que las hembras crían selectivamente machos para que sean cada vez mejores cantantes. Estas dos formas de enfocar el asunto constituyen las dos caras de una misma moneda. Por cierto, al igual que con otras especies de pájaros, existe una complicación: el canto no solo es atractivo para las hembras, además es disuasorio para los machos rivales —pero dejaremos esto a un lado de momento—.

Máscara kabuki de un guerrero samurái

Imagen 7

Ahora, para seguir avanzando con nuestro argumento, observemos este par de fotografías. La primera es un grabado en madera de una máscara kabuki japonesa que representa a un guerrero samurái. La segunda es un cangrejo de la especie *Heikea japonica* encontrado en aguas japonesas. El nombre genérico, *Heikea*, procede de un clan japonés, los Heike, que fueron derrotados en la batalla marina de Danno-ura (1185) por un clan rival llamado Genji. La leyenda cuenta que los fantasmas de los

guerreros Heike ahogados habitan ahora el fondo del mar, en los cuerpos de los cangrejos *Heikea japonica*. El mito se refuerza por el patrón que tiene este cangrejo en la espalda, que recuerda el gesto de ferocidad en el rostro de un guerrero samurái. El famoso zoólogo sir Julian Huxley estaba suficientemente impresionado por tal semejanza como para escribir: «El parecido del *Dorippe* con un guerrero japonés enfadado es demasiado específico y demasiado detallado como para ser accidental... Se produjo porque los cangrejos con un mayor parecido a la cara de un guerrero eran comidos con menos frecuencia que los otros». Aclaremos que *Dorippe* era el nombre que se daba al cangrejo en 1952, cuando Huxley lo escribió. Cambió a *Heikea* en 1990, cuando alguien redescubrió que había sido llamado así hasta 1824 —así son las estrictas reglas de prioridad de la nomenclatura zoológica—.

Cangrejo Heikea japonica

Imagen 8

Esta teoría, por la que generaciones de pescadores supersticiosos lanzaron de vuelta al mar los cangrejos que recordaban caras humanas, recibió un nuevo impulso en 1980 cuando Carl Sagan la sacó a relucir en

su maravilloso libro *Cosmos*. En palabras suyas:

> Supongamos que, por accidente, entre los antepasados lejanos de este cangrejo, apareció uno que se parecía ligeramente a un rostro humano. Aun antes de la batalla de Danno-ura, los pescadores podían haber sido reacios a comer esos cangrejos. Al echarlos de nuevo al agua pusieron en marcha un proceso evolutivo... Al pasar las generaciones, de cangrejos y de pescadores, los cangrejos con dibujos que recordaban la cara de un samurái sobrevivieron preferentemente hasta que, en algún momento, lo que había no era solo un rostro humano, ni el rostro de un japonés, sino la cara de un feroz samurái con el ceño fruncido.

Es una teoría fantástica, demasiado buena para que muera fácilmente, y el meme se ha replicado siguiendo el canon. Incluso encontré una página web en la que puedes votar si la teoría es cierta (31% de un total de 1.331 votantes), si las fotografías son falsas (15%), si los pescadores japoneses tallan los caparazones para que tengan ese aspecto (6%), si el parecido es pura coincidencia (38%) e incluso si los cangrejos realmente son manifestaciones de guerreros samuráis ahogados (un sorprendente 10%). Las verdades científicas no se deciden, por supuesto, por plebiscito, y yo voté solo porque si no lo hacía no me permitían ver las imágenes. Me temo que yo voté con los aguafiestas. Creo que el parecido es probablemente una coincidencia. No porque, como un escéptico autoritario había señalado, los salientes y hendiduras del caparazón del cangrejo revelen realmente lugares donde se anclan los músculos. Incluso en la teoría de Huxley/Sagan, los pescadores supersticiosos tendrían que haberse dado cuenta de algún parecido original, aunque sutil, y ese patrón simétrico de inserciones musculares es precisamente lo que habría proporcionado el parecido. Estoy más impresionado por la igualmente escéptica observación de que esos cangrejos son demasiado pequeños como para que valiera la pena comérselos. De acuerdo con ella, todos los cangrejos de ese tamaño habrían sido devueltos al mar, independientemente de que sus espaldas se parecieran a rostros humanos, aunque tengo que decir que esta fuente tan convincente de escepticismo se desmoronó cuando me llevaron a cenar en Tokio y mi anfitrión pidió, para todos los presentes, un plato de cangrejos. Eran mucho más grandes que los *Heikea* y estaban incrustados en fuertes caparazones calcificados, pero eso no impidió que este superhombre cogiera cangrejos enteros, uno a uno, y los mordiera como una manzana,

con un sonido tan crujiente que presagiaba unas encías sangrando dolorosamente. Un cangrejo tan pequeño como el *Heikea* sería una minucia para este campeón gastronómico. Seguramente se lo tragaría entero sin parpadear.

La razón principal que me lleva a ser escéptico sobre la teoría de Huxley/Sagan es que se puede demostrar que el cerebro humano tiene facilidad para ver caras en patrones aleatorios, como sabemos por evidencia científica, y merced a ella se originan numerosas leyendas sobre la aparición de las caras de Jesús, de la Virgen María o de la Madre Teresa en tostadas, pizzas o manchas de humedad en la pared. Esta facilidad se refuerza más si el patrón se sale de lo aleatorio en la dirección específica de la simetría. Todos los cangrejos (excepto los cangrejos ermitaños) son simétricos. Sospecho que el parecido de los *Heikea* con un guerrero samurái no es más que un accidente, por mucho que me gustara creer que ha sido realzado por la selección natural.

No importa. Hay muchos otros ejemplos que no implican a los humanos, en los que el «pescador» animal «devuelve» (o nunca llega a ver) lo que podría ser comida debido a su parecido con algo siniestro, y en los que dicha semejanza desde luego no se debe al azar. Si fuéramos un pájaro cazando orugas en el bosque, ¿qué haríamos al encontrarnos de repente con una serpiente? Creo que lo primero sería dar un salto hacia atrás asustados, y después nos mantendríamos a buena distancia. Pues bien, hay una oruga —para ser más preciso, la parte de atrás de una oruga — que tiene un parecido inconfundible con una serpiente. Es realmente inquietante si se tiene miedo de las serpientes —como yo, con vergüenza, reconozco tener—. Incluso pienso que podría ser reacio a coger este animal a pesar de saber perfectamente que en realidad es una oruga inofensiva. (Se puede ver una fotografía de esta extraordinaria criatura en la página a color 7). Tengo el mismo problema a la hora de coger sírfidos que imitan a las avispas o a las abejas, aunque pueda ver que, por tener solo un par de alas, son moscas sin aguijón. Estos son solo algunos ejemplos de los muchos animales que obtienen protección porque se parecen a otra cosa: algo incomestible como una piedra, una ramita o la hoja de una semilla marina, o algo decididamente desagradable, como una serpiente o una avispa, o los deslumbrantes ojos de un posible depredador.

¿Han estado, por tanto, los ojos de los pájaros criando insectos selectivamente por su parecido a modelos venenosos o de sabor desagradable? En cierto sentido debemos responder que sí con rotundidad. ¿Después de todo, cuál es la diferencia entre estos y las hembras de pavo real que crían machos por su belleza, o los humanos que se dedican a la cría selectiva de perros o rosas? Las hembras de pavo real están seleccionando *positivamente* algo atractivo, acercándose a ello, mientras que los pájaros que cazan orugas están seleccionando *negativamente* algo repelente, evitándolo. Justo aquí tenemos otro ejemplo; en este caso, la «selección» es positiva aun cuando el selector no se beneficia de su elección. Ni mucho menos.

Los peces lofiformes de aguas profundas se sitúan en el fondo del mar para esperar pacientemente a su presa [14]. Como muchos otros peces de aguas profundas, los lofiformes son espectacularmente feos según nuestros modelos. Quizá también para los estándares de los peces, aunque eso probablemente no importe porque, donde viven, la oscuridad impide ver cualquier cosa. Como otros habitantes de las profundidades, la hembra del pez lofiforme produce a menudo su propia luz —o mejor dicho, tiene unos receptáculos especiales en los que aloja bacterias que fabrican luz para ella —. Esta «bioluminiscencia» no es suficientemente brillante como para reflejar los detalles, pero sí lo es para atraer a otros peces. Una espina que en cualquier otro pez sería uno de los radios de una aleta, se alarga y endurece para convertirse en una caña de pescar. Y al final de la caña hay —¿qué otra cosa podría ser?— un señuelo o cebo. Los señuelos varían de una especie a otra, pero siempre se parecen a pequeños trozos de comida: quizá un gusano, un pez diminuto o simplemente un bocado tentador y vibrante sin descripción. A menudo el cebo es realmente luminoso: otra señal de neón natural y en este caso el mensaje que se muestra es «ven y cómeme». Los peces pequeños se sienten verdaderamente atraídos. Se acercan al cebo. Y es la última cosa que hacen, porque, en ese momento, el pez lofiforme abre su enorme boca y la presa es engullida con el torrente de agua succionada.

Y ahora, ¿diríamos que las pequeñas presas están «seleccionando» señuelos cada vez más atractivos, exactamente igual que las hembras de pavo real seleccionan machos más atractivos y los horticultores seleccionan rosas más atractivas? Es difícil ver por qué no. En el caso de las rosas, las flores más atractivas son las que han sido deliberadamente

elegidas por el jardinero. Lo mismo ocurre con los pavos reales escogidos por sus hembras. Es posible que estas hembras no sean conscientes de que están eligiendo, mientras que los cultivadores de rosas sí lo son. Pero eso no supone una diferencia importante en estas circunstancias. Un poco más delicada es la distinción entre el ejemplo del pez lofiforme y los otros dos. Las presas están eligiendo a los rapes más «atractivos» mediante la vía indirecta de asegurar su supervivencia: ¡alimentándolos! Los rapes con señuelos poco atractivos tienen más probabilidades de morirse de hambre y, por tanto, de no reproducirse. Las pequeñas presas están realmente «eligiendo». ¡Pero están eligiendo con sus vidas! A lo que estamos llegando aquí es a la selección natural verdadera y estamos alcanzando el final de la seducción progresiva, objetivo de este capítulo.

Veamos la progresión paso a paso.

1. Los humanos eligen deliberadamente rosas atractivas, girasoles, etc., para su cultivo selectivo, por lo que preservan los genes que producen esas características atractivas. A esto se le llama selección artificial, es algo que los humanos han conocido desde mucho antes de los hallazgos de Darwin, y todo el mundo entiende que es suficientemente poderoso como para convertir lobos en chihuahuas y para alargar las mazorcas de maíz de centímetros a decímetros.
2. Las hembras de los pavos reales (no sabemos si consciente y deliberadamente, pero pensemos que no) eligen a pavos macho atractivos para aparearse, de nuevo preservando los genes atractivos. A esto se le llama selección sexual y Darwin la descubrió, o al menos la reconoció claramente y le dio un nombre.
3. Los pequeños peces que sirven como presas (definitivamente no lo hacen con intención) eligen peces lofiformes para su supervivencia, alimentando a los más atractivos con sus propios cuerpos y, por tanto, seleccionándolos para que continúen con vida y, en consecuencia, preserven los genes que producen las características atractivas. A esto se le llama —sí, finalmente hemos llegado ahí— selección natural, y fue el gran descubrimiento de Darwin.

El genio especial de Darwin le hizo darse cuenta de que la naturaleza podía desempeñar el papel del agente que selecciona. Todo el mundo conocía la selección artificial [15], o al menos todo el mundo con

experiencia en granjas o jardines, exhibiciones caninas o palomares. Pero fue Darwin quien primero se dio cuenta de que no hace falta un *agente* que elija. La elección se puede hacer automáticamente por supervivencia —o por imposibilidad de supervivencia—. Darwin comprendió que la supervivencia cuenta porque solo los supervivientes se reproducen y transmiten los genes (Darwin no utilizó la palabra *genes)* que les ayudan a sobrevivir.

Elegí el rape para mi ejemplo porque todavía cabe la interpretación de un agente que utiliza sus ojos para elegir a los que van a sobrevivir. Pero hemos llegado al punto álgido de nuestro argumento —el punto de Darwin — en el que ya no necesitamos hablar para nada de un agente que selecciona. Pasemos ahora de los peces lofiformes a, digamos, el atún o el tarpón, peces que buscan activamente a su presa. Ninguna extensión del lenguaje o la imaginación nos permite afirmar que la presa «elige» qué tarpón sobrevivirá convirtiéndose en comida. Lo que podemos decir, sin embargo, es que los tarpones que están mejor equipados para cazar a sus presas, por la razón que sea —músculos que les permiten nadar más deprisa, visión aguda, etc.—, serán los que sobrevivan y, por tanto, los que se reproduzcan y transmitan los genes que les hacen tener éxito. Son «elegidos» por el hecho mismo de mantenerse con vida, cuando otro tarpón que estaba, *por la razón que sea,* peor equipado, no ha sobrevivido. Por tanto, podemos añadir un cuarto paso a nuestra lista.

4. Sin ningún tipo de agente selector, los individuos que son «elegidos» para sobrevivir por el hecho de tener un equipamiento superior son los que con mayor probabilidad se reproducirán y, por tanto, los que transmitirán los genes que les hacen tener un equipamiento superior. Así, el acervo genético de cada especie tiende a llenarse con genes que fabrican un equipamiento superior para la supervivencia y la reproducción.

Observe la amplitud de la selección natural. Los otros ejemplos que he mencionado, los pasos 1, 2 y 3 y muchos otros pueden ser englobados en la selección natural como casos especiales del fenómeno más general. Darwin estudió el caso más general de un fenómeno que la gente ya conocía, pero de forma restringida. Hasta entonces sabían de él solo en el caso especial de la selección artificial. El caso general es la supervivencia

no aleatoria del equipamiento hereditario que varía aleatoriamente. No importa cómo se produce la supervivencia no aleatoria. Puede ser una elección intencional y deliberada hecha por un agente (como los humanos seleccionando galgos con pedigrí para su cría selectiva); puede ser una elección inadvertida en la que el que elige —con una visión retrospectiva que tenemos nosotros pero no quien hace la selección— preferiría no haber participado (como el pez presa eligiendo acercarse al cebo de un pez lofiforme); o puede ser algo que no reconoceríamos como una elección en absoluto, como cuando el tarpón sobrevive en virtud de, digamos, una oscura ventaja bioquímica profundamente oculta entre sus músculos que le da un impulso extra de velocidad al perseguir a una presa. El mismo Darwin lo expresó con gran belleza en un pasaje de *El origen de las especies:*

> Se puede decir que la selección natural está escudriñando cada variación por todo el mundo, incluso la más pequeña; rechazando la que es mala, preservando y añadiendo todo lo que es bueno; trabajando en silencio e insensiblemente, en cualquier sitio y en cualquier lugar donde haya una oportunidad para mejorar cada ser orgánico en relación con sus condiciones de vida orgánicas e inorgánicas. No vemos progresar ninguno de estos pequeños cambios hasta que la mano del tiempo marca el largo devenir de las eras, y tan imperfecta es nuestra visión de las eras geológicas pasadas que entonces solo vemos que las formas de vida son ahora diferentes de lo que eran antes.

He citado aquí, como suelo hacer, la *primera* edición de la obra maestra de Darwin. En ediciones posteriores aparecía la siguiente e interesante interpolación: «Se puede decir *metafóricamente* que la selección natural se hace a diario y cada hora...» (la cursiva es mía). Cabría pensar que «Se puede decir...» es bastante prudente. Pero en 1866 Darwin recibió una carta de Wallace, codescubridor de la selección natural, sugiriéndole que era completamente necesaria una cautela aún mayor para prevenir las malas interpretaciones.

> Querido Darwin, tantas veces me ha golpeado la total incapacidad de numerosas personas inteligentes para ver claramente los efectos necesarios y automáticos de la Selección Natural que me veo obligado a sugerir que el término mismo y su forma de ilustrarlo, aunque clara y bella para muchos de nosotros, no

son los mejores para hacerla llegar al público naturalista en general.

Wallace continuó citando a un autor francés llamado Janet, que evidentemente era, a diferencia de Wallace y Darwin, un individuo profundamente obtuso:

> Compruebo que él considera su punto débil el hecho de que usted no ve que «pensamiento y dirección son esenciales para la acción de la Selección Natural». La misma objeción ha sido planteada muchas veces por sus principales oponentes y yo la he podido escuchar con la misma frecuencia dirigida a mí. Ahora pienso que procede casi por completo de su elección del término Selección Natural, y su comparación continua con los efectos de la selección por el hombre, y también por su tendencia a personificar frecuentemente la naturaleza con términos como «selecciona» o «prefiere», etc., etc. Para unos pocos esto queda tan claro como la luz del día y es maravillosamente sugerente, pero para muchos otros constituye un obstáculo en el camino. Me gustaría, por lo tanto, sugerirle la posibilidad de evitar esta fuente de errores en su gran trabajo y también en futuras ediciones de *El origen*, y creo que se puede hacer sin dificultad y muy eficientemente adoptando el término de Spencer... «Supervivencia del más adaptado». Este término es la expresión llana del **hecho**; «Selección Natural» es una expresión metafórica de ese hecho...

Wallace tenía algo de razón. Desafortunadamente la expresión de Spencer «supervivencia del más adaptado» plantea por sí misma problemas que Wallace no pudo prever y en los que no voy a entrar aquí. A pesar de la advertencia de Wallace, prefiero seguir la estrategia de Darwin e introducir la selección natural a través de la domesticación y la selección artificial. Me gusta pensar que el señor Janet podría no haber tenido razón esta vez. Pero yo también tengo otro motivo para seguir la pista de Darwin, y es una buena razón. La prueba final de una hipótesis científica es el experimento. Y experimento significa específicamente que uno no espera a que la naturaleza haga algo mientras se observa pasivamente para ver qué se correlaciona con qué. Uno va al sitio y *hace* algo. Uno *manipula*. Uno *cambia* algo de forma sistemática y compara el resultado con un elemento de «control» que no tiene ese cambio, o uno lo compara con un cambio diferente.

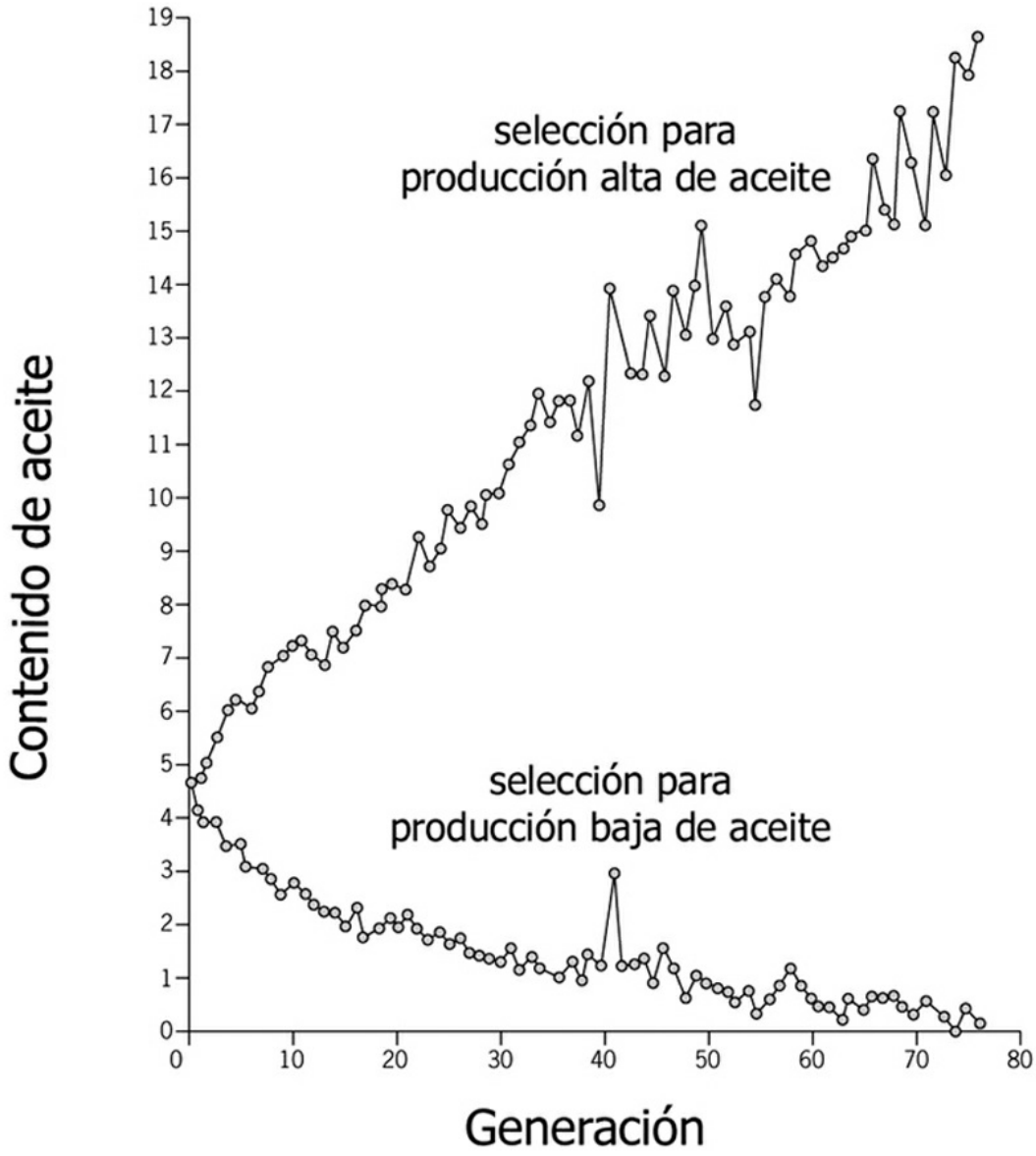
La interferencia experimental tiene una importancia enorme porque sin ella uno nunca puede estar seguro de que la correlación que observa no tiene un significado causal. Esto se puede ilustrar con la denominada «falacia de los relojes de iglesia». Los relojes de las torres de dos iglesias vecinas dan las horas, pero el de San A las da un poco antes que el de San B. Un visitante de Marte, dándose cuenta, podría inferir que el sonido de San A *causó* que San B comenzara a sonar. Nosotros sabemos que no es así, pero como experimento la única prueba real de la hipótesis sería hacer sonar San A a intervalos *aleatorios* en lugar de una vez cada hora. La predicción del marciano (que sería invalidada en este caso, por supuesto) es que el reloj de San B sonaría inmediatamente después del de San A. Solo la manipulación experimental puede determinar si una correlación observada indica realmente causalidad.

Si nuestra hipótesis es que la supervivencia no aleatoria de la variación genética aleatoria tiene consecuencias evolutivas importantes, la prueba *experimental* de la hipótesis tendría que ser una intervención humana deliberada. Vayamos ahí y *manipulemos* las variantes que sobreviven y las que no. Vayamos ahí y *elijamos,* como criadores humanos, qué tipo de individuos consiguen reproducirse. Y eso, por supuesto, *es* selección artificial. La selección artificial no es una *analogía* de la selección natural. La selección artificial constituye una prueba *experimental* —en contraposición a observacional— verdadera de la hipótesis de que la selección causa cambio evolutivo.

La mayoría de los ejemplos conocidos de selección artificial —por ejemplo, la creación de varias razas de perros— se observan con la perspectiva de la historia mejor que como pruebas intencionales de predicciones bajo condiciones experimentalmente controladas. Pero se han hecho experimentos adecuados y los resultados siempre han sido como se esperaba a partir de los más anecdóticos obtenidos en perros, coles y girasoles. Veamos un ejemplo típico, uno especialmente bueno porque los agrónomos de la Estación Experimental de Illinois comenzaron el experimento hace bastante tiempo, en 1986 (Generación 1 en el gráfico). El diagrama muestra el contenido de aceite en las mazorcas de maíz de dos líneas diferentes seleccionadas artificialmente, una seleccionada para una alta producción de aceite y la otra para una baja producción. Este es un experimento real porque estamos comparando los resultados de dos manipulaciones o intervenciones deliberadas. Evidentemente la diferencia

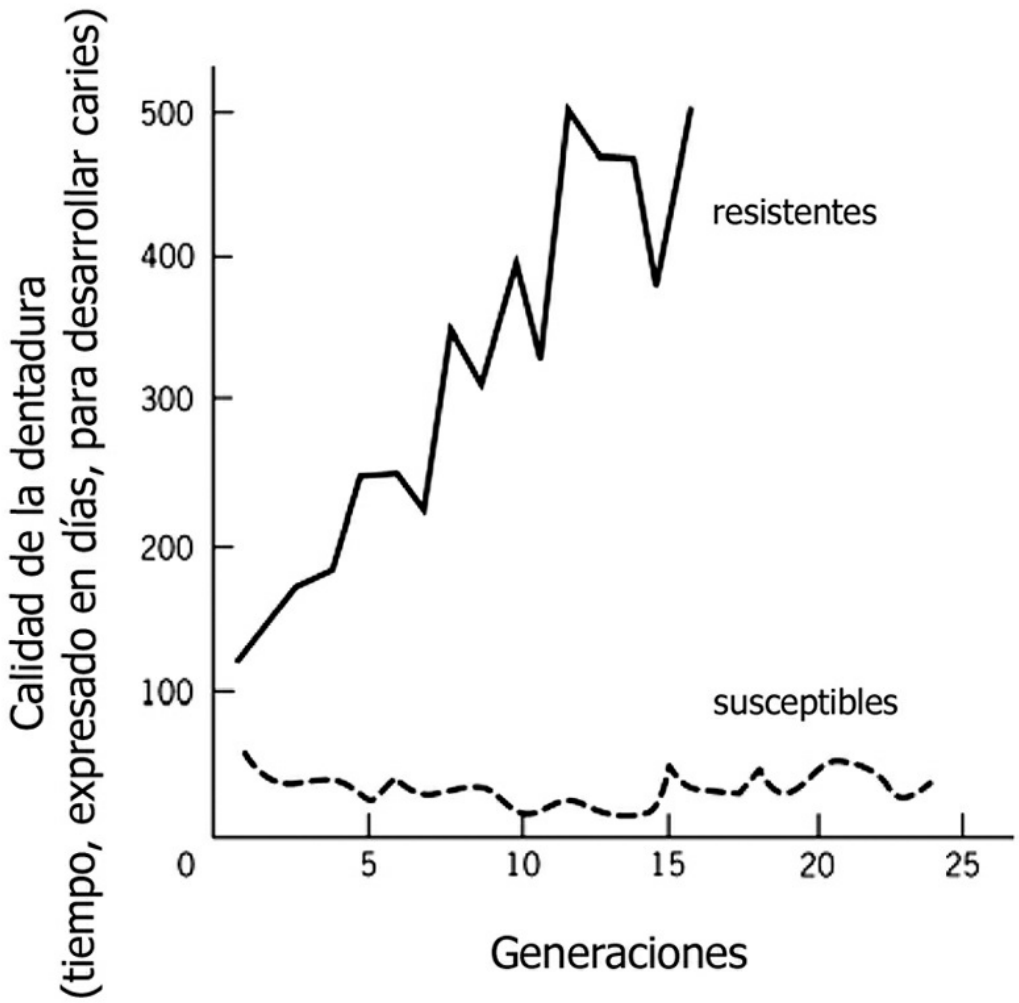
es dramática y sigue creciendo. No obstante, da la impresión de que las tendencias de aumento y de descenso llegarán a estabilizarse en algún momento: la línea de baja producción porque no se puede bajar de cero contenido en aceite, y la línea de alta producción por razones similares.

Veamos ahora una demostración de laboratorio más avanzada del poder de la selección artificial, que es instructiva en otro sentido.



Dos líneas de maíz seleccionadas para alto y bajo contenido de aceite

Imagen 9



Dos líneas de ratas seleccionadas para alta y baja resistencia al deterioro dental

Imagen 10

El diagrama nos muestra unas diecisiete generaciones de ratas, seleccionadas artificialmente para resistir el deterioro de los dientes. La medida que se dibuja es el tiempo, en días, que las ratas estuvieron sin caries. Al principio del experimento, el periodo típico sin deterioro era de unos cien días. Después de solo una docena de generaciones de selección sistemática contra la caries, el periodo sin deterioro llega a ser cuatro veces más largo, o incluso más. Una vez más, una línea independiente había sido seleccionada para evolucionar en la dirección opuesta: en este caso, los experimentos seleccionaron sistemáticamente la susceptibilidad al deterioro dental.

El ejemplo ofrece una oportunidad de empezar a pensar desde el principio sobre la selección natural. De hecho, esta discusión sobre los dientes de rata será la primera de tres excursiones hacia el interior de la selección natural genuina, para la que ya contamos con el equipo necesario. En las otras dos, como con las ratas, visitaremos de nuevo algunas criaturas que ya conocimos a lo largo del «camino de rosas» de la domesticación: los perros y las flores.

DIENTES DE RATA

Si es tan fácil para la selección artificial mejorar los dientes de las ratas, ¿por qué la selección natural hizo un trabajo tan pobre inicialmente? Es muy probable que no haya un beneficio en el deterioro de los dientes. ¿Por qué, si la selección artificial es capaz de reducirlo, no hizo lo mismo la selección natural hace mucho tiempo? Se me ocurren dos respuestas, ambas instructivas.

La primera respuesta es que la población original que usaron los seleccionadores humanos como materia prima no estaba formada por ratas salvajes, sino por ratas blancas domesticadas y criadas para el laboratorio. Se podría decir que las ratas de laboratorio están mimadas, como los humanos modernos, blindadas ante el afilado borde de la selección natural. La tendencia genética al deterioro dental reduciría significativamente la perspectiva de reproducción en el mundo salvaje, pero no supondría diferencia alguna en una colonia de laboratorio, donde la vida es fácil y la decisión de quién se aparea y quién no la toman los humanos, sin ningún interés para la supervivencia.

Esa es la primera respuesta a la pregunta. La segunda respuesta es más interesante, ya que enseña una lección importante sobre la selección natural, así como sobre la selección artificial. Es la lección de los compromisos, y ya hemos llamado la atención sobre ello cuando hablamos de la estrategia de polinización de las plantas. No hay nada gratuito, todo tiene un precio. Puede parecer obvio que el deterioro dental debe ser evitado a cualquier precio y yo no dudo que la caries dental acorta significativamente la vida de las ratas. Pero pensemos por un momento en lo que debe ocurrir para incrementar la resistencia al deterioro dental. No

conozco los detalles, pero estoy seguro de que es costoso y eso es todo lo que tengo que suponer. Imaginemos que se consigue aumentando el grosor de la pared del diente y que esto requiere una cantidad extra de calcio. No es imposible encontrar calcio extra, pero debe venir de algún sitio y no es gratuito. El calcio (o el recurso limitado que sea) no se encuentra flotando en el aire de alrededor. Tiene que entrar en el cuerpo a través de la comida y es potencialmente útil para otras partes además de para los dientes. El cuerpo tiene algo que podríamos llamar «economía del calcio». El calcio se necesita en los huesos y se necesita para la leche. (Estoy asumiendo que es calcio de lo que estamos hablando. Incluso si no fuera calcio debe de haber algún otro recurso costoso y escaso, y el argumento funcionaría también). Una rata con fuerza extra en los dientes podría *tender* a vivir más tiempo que una rata con los dientes podridos, siendo todo lo demás igual. Pero lo demás no es igual, porque el calcio necesario para fortalecer los dientes tiene que venir de algún sitio, por ejemplo, de los huesos. Un individuo rival cuyos genes no le predispusieran a tomar calcio de los huesos podría vivir más tiempo debido a sus huesos superiores y a pesar de sus dientes. O el individuo rival podría estar mejor cualificado para sacar adelante a las crías porque produce una leche más rica en calcio. Como a los economistas les gusta decir, citando a Robert Heinlein, no hay comida gratis. Mi rata es hipotética, pero se puede decir que, por razones económicas, debe de haber algo así como una rata cuyos dientes sean *demasiado* perfectos. La perfección en un departamento debe comprarse en forma de sacrificio en otro departamento.

La lección se aplica a todas las criaturas vivas. Podemos esperar que los cuerpos estén bien equipados para sobrevivir, pero eso no implica que deban ser perfectos en un aspecto concreto. Un antílope podría correr más rápido y tener más posibilidades de escapar de un leopardo si sus patas fuesen más largas. Pero un antílope con patas más largas, aunque podría estar mejor equipado que un rival para superar a un depredador, tendría que pagar por sus patas largas en algún otro departamento de la economía del cuerpo. Los materiales que se necesitan para fabricar el hueso y el músculo extra en las patas más largas tienen que ser tomados de algún otro sitio, por lo que el individuo con patas más largas sería más propenso a morir por razones diferentes a la depredación. O incluso a causa de la propia depredación, porque, aunque sus patas más largas pudieran correr más deprisa estando intactas, también tenderían a romperse con más

facilidad, en cuyo caso no podría correr de ninguna forma. Un cuerpo es un mosaico de compromisos. Volveré sobre esto en el capítulo dedicado a la carrera armamentista.

Lo que ocurre en la domesticación es que los animales se aíslan artificialmente de muchos de los riesgos que acortan las vidas de los animales salvajes. Una vaca lechera con pedigrí puede producir cantidades prodigiosas de leche, pero sus pesadas y oscilantes ubres impedirían seriamente cualquier intento de huir de un león. Los caballos purasangre son corredores magníficos, pero sus patas son propensas a sufrir daños durante las carreras, especialmente en los saltos, lo que sugiere que la selección artificial les ha llevado a un extremo que no habría tolerado la selección natural. Aún más, los purasangre prosperan gracias a una dieta rica que proporcionan los humanos. Mientras los ponis nativos de Bretaña, por ejemplo, subsisten solo con pasto, los caballos de carreras no se desarrollan a menos que se les alimente con una dieta mucho más rica de cereales y suplementos —que no encontrarían en la naturaleza—. Volveré de nuevo sobre estos temas en el capítulo de la carrera armamentista.

DE NUEVO LOS PERROS

Tras alcanzar finalmente el tema de la selección natural, podemos volver al ejemplo de los perros para obtener otras lecciones importantes. Dije que son lobos domesticados, pero tengo que aclararlo a la luz de una fascinante teoría sobre la evolución del perro, que ha sido articulada de forma muy clara por Raymond Coppinger. La idea es que la evolución del perro no fue solo una cuestión de selección artificial. Al menos tan importante fue la adaptación de los lobos a las costumbres del hombre por selección natural. Gran parte de la domesticación inicial del perro fue *auto*domesticación, mediada por la selección natural, no artificial. Mucho antes de que pusiéramos nuestras manos en los cinceles de la caja de herramientas de la selección artificial, la selección natural ya había esculpido los lobos para crear «perros callejeros» autodomesticados sin la intervención humana. Más tarde los humanos adoptaron a estos perros callejeros y los transformaron, por separado y exhaustivamente, en el arco

iris de razas que hoy honran (si «honrar» es la palabra) Crufts [16] y otros espectáculos parecidos destinados a ensalzar los logros y la belleza (si «belleza» es la palabra) caninos.

Coppinger señala que cuando los animales domésticos se liberan y viven en libertad durante muchas generaciones, normalmente vuelven a algo parecido a su antepasado salvaje. Cabría esperar, por tanto, que los perros asilvestrados se convirtieran en algo semejante a lobos. Pero eso no ocurre. Los perros asilvestrados parecen convertirse en los habituales «perros callejeros» —perros sin dueño— que deambulan alrededor de los asentamientos humanos por todo el Tercer Mundo. Este hecho refuerza la creencia de Coppinger de que los perros sobre los que los humanos empezaron a trabajar ya no eran lobos. Ya se habían transformado por sí mismos en perros: perros callejeros, perros sin dueño, quizá dingos.

Los lobos auténticos son cazadores en grupo. Los perros callejeros son carroñeros que frecuentan vertederos y cubos de basura. Los lobos también buscan carroña, pero por su temperamento no están preparados para buscar basura humana debido a su gran «distancia de huida». Mientras un animal se alimenta, podemos medir su distancia de huida observando cuánto nos deja acercarnos antes de huir. Para una especie dada en una situación dada, habrá una distancia de huida óptima en algún punto entre demasiado arriesgado o temerario, en el extremo cercano, y demasiado huidizo o reacio al riesgo, en el extremo lejano. Los individuos que huyen demasiado tarde cuando el peligro amenaza tienen mayor riesgo de morir por causa de ese mismo peligro. Aunque es menos obvio, también existe la opción de huir demasiado pronto. Los individuos que son muy huidizos nunca terminan una comida, porque escapan a la primera señal de peligro en el horizonte. Para nosotros es fácil infravalorar los peligros de ser demasiado reacios al riesgo. Nos sorprende ver cebras y antílopes que pastan tranquilamente a plena vista de los leones, mientras apenas mantienen una breve mirada sobre ellos. Nos sorprende porque nuestra propia aversión al riesgo (o la de nuestro guía del safari) nos obliga a permanecer dentro del Land Rover aun cuando no haya razón para pensar que hay un león en kilómetros a la redonda. Esto ocurre porque no tenemos nada que utilizar contra nuestro miedo. Vamos a conseguir nuestra comida completa al volver al albergue del safari. Nuestros antepasados salvajes habrían sentido mucha más simpatía por la capacidad de asumir riesgos de las cebras. Como las cebras, ellos tenían que

mantener un equilibrio entre el riesgo de ser comidos y el riesgo de no comer. Seguro que el león puede atacar; pero, dependiendo del tamaño de tu grupo, las posibilidades indican que lo normal es que cojan a otro miembro de tu manada antes que a ti. Y morirás de todas formas de hambre o de sed si no te aventuras nunca en los terrenos donde hay alimento o bajas al pozo de agua. Es la misma lección del compromiso que ya hemos visto antes, dos veces [17].

La letra pequeña de esta discusión es que el lobo salvaje, como cualquier otro animal, tendrá una distancia de huida óptima, bien equilibrada —y potencialmente flexible—, que lo sitúe entre demasiado valiente y demasiado huidizo. La selección natural trabajará con la distancia de huida desplazándola en un sentido o en el otro si las condiciones cambian a lo largo del tiempo evolutivo. Y si de repente aparece una nueva y abundante fuente de comida en forma de cubos de basura en las aldeas, el punto óptimo se va a desplazar hacia el extremo corto de la distancia de huida, en la dirección de resistirse a la huida mientras se disfruta de este nuevo botín.

Podemos imaginar lobos salvajes hurgando en un cubo de basura a las afueras de una aldea. La mayoría de ellos, temerosos de que los hombres les arrojen piedras y lanzas, tienen una distancia de huida muy alta. Corren buscando la seguridad del bosque tan pronto como un humano aparece a lo lejos. Pero unos pocos individuos, por azar genético, resultan tener una distancia de huida ligeramente más corta que la media. Su disposición a asumir mayores riesgos —son valientes, digamos, pero no temerarios— les proporciona más comida que a sus rivales más reacios al riesgo. Según pasan las generaciones, la selección natural favorece una distancia de huida más corta hasta justo antes de alcanzar el punto en el que los lobos se encuentran realmente en peligro por las piedras que lanzan los humanos. La distancia óptima de huida se ha desplazado debido a la nueva fuente de comida disponible.

Algo parecido a este acortamiento evolutivo de la distancia de huida fue, según Coppinger, el primer paso en la domesticación del perro, y se logró por selección natural, no por selección artificial. La disminución de la distancia de huida es una medida conductual de lo que podría llamarse un aumento de la docilidad. En este estadio del proceso, los humanos no estaban seleccionando deliberadamente a los individuos más dóciles para su reproducción. En este estadio las únicas interacciones entre los

humanos y estos perros incipientes eran hostiles. Si los perros se estaban domesticando, era una autodomesticación, no una domesticación deliberada efectuada por personas. La domesticación deliberada vendría más tarde.

Podemos hacernos una idea de cómo la docilidad, o cualquier otra cosa, puede ser esculpida —natural o artificialmente— a través de un fascinante experimento de la época actual sobre la domesticación de los zorros plateados rusos para su utilización en el comercio de pieles. Es doblemente interesante por las lecciones que nos enseña, al margen de lo que Darwin sabía, sobre el proceso de domesticación, sobre los «efectos colaterales» de la cría selectiva, y sobre el parecido, que Darwin comprendía bien, entre la selección artificial y la natural.

El zorro plateado es solo una variante de color, valorada por su preciosa piel, del familiar zorro rojo, *Vulpes vulpes*. El genetista ruso Dimitri Belyaev había sido contratado para dirigir una granja de zorros en los años cincuenta. Más tarde fue despedido porque su genética científica chocaba con la ideología anticientífica de Lysenko, el biólogo charlatán que se las arregló para convencer a Stalin y hacerse con el control, arruinando toda la genética y la agricultura soviéticas durante unos veinte años. Belyaev mantuvo su pasión por los zorros y por la verdadera genética —al margen de Lysenko—, y pudo más tarde retomar sus estudios en ambos campos como director del Instituto de Genética en Siberia.

Los zorros salvajes son delicados de manejar, y Belyaev decidió deliberadamente criarlos selectivamente para hacerlos más dóciles. Como cualquier otro criador de animales o plantas de su época, el método era explotar la variación natural (la ingeniería genética de nuestros días) y elegir, para criar, a aquellos machos y hembras que estuvieran más cerca del ideal que buscaba. Al seleccionar la docilidad, Belyaev podría haber elegido cruzar aquellos individuos que le resultasen más atractivos o que le miraran con expresiones faciales más cariñosas. Eso podría haber tenido el efecto deseado sobre la docilidad de generaciones futuras. Sin embargo, fue más sistemático y utilizó una medida que se acercaba mucho a la «distancia de huida» que mencioné en relación con los lobos salvajes, pero adaptada a los cachorros. Belyaev y sus colegas (y sucesores, ya que el programa experimental continuó después de su muerte) sometieron a los cachorros de zorro a pruebas estandarizadas en las que un investigador

ofrecía a un cachorro comida en la mano mientras intentaba cogerlo y acariciarlo. Los cachorros fueron clasificados en tres categorías. Los cachorros de la Clase III eran aquellos que huían o mordían a la persona. Los cachorros de la Clase II se dejaban tocar, pero no mostraban una respuesta positiva hacia los investigadores. Los cachorros de la Clase I, los más dóciles, se aproximaban a los cuidadores moviendo sus colas y gimoteando. Cuando los cachorros crecían, los investigadores apareaban sistemáticamente solo a los de esta clase.

Después de solo seis generaciones de esta cría selectiva por docilidad, los zorros habían cambiado tanto que los investigadores se sintieron obligados a crear una nueva categoría, la clase «élite domesticada», que estaba «ávida de establecer contacto con los humanos, lloriqueando para atraer la atención y olisqueando y lamiendo como perros a los cuidadores». Después de diez generaciones de cría selectiva, el 18% pertenecía a la «élite»; tras veinte generaciones, el 35%; y pasadas entre treinta y treinta y cinco generaciones, los individuos de la «élite domesticada» constituían entre el 70 y el 80% de la población experimental.

Estos resultados quizá no sean demasiado sorprendentes, excepto por la espectacular magnitud y velocidad del efecto. Treinta y cinco generaciones pasarían inadvertidas para la escala geológica de tiempo. Sin embargo, aún más interesantes son los efectos colaterales inesperados de la cría selectiva para la docilidad. Son realmente fascinantes y ciertamente no previstos. Darwin, el amante de los perros, estaría encantado. Los zorros dóciles no solo se comportaban como perros domésticos, sino que se parecían a ellos. Perdieron su pelaje de zorro y adquirieron un moteado blanco y negro, como los border collies. Sus agudas orejas de zorro fueron reemplazadas por orejas caídas de perro. Sus colas se curvaron hacia arriba en la punta, como las de un perro, en lugar de inclinarse hacia abajo como la cola típica de un zorro. Las hembras entraban en celo cada seis meses, como las perras, y no una vez al año, como las zorras. Según Belyaev, incluso sonaban como perros.

Belyaev con sus zorros, cada vez más dóciles y parecidos a los perros

Imagen 11

Estas características caninas eran efectos colaterales. Belyaev y su equipo no los buscaban deliberadamente, solo buscaban la docilidad. Esas otras características de perro parecían venir agarradas a los faldones de los genes de la docilidad. Esto no sorprende a los genetistas. Ellos reconocen un fenómeno muy difundido llamado «pleiotropía» por el que los genes tienen más de un efecto, aparentemente no conectados. La clave está en la palabra «aparentemente». El desarrollo embrionario es un asunto complicado. Cuanto más aprendemos de los detalles, ese «aparentemente

no conectados» se convierte en «conectados por una ruta que ahora entendemos, pero que no entendíamos antes». Presumiblemente, los genes de las orejas caídas y las capas moteadas están pleiotrópicamente ligados a los genes de la docilidad, en los zorros y en los perros. Esto ilustra un punto importante sobre la evolución. Cuando observamos una característica de un animal y nos preguntamos cuál es su valor darwiniano de supervivencia, podemos estar haciendo la pregunta equivocada. Podría ser que la característica que hemos elegido no sea la que importa. Puede haber «llegado» arrastrada en la evolución por alguna otra característica a la que estuviera pleiotrópicamente ligada.

La evolución del perro, por tanto, y si Coppinger está en lo cierto, no es solo una cuestión de selección artificial, sino una complicada mezcla de selección natural (que predominó en las primeras etapas de la domesticación) y selección artificial (que apareció en escena más recientemente). La transición habría sido fluida, lo que de nuevo enfatiza la similitud —tal como Darwin reconoció— entre la selección artificial y la selección natural.

DE NUEVO LAS FLORES

Trasladémonos ahora, en la tercera de nuestras incursiones en la selección natural, a las flores y los polinizadores, y veamos algo del poder de la selección natural dirigiendo la evolución. La biología de la polinización nos proporciona algunos hechos asombrosos y el punto más admirable se alcanza con las orquídeas. No sorprende que Darwin fuese tan entusiasta de ellas; no sorprende tampoco que escribiera el libro que mencioné. Algunas orquídeas, como las de Madagascar que encontramos antes, producen néctar, pero otras han dado con una forma de sortear los costes de alimentar a los polinizadores, engañándolos. Hay orquídeas que se parecen a abejas hembra (o moscas o avispas) lo suficiente como para engañar a los machos para que intenten copular con ellas. Cuanto más se parezcan a las hembras de una especie de insectos, mejor servirán los machos de esa especie como «balas mágicas», yendo de flor en flor de una sola especie de orquídeas. Incluso si la orquídea se parece a «una abeja cualquiera» en lugar de a una especie concreta de abeja, las abejas a las

que engañe servirán de «balas bastante mágicas». Si miramos de cerca una orquídea abeja o una orquídea mosca (véase página en color 5), podríamos decir que no es un insecto de verdad; pero nos lo creeríamos si solo echásemos un vistazo de refilón. E incluso, mirándolas de frente, diríamos que esa orquídea se parece más a una orquídea abejorro que a una orquídea abeja. Los insectos tienen ojos compuestos que no son tan agudos como nuestros ojos de tipo cámara, y las formas y colores de las orquídeas que imitan a los insectos, con la ayuda de seductores aromas que recuerdan a los de las hembras, son más que capaces de engañar a los machos. Por cierto, es bastante probable que la imitación sea realzada cuando se ve en la banda del ultravioleta, para la cual nosotros somos ciegos.

La llamada «orquídea araña», *Brassia* (página en color 5[k]), logra la polinización mediante un tipo diferente de engaño. Las hembras de varias especies de la avispa solitaria («solitaria» porque no vive socialmente en grandes nidos como las conocidas plagas de otoño, llamadas «chaquetas amarillas» por los americanos) capturan arañas, les clavan el aguijón para paralizarlas y ponen sus huevos dentro, proporcionando a sus larvas un suministro vivo de comida. Las orquídeas araña se parecen a las arañas lo suficiente como para engañar a las avispas hembra y que intenten clavarles el aguijón. En el proceso recogen polinia —masas de granos de polen producidos por las orquídeas—. Cuando se trasladan para picar a otra orquídea araña, la polinia se transfiere. Por cierto, no puedo resistirme a añadir el caso exactamente opuesto de la araña *Epicadus heterogaster,* que se asemeja a una orquídea. Los insectos vienen a la «flor» en busca de néctar y son devorados de inmediato por ella.

Algunas de las más sorprendentes orquídeas que practican este truco de seducción se encuentran en Australia occidental. Varias especies del género *Drakea* son conocidas como «orquídeas martillo». Cada especie tiene una relación singular con una especie en particular de avispa del tipo llamado *thynnid*. Parte de la flor tiene un cierto parecido con un insecto, y consigue así engañar a la avispa macho para que intente aparearse con ella. Hasta ahora, en mi descripción, la *Drakea* no es tan diferente de otras orquídeas que imitan a insectos. Pero la *Drakea* guarda un sorprendente truco bajo la manga: la «avispa» falsa está posada en el extremo de un «brazo» articulado, con un codo flexible. Se puede ver claramente la articulación en la fotografía (página en color 5 [g]). El movimiento de aleteo de la avispa al agarrar a la falsa hembra hace que el codo se doble y

la avispa es desplazada de arriba abajo, como si el «brazo» fuera un martillo, contra el otro lado de la flor —llamémosle el yunque—, donde tiene sus órganos sexuales. La polinia se desprende y se adhiere a la avispa, que en cierto momento se libera y huye volando, más triste pero aparentemente no más sabia: vuelve a repetir su actuación en otra orquídea martillo en donde ella y la polinia que lleva encima se restriegan contra el yunque, de tal forma que su carga encuentra el refugio al que iba destinada en los órganos femeninos de la flor. Mostré la secuencia de esta sorprendente actuación en una de mis Conferencias de Navidad para Niños de la Royal Institution y puede verse en la grabación de la conferencia llamada «El Jardín Ultravioleta».

En la misma conferencia hablé sobre las orquídeas *Coryanthes* de América del Sur, que consiguen polinizarse de una forma igual de sorprendente, pero muy diferente. Tienen también polinizadores especializados, no avispas, sino pequeñas abejas del grupo llamado *Euglossine*. Estas orquídeas no proporcionan néctar ni engañan a las abejas para que se apareen con ellas. En lugar de eso aportan una ayuda inestimable para las abejas macho, sin la cual no podrían atraer a las hembras reales.

Estas pequeñas abejas, que viven solo en Sudamérica, tienen un hábito extraño. Recolectan de forma muy elaborada sustancias fragantes, o al menos olorosas, que almacenan en unos contenedores especiales sujetos a sus agrandadas patas posteriores. En varias especies, estas sustancias olorosas pueden proceder de flores, de madera muerta o incluso de heces. Parece que la usan para reunir perfumes con los que atraer, o cortejar, a las hembras. Muchos insectos utilizan aromas particulares para atraer al sexo opuesto y la mayoría de ellos fabrican los perfumes en glándulas especiales. Las hembras de las polillas de la seda, por ejemplo, atraen machos desde una distancia sorprendente liberando un aroma único, que fabrican y que los machos detectan —en cantidades minúsculas a, literalmente, kilómetros de distancia— con sus antenas. En el caso de las abejas *Euglossine,* son los machos los que usan el aroma. Y, a diferencia de las polillas hembra, no sintetizan su propio perfume, sino que lo elaboran con ingredientes olorosos que recogen y mezclan cuidadosamente al modo de los maestros perfumeros. Cada especie mezcla un cóctel

característico a base de sustancias suministradas solo por flores de especies concretas del género de orquídeas *Coryanthes*. El nombre común de las abejas *Euglossine* es «abejas de las orquídeas».

Qué imagen tan intrincada de la dependencia mutua. Las orquídeas necesitan a las abejas *Euglossine* por la habitual razón de la «bala mágica». Y las abejas necesitan a las orquídeas por la menos obvia razón de que no pueden atraer a la hembras sin sustancias que resulta imposible, o al menos demasiado difícil, encontrar excepto a través de los buenos servicios de estas orquídeas. Pero la forma en que se consigue la polinización es aún más extraña y superficialmente hace que la abeja parezca más una víctima que un socio con el que se coopera.

Una abeja *Euglossine* macho es atraída hacia las orquídeas por el olor de las sustancias que necesita para fabricar sus perfumes sexuales. Se posa sobre el aro de la cazoleta y comienza a restregar el ceroso perfume contra los contenedores especiales de aroma de sus patas. Pero el aro de la cazoleta es resbaladizo para las patas, y aquí tenemos la explicación. La abeja cae dentro de la cazoleta, que está llena de un líquido en el que nada, y no puede subir de nuevo por sus deslizantes paredes. Solo hay una ruta de escape, y es a través de un agujero especial del tamaño de una abeja emplazado en un lateral de la cazoleta. (No es visible en las fotografías en color de la página 4). Es guiada mediante «escalones de piedra» hasta el agujero y comienza a arrastrarse a través de él. El paso es muy ajustado y se hace aún más estrecho cuando las «mandíbulas» (estas sí se pueden ver en la fotografía: recuerdan al mandril de un torno o de un taladro eléctrico) se contraen y la atrapan. Mientras la sujetan en su trampa le pegan dos polinias a su espalda. El pegamento tarda un poco en secar, después de lo cual las mandíbulas se separan dejándola libre para que se vaya volando con las polinias en su espalda. Todavía en busca de los preciosos ingredientes de su perfumería, la abeja aterriza sobre otra orquídea con cazoleta y el proceso se repite de nuevo. Esta vez, sin embargo, cuando la abeja se arrastra a través del agujero en la cazoleta, la polinia se desprende y fertiliza el estigma de la segunda orquídea.

La íntima relación entre las flores y sus polinizadores es un ejemplo maravilloso de lo que se llama «coevolución» —evolución entre varios—. La coevolución a menudo se da entre organismos que tienen algo que ganar del otro, asociaciones en las que cada lado contribuye con algo al otro y ambos se benefician de la cooperación. Otro precioso ejemplo es el

conjunto de relaciones que se han desarrollado en los arrecifes de coral, independientemente en muchas partes del mundo, entre peces más limpios y peces más grandes. Los limpiadores pertenecen a diferentes especies y algunos no son ni siquiera peces, sino camarones —un claro caso de evolución convergente—. La limpieza es una forma de vida bien establecida entre los peces del arrecife de coral, como cazar o pastar o comer hormigas entre los mamíferos. Los limpiadores se ganan la vida quitando parásitos del cuerpo de sus «clientes» de mayor tamaño. El beneficio de los clientes se ha demostrado al eliminar los limpiadores de un área experimental de un arrecife: se observa que la salud de muchas de las especies de peces se deteriora. He comentado el hábito de la limpieza en otros lugares, por lo que no me extenderé más aquí.

La coevolución también se da entre especies que no se benefician de la presencia de los otros, como los depredadores y las presas, o los parásitos y los anfitriones. Estos tipos de coevolución son denominados a veces «carreras armamentistas» y hablaré sobre ellos en el capítulo 12.

La naturaleza como agente seleccionador

Déjenme llevar este capítulo y el anterior hasta una conclusión. La selección —en forma de selección artificial por parte de los criadores humanos— puede convertir a un perro callejero en un pequinés, o una col silvestre en una coliflor, en unos pocos siglos. La diferencia entre dos razas cualesquiera de perros nos da una idea aproximada del cambio evolutivo que se puede conseguir en menos de un milenio. La siguiente cuestión que cabría preguntarse es ¿de cuántos milenios disponemos para explicar toda la historia de la vida? Si imaginamos la cantidad de diferencias que separan a un perro callejero de un pequinés, para las que solo hicieron falta unos pocos siglos de evolución, ¿cuánto más tiempo nos separa a nosotros del principio de la evolución o, digamos, del comienzo de los mamíferos? ¿O del momento en que los peces se desplazaron a la tierra? La respuesta es que la vida comenzó no hace unos siglos sino hace decenas de millones de años. La edad medida de nuestro planeta es de unos 4.600 millones de años o de unos 46 millones de siglos. El tiempo que ha pasado desde que el antepasado común de todos los mamíferos

actuales caminó sobre la tierra es de unos dos millones de siglos. Un siglo nos parece mucho tiempo. ¿Podemos imaginar dos millones de siglos, desde el principio hasta el final? El tiempo que ha pasado desde que nuestros primeros antepasados se arrastraron fuera del agua hasta la tierra es de unos 3,5 millones de siglos: dicho de otra forma, unas veinte mil veces el tiempo que tardaron en hacerse todas las razas diferentes —realmente diferentes— de perros, desde el antepasado común que comparten.

Trate de representar en su cabeza una imagen aproximada de las diferencias que hay entre un pequinés y un perro callejero. No estamos hablando aquí de medidas precisas: daría lo mismo pensar en las diferencias entre una raza cualquiera de perro y otra, porque en promedio se ha forjado el doble de cambio por selección artificial desde el antepasado común. Mantengamos en mente el orden de este cambio evolutivo y, luego, extrapolemos veinte mil veces esa distancia hacia el pasado. No resulta difícil aceptar que la evolución podría conseguir la cantidad de cambio que requiere transformar un pez en un humano.

Pero todo esto presupone que conocemos la edad de la Tierra y de varios puntos estratégicos en el registro fósil. Este es un libro sobre evidencias, por lo que no puedo solo dar fechas, sino que debo justificarlas. ¿Cómo conocemos realmente la edad de una roca concreta? ¿Cómo conocemos la edad de un fósil? ¿Cómo conocemos la edad de la Tierra? ¿Cómo, ya que estamos, sabemos la edad del Universo? Necesitamos relojes, y los relojes son el tema del siguiente capítulo.

4

SILENCIO Y TIEMPO LENTO

Si los negadores de la historia que dudanf del hecho de la evolución son ignorantes en biología, aquellos que piensan que el mundo comenzó hace menos de diez mil años son peor que ignorantes, son ingenuos hasta el punto de la perversidad. Están negando no solo los hechos de la biología, sino también los principios de la física, la geología, la cosmología, la arqueología, la historia y la química. Este capítulo versa sobre cómo averiguamos las edades de las rocas y los fósiles en ellas incrustados, y ofrece evidencias de que la escala de tiempo en la que la vida ha operado en este planeta se mide, no en miles de años, sino en miles de millones de años.

Recordemos que los científicos evolutivos están en la misma situación que los detectives que llegan tarde a la escena de un crimen. Para averiguar cuándo pasaron las cosas estamos obligados a analizar restos dejados por procesos dependientes del tiempo —relojes, en un sentido amplio—. Una de las primeras cosas que hace un detective cuando investiga un asesinato es pedir a un doctor o a un patólogo que estime la hora de la muerte. De esta información se deducen muchas cosas y en la ficción detectivesca se profesa una reverencia casi mística a la estimación del patólogo. La «hora de la muerte» es la línea de partida, un pivote inmóvil alrededor del cual giran especulaciones más o menos improbables. Pero esa estimación está sujeta a error, por supuesto, un error que puede medirse y que puede ser muy grande. El patólogo utiliza varios procesos dependientes del tiempo para estimar la hora de la muerte: el cuerpo se enfría a un ritmo característico, el rigor mortis aparece a una hora determinada, y así sucesivamente. Esos son los «relojes» más o menos aproximados con los que cuenta el investigador de un asesinato. Los relojes disponibles para el científico evolutivo son potencialmente mucho

más precisos —por supuesto en proporción a la escala de tiempo implicada, ¡no tienen precisión de una hora!—. La analogía con un reloj de precisión es más convincente para una roca del Jurásico en manos de un geólogo que para un cuerpo enfriándose en manos de un patólogo.

Los relojes fabricados por el hombre trabajan a escalas de tiempo que son muy cortas según los estándares de la evolución —horas, minutos, segundos— y los procesos dependientes del tiempo que utilizan son rápidos: el balanceo de un péndulo, el giro de un muelle de compensación en un reloj de cuerda, la oscilación de un cristal, la combustión de una vela, el vaciado de un recipiente con agua o arena, o la rotación de la Tierra (registrada en un reloj solar). Todos los relojes explotan algún proceso que se desarrolla a un ritmo sostenido y conocido. Un péndulo se balancea a un ritmo constante que depende de su longitud, pero no, al menos en teoría, de la amplitud del barrido o de la masa de la pesa del péndulo. Los relojes de pared funcionan uniendo un péndulo a un escape que hace avanzar una rueda dentada, paso a paso; la rotación se reduce entonces hasta la velocidad de rotación de las manecillas de las horas, de los minutos y de los segundos. Los relojes con muelles y rueda de compensación funcionan de forma similar. Los relojes digitales hacen uso del equivalente electrónico de un péndulo, que es la oscilación de ciertos tipos de cristales cuando se les suministra energía desde una batería. Los relojes de agua y los relojes de vela son mucho menos precisos, pero fueron útiles antes de la invención de los relojes que cuentan sucesos. No dependen de contar cosas, como hacen un reloj de péndulo o un reloj digital, sino de medir una determinada cantidad. Los relojes de sol son formas poco precisas de determinar la hora [18]. Pero la rotación de la Tierra, que es el proceso dependiente del tiempo en el que se basan, es precisa respecto a la escala de tiempo más lenta que llamamos calendario. Esto es así porque en esa escala de tiempo ya no es un reloj que mide (un reloj solar mide el ángulo cambiante que forma el Sol), sino un reloj que cuenta (ciclos de día y noche).

Los relojes que cuentan y miden están a nuestra disposición en la escala inmensamente lenta de tiempo de la evolución. Pero para investigar la evolución no necesitamos solo un reloj que nos diga la hora *actual*, como hace un reloj de sol o de pulsera. Necesitamos algo más parecido a un cronómetro que pueda ser *puesto a cero*. Nuestro reloj evolutivo necesita ser puesto a cero en algún momento para que podamos calcular el

tiempo transcurrido desde un momento inicial, para que nos dé, por ejemplo, la edad absoluta de algún objeto, como una piedra. Los relojes radiactivos que se utilizan para datar rocas ígneas (volcánicas) se ponen a cero en el momento en que se forma la roca por solidificación de la lava derretida.

Afortunadamente disponemos de una gran variedad de relojes naturales que se pueden poner a cero, lo que es muy positivo, porque permite utilizar algunos relojes para comprobar la precisión de otros. Mejor aún, estos relojes cubren un rango sorprendente de escalas de tiempo y los necesitamos porque las escalas de tiempo evolutivas se extienden a lo largo de seis u ocho órdenes de magnitud. Merece la pena explicar lo que esto quiere decir. Un orden de magnitud significa algo preciso. Un cambio de un orden de magnitud es una multiplicación (o división) por diez. Ya que utilizamos un sistema decimal [19], el orden de magnitud de un número es el número de ceros antes o después de la coma decimal. Así, un rango de ocho órdenes de magnitud implica cien millones. El segundero de un reloj rota sesenta veces más deprisa que la manecilla de los minutos y 720 veces más deprisa que la manecilla de las horas, de tal forma que las tres manecillas cubren un rango que es de menos de tres órdenes de magnitud. Esto es muy pequeño comparado con los ocho órdenes de magnitud que muestran nuestras rocas geológicas. Los relojes radiactivos también pueden utilizarse para escalas de tiempo cortas, incluso para fracciones de segundo; pero, para el propósito de la evolución, los relojes más rápidos que necesitamos son los que miden siglos o, como mucho, décadas. Este extremo rápido del espectro de los relojes naturales —los anillos de los árboles y la datación por carbono— es útil para usos arqueológicos y para estimar la edad de especímenes en la escala de tiempo corta que cubre la domesticación del perro o de la col. En el otro extremo de la escala necesitamos relojes naturales que puedan medir cientos de millones, incluso miles de millones, de años. Afortunadamente, la naturaleza nos ha proporcionado justo el repertorio de relojes que necesitamos. Y no solo eso, sus rangos de sensibilidad se solapan entre sí de tal forma que podemos utilizarlos para comprobar unos con otros.

LOS ANILLOS DE LOS ÁRBOLES

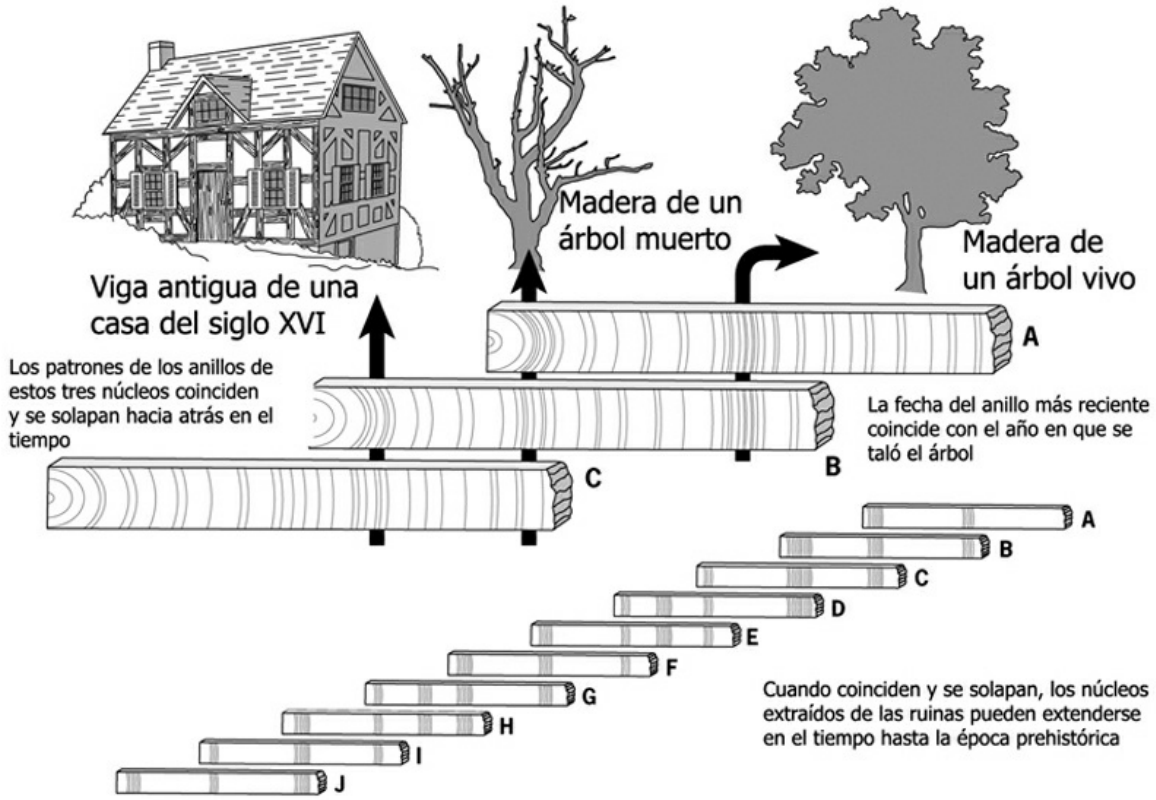
Un reloj de anillos de árboles se puede utilizar para datar un trozo de madera, por ejemplo, una viga en una casa Tudor, con una precisión sorprendente de un año. Veamos cómo funciona. Primero, como la mayoría de la gente sabe, se puede determinar la edad de un árbol recién caído contando los anillos de su tronco, asumiendo que el anillo más externo marca el presente. Los anillos representan el crecimiento diferencial en las distintas estaciones del año —invierno o verano, estación seca o estación húmeda— y son especialmente pronunciados en latitudes altas con fuerte diferencia estacional. Afortunadamente no hace falta cortar realmente el árbol para saber su edad. Se pueden observar los anillos sin matarlo, haciendo un pequeño agujero en medio del árbol y extrayendo una muestra del centro. Pero contar anillos no nos dice en qué siglo estaba viva la viga de la casa, o el mástil de nuestro barco vikingo. Si queremos averiguar la edad de la madera antigua, que lleva mucho tiempo muerta, necesitamos ser más sutiles. No contemos solo anillos, miremos al patrón de anillos gruesos y delgados.

La existencia de anillos se interpreta como ciclos estacionales de crecimiento rico y pobre, así que hay algunos años mejores que otros porque el tiempo varía de año en año: hay años de sequía que retrasan el crecimiento y años rebosantes de humedad que lo aceleran; hay años fríos y años calurosos, incluso años de terribles catástrofes como las causadas por El Niño o la erupción del Krakatoa. Los años buenos, desde el punto de vista del árbol, producen anillos más anchos que los años malos. Y el patrón de anillos anchos y estrechos en cualquier región, determinados por una secuencia particular de años buenos y malos, es suficientemente característico —una huella que etiqueta los años exactos en los que se fijaron los anillos—, reconocible de árbol a árbol.

Los dendrocronólogos miden anillos en árboles recientes en los que la fecha exacta de cada anillo se puede conocer contando hacia atrás desde el año en que el árbol fue talado. A partir de estas medidas reconstruyen una colección de referencia de patrones de anillos con los que se pueden comparar los patrones de anillos de una muestra arqueológica de madera cuya edad queremos conocer. Se podría conseguir un informe del tipo:

«Esta viga Tudor contiene una secuencia de anillos tipo que concuerda con una secuencia de la colección de referencia, que se sabe se taló entre los años 1541 y 1547. La casa fue construida, por tanto, después de 1547».

Todo esto está muy bien, pero no hay muchos árboles actuales que estuvieran vivos en la época Tudor, y mucho menos en la Edad de Piedra o antes. Hay algunos árboles —pinos erizo, secuoyas gigantes— que viven durante milenios, pero la mayoría de los que se utilizan para fabricar objetos de madera se talan normalmente antes de cumplir un siglo. Entonces, ¿cómo se construye una colección de referencia de anillos para tiempos anteriores, para tiempos tan lejanos que ni el pino erizo más viejo pudo haber conocido? Creo que ya han adivinado la respuesta. Solapamiento. Una cuerda fuerte puede tener cien metros de longitud y, sin embargo, ninguna fibra de las que la componen alcanza más de una fracción del total. En dendrocronología, para utilizar el principio de solapamiento se toman los patrones de referencia para árboles modernos cuya fecha se conoce. Después se identifica una huella de los anillos antiguos de los árboles modernos y se busca la misma huella en los anillos jóvenes de los árboles que llevan mucho tiempo muertos. A continuación se miran las huellas de los anillos más antiguos en esos árboles muertos hace mucho tiempo y se busca el mismo patrón en los anillos más jóvenes de árboles todavía más antiguos. Y así sucesivamente. Sería posible seguir encadenando el camino hacia atrás, en teoría a lo largo de millones de años, utilizando bosques petrificados, aunque, en la práctica, la dendrocronología solo se utiliza para escalas de tiempo arqueológicas que van hasta hace unos miles de años. Y lo más sorprendente sobre la dendrocronología es que, al menos teóricamente, puede tener una precisión de un año, incluso en bosques petrificados de hace 100 millones de años. Literalmente podríamos decir que *este* anillo de un árbol fósil del Jurásico apareció exactamente 257 años más tarde que *este* otro anillo de este otro árbol del Jurásico. Si hubiera suficientes bosques petrificados para encadenar con continuidad desde el presente, se podría decir que este árbol no solo es del Jurásico tardío: ¡estaba vivo exactamente en 151432657 a. C.! Lamentablemente no tenemos una cadena completa, y en la práctica la dendrocronología solo nos lleva hacia atrás unos 11.500 años. De todas formas es tentador pensar que, si pudiéramos encontrar suficientes bosques petrificados, estaríamos en condiciones de datar con precisión de un año en el rango de cientos de millones de años.



Cómo funciona la dendrocronología

Imagen 12

Los anillos de los árboles no son el único sistema que promete una precisión de un año. Las varvas son capas de sedimentos depositados en lagos glaciares. Como los anillos de los árboles, varían con las estaciones y de año en año, por lo que, teóricamente, se puede utilizar el mismo principio con el mismo nivel de precisión. Los arrecifes de coral presentan también anillos de crecimiento anual. Es fascinante que se hayan utilizado para determinar las fechas de los antiguos terremotos. También los anillos de los árboles, por cierto, nos informan sobre las fechas de los terremotos. La mayoría de los restantes sistemas de estimación de fechas de los que disponemos, incluidos todos los relojes radiactivos que utilizamos en escalas de decenas de millones, cientos de millones o miles de millones de años, son precisos solo dentro de un rango de error que es aproximadamente proporcional a la escala de tiempo a la que se refieren.

RELOJES RADIACTIVOS

Pasemos ahora a los relojes radiactivos. Hay muchos entre los que elegir y, como dije, afortunadamente cubren el rango que va de los siglos a los miles de millones de años. Cada uno tiene su margen de error, que normalmente es de un 1%. De manera que si queremos datar una roca que tiene miles de millones de años, debemos quedar satisfechos con un error de decenas de millones de años. Si queremos datar una roca de cientos de millones de años, debemos contentarnos con un error de millones. Para datar una roca que solo tenga decenas de millones de años debemos admitir un error de unos cientos de miles de años por encima o por debajo.

Para comprender cómo funcionan los ciclos radiactivos, primero necesitamos establecer qué se entiende por isótopo radiactivo. Toda la materia está formada por elementos, normalmente combinados químicamente con otros. Hay alrededor de cien elementos, algunos más si contamos los que solo se han detectado en el laboratorio, algunos menos si contamos solo los que se encuentran en la naturaleza. Ejemplos de estos elementos son el carbono, el hierro, el nitrógeno, el aluminio, el magnesio, el flúor, el argón, el cloro, el sodio, el uranio, el plomo, el oxígeno, el potasio y el estaño. La teoría atómica, que creo que todo el mundo acepta, incluso los creacionistas, nos dice que cada elemento tiene su propio átomo característico, que es la partícula más pequeña en la que se puede dividir un elemento sin que deje de ser ese elemento. ¿Qué aspecto tiene un átomo de, por ejemplo, plomo, cobre o carbono? Bien, ciertamente no se parece en nada al plomo, al cobre o al carbono. No se *parece* a nada porque es demasiado pequeño como para formar una imagen en la retina, incluso con un microscopio potentísimo. Podemos utilizar analogías o modelos para ayudarnos a visualizar un átomo. El modelo más famoso fue propuesto por el gran físico danés Niels Bohr. El modelo de Bohr, que está ahora algo anticuado, consiste en un sistema solar en miniatura. El papel del Sol lo desempeña el núcleo y a su alrededor orbitan los electrones, que representarían a los planetas. Como ocurre con el Sistema Solar, casi toda la masa del átomo está contenida en el núcleo («Sol») y casi todo el volumen está formado por el espacio vacío que separa los electrones («planetas») del núcleo. Cada electrón es pequeño en comparación con el núcleo, y el espacio entre ellos y el núcleo es enorme comparado con su

tamaño. Una analogía muy conocida representa al núcleo como una mosca en medio de un estadio deportivo. Los electrones de cada átomo están revoloteando en órbita alrededor de sus respectivas moscas, más pequeños que el más pequeño de los mosquitos, demasiado pequeños como para ser vistos en la misma escala que las moscas. Cuando miramos un bloque sólido de hierro o roca, lo que realmente estamos mirando es casi por completo espacio vacío. Parece y tiene un tacto sólido y opaco porque nuestros sistemas sensoriales y nuestros cerebros encuentran conveniente tratarlo como sólido y opaco. Es conveniente para el cerebro representar una roca como sólida porque nosotros no podemos atravesarla. «Sólido» designa nuestra forma de experimentar cosas que no podemos atravesar debido a las fuerzas electromagnéticas entre los átomos; «opaco» se refiere a la experiencia que tenemos de un objeto cuando la luz rebota en su superficie y no consigue atravesarlo.

En la formación de un átomo intervienen tres tipos de partículas, al menos según se plantea en el modelo de Bohr. El primero son los electrones, que acabamos de ver. Los otros dos, mucho más grandes que los electrones pero aún diminutos comparados con cualquier cosa que podamos imaginar o experimentar con nuestros sentidos, se llaman protones y neutrones y se encuentran en el núcleo. Ambos tienen casi el mismo tamaño. El número de protones está fijado para un elemento dado y es igual al número de electrones. Este número se llama «número atómico». Es una característica única de un elemento y no hay huecos en la lista de números atómicos —la famosa tabla periódica [20]—. Cada número de la secuencia se corresponde con exactamente un elemento y solo uno. El elemento con número atómico 1 es el hidrógeno; el 2 es el helio; el 3, el litio; el 4, el berilio; el 5, el boro; el 6, el carbono; el 7, el nitrógeno; el 8, el oxígeno, y así sucesivamente hasta los números altos, como el 92, que es el número atómico del uranio.

Los protones y los electrones tienen una carga eléctrica de signo opuesto —llamamos a una de ellas positiva y a otra negativa por convención—. Estas cargas son importantes cuando los elementos forman enlaces químicos entre sí, en su mayoría mediados por electrones. Los neutrones en un átomo están ligados con los protones en el núcleo. A diferencia de los protones, estos no tienen carga y no desempeñan ningún papel en las reacciones químicas. Los protones, neutrones y electrones de un elemento son exactamente los mismos que los de cualquier otro

elemento. No hay algo así como un protón con sabor a oro o un electrón con sabor a cobre o un neutrón con sabor a potasio. Un protón es un protón y lo que hace a un átomo de cobre ser cobre es que tiene exactamente veintinueve protones (y exactamente veintinueve electrones). Lo que normalmente pensamos como la naturaleza del cobre es una cuestión de química. La química es un baile de electrones. Es todo una cuestión de interacciones de átomos a través de sus electrones. Los enlaces químicos se rompen y rehacen fácilmente porque en las reacciones químicas solo se desprenden e intercambian electrones. Las fuerzas de atracción dentro del núcleo de un átomo son mucho más difíciles de romper. Esa es la razón por la que la «ruptura del átomo» tiene una fama tan intimidante —pero puede suceder, a diferencia de las reacciones químicas, en reacciones «nucleares», y los relojes radiactivos dependen de ellas—.

Los electrones tienen una masa insignificante, por lo que la masa total de un átomo, su «número de masa», es igual al número combinado de protones y neutrones. Normalmente es más del doble del número atómico, porque en el núcleo suele haber unos pocos neutrones más que protones. A diferencia del número de protones, el número de neutrones de un átomo no determina a un elemento. Los átomos de cualquier elemento pueden aparecer en diferentes versiones llamadas *isótopos*, que tienen diferente número de neutrones, pero siempre tienen el mismo número de protones. Algunos elementos como el flúor solo tienen un isótopo natural. El número atómico del flúor es 9 y su número de masa es 19, de lo que se deduce que tiene nueve protones y diez neutrones. Otros elementos tienen muchos isótopos. El plomo tiene cinco isótopos que se encuentran normalmente. Todos tienen el mismo número de protones (y de electrones), 82, que es el número atómico del plomo, pero los números de masa varían entre 202 y 208. El carbono tiene tres isótopos naturales. El más común es el carbono-12, con el mismo número de protones y neutrones: seis. Otro es el carbono-13, cuya corta vida impide que trabajemos con él, y también está el carbono-14, que es poco usual pero no tanto como para que no podamos datar con él muestras orgánicas relativamente jóvenes, como veremos más adelante.

Ahora veamos el siguiente hecho básico importante. Algunos isótopos son estables, otros son inestables. El plomo-202 es un isótopo inestable; el plomo-204, el plomo-206, el plomo-207 y el plomo-208 son isótopos estables. «Inestable» significa que los átomos se desintegran

espontáneamente —convirtiéndose en otra cosa— a un ritmo predecible aunque no en momentos predecibles. La predictibilidad del ritmo de desintegración es la clave de todos los relojes radiométricos. Otra palabra para «inestable» es «radiactivo». Hay varios tipos de desintegración radiactiva que ofrecen posibilidades para relojes útiles. Para nuestros propósitos no es importante entenderlas, pero las explicaré aquí para mostrar el magnífico nivel de detalle que han logrado los físicos trabajando en estos asuntos. Este detalle arroja una luz sarcástica sobre los intentos desesperados de los creacionistas de desestimar la evidencia de la datación radiactiva y mantener a la Tierra tan joven como Peter Pan.

Todos estos tipos de inestabilidad tienen que ver con los neutrones. En uno de estos tipos, un neutrón se convierte en un protón. Esto significa que el número de masa permanece igual (ya que los protones y los neutrones tienen la misma masa), pero el número atómico aumenta una unidad, de tal forma que el átomo se convierte en un elemento diferente, un paso más arriba en la tabla periódica. Por ejemplo, el sodio-24 se convierte en magnesio-24. En otro tipo de desintegración radiactiva ocurre exactamente lo contrario. Un protón se convierte en un neutrón. De nuevo el número de masa se mantiene, pero esta vez el número atómico disminuye una unidad y el átomo se transforma en el elemento que ocupa un lugar inferior en la tabla periódica. Existe un tercer tipo de desintegración radiactiva que tiene un resultado parecido. Un neutrón desviado colisiona con un núcleo y golpea a un protón, tomando su lugar. Una vez más, no hay cambio en el número de masa; como en el caso anterior, el número atómico disminuye una unidad y el átomo se convierte en el elemento inmediatamente anterior de la tabla periódica. Asimismo, hay un tipo más complejo de desintegración en la que el átomo expulsa una partícula llamada «alfa». Una partícula alfa consiste en dos protones y dos neutrones unidos. Esto significa que el número de masa disminuye en cuatro y el número atómico disminuye en dos. El átomo pasa a ser el elemento que está dos puestos debajo de él en la tabla periódica. Un ejemplo de desintegración alfa es el cambio del isótopo altamente radiactivo uranio-238 (con 92 protones y 146 neutrones) a torio-234 (con 90 protones y 144 neutrones).

Ahora nos acercamos al fondo de la cuestión. Todos los isótopos inestables o radiactivos se desintegran a su ritmo característico, que se conoce con precisión. Aún más, algunos de estos ritmos son mucho más

lentos que otros. La desintegración es siempre exponencial, lo que significa que, si se empieza con, digamos, cien gramos de isótopo radiactivo, no se da el caso de que una cantidad fija, por ejemplo diez gramos, se convierta en otro elemento en una cantidad de tiempo dada. En lugar de eso, una *proporción* fija de lo que queda se convierte en el segundo elemento. La medida habitual para el ritmo de desintegración es la «semivida». La semivida de un isótopo radiactivo es el tiempo que tardan en desintegrarse la mitad de sus átomos. La semivida es la misma independientemente de cuántos átomos se hayan desintegrado ya —esto es lo que significa la desintegración exponencial—. Podemos apreciar que, con estas divisiones sucesivas por la mitad, nunca sabremos cuándo ha finalizado el proceso. Sin embargo, es posible afirmar que, una vez transcurrido el tiempo suficiente —digamos diez semividas—, el número de átomos que queda es tan pequeño que, desde un punto de vista práctico, todo se ha acabado. Por ejemplo, la semivida del carbono-14 es de entre cinco mil y seis mil años. Para especímenes cuya antigüedad supere el intervalo entre cincuenta mil y sesenta mil años, la datación con carbono es inútil y necesitamos recurrir a un reloj más lento.

La semivida del rubidio-87 es de 49.000 millones de años. La semivida del fermio-244 es de 3,3 milisegundos. Estos asombrosos extremos sirven para ilustrar el enorme *rango* de relojes disponible. Aunque la semivida del carbono-15, de 2,4 segundos, es demasiado corta para responder a preguntas sobre la evolución, la del carbono-14, de 5.730 años, es del tamaño apropiado para datar en la escala arqueológica, y volveremos a ello enseguida. Un isótopo muy utilizado en la escala de tiempo evolutiva es el potasio-40, con una semivida de 1.260 millones de años, y lo voy a utilizar como ejemplo para explicar toda la idea general del reloj radiactivo. A menudo se le llama reloj de potasio-argón porque el argón-40 (un puesto más abajo en la tabla periódica) es uno de los elementos hacia los que se desintegra el potasio-40 (el otro es el calcio-40, una posición más arriba en la tabla periódica, y proviene de un tipo diferente de desintegración radiactiva). Si se empieza con cierta cantidad de potasio-40, después de 1.260 millones de años la mitad del potasio-40 se habrá desintegrado en argón-40. Esto es lo que significa la semivida. Después de otros 1.260 millones de años, la mitad de lo que quedaba (un cuarto del original) se habrá desintegrado, y así sucesivamente. De modo que imaginemos que empezamos con una cantidad de potasio-40 en un

espacio cerrado sin argón-40. Después de unos pocos cientos de millones de años, un científico llega a ese mismo espacio cerrado y mide las proporciones relativas de potasio-40 y argón-40. A partir de esta proporción —sin importar las cantidades absolutas implicadas—, conocida la semivida de la desintegración del potasio-40 y considerando que no había argón al principio, uno puede estimar el tiempo que ha pasado desde que comenzó el proceso —en otras palabras, desde que el reloj se puso «a cero»—. Debemos recordar que necesitamos saber la ratio entre los isótopos padre (potasio-40) e hijo (argón-40). Aún más, como vimos al principio de este capítulo, es necesario saber que nuestro reloj tiene la posibilidad de ser puesto a cero. Pero ¿qué significa hablar de que un reloj radiactivo se pone a cero? El proceso de cristalización nos ofrece una explicación.

Como todos los relojes radiactivos utilizados por los geólogos, la medición de tiempo mediante potasio-argón funciona solo con las llamadas rocas ígneas, cuyo nombre procede de la palabra «fuego» en latín. Las rocas ígneas se solidifican a partir del magma derretido subterráneo en el caso del granito y de la lava de los volcanes en el del basalto. Cuando las rocas fundidas se solidifican para dar lugar a granito o basalto, lo hacen formando cristales. Normalmente no son grandes y transparentes como los del cuarzo, sino demasiado pequeños como para verlos como cristales a simple vista. Los cristales son de varios tipos, y muchos de ellos, como algunas micas, contienen átomos de potasio. Entre ellos hay átomos del isótopo radiactivo potasio-40. Cuando un cristal acaba de formarse, en el momento en que se solidifica la roca fundida, hay potasio-40 pero no argón. El reloj se pone «a cero» en el sentido de que no hay átomos de argón en el cristal. A medida que pasan millones de años, el potasio-40 se va deshaciendo y, uno por uno, los átomos de argón-40 reemplazan a los de potasio-40 en el cristal. La cantidad acumulada de argón-40 es una medida del tiempo transcurrido desde la formación de la roca. Pero como ya he explicado antes, esta cantidad solo es significativa si se expresa como porcentaje de cambio entre potasio-40 y argón-40. Cuando se puso a cero el reloj, el porcentaje era de 100% a favor del potasio-40. Después de 1.260 millones de años, el porcentaje será de 50-50. Transcurridos otros 1.260 millones de años, la mitad del potasio-40 restante se habrá convertido en argón-40, y así sucesivamente. Las proporciones intermedias significan tiempos intermedios transcurridos

desde que se puso a cero el reloj de cristal. Por tanto, los geólogos, a partir del análisis de porcentajes de potasio-40 y argón-40 en un pedazo de roca ígnea extraído hoy, pueden determinar cuánto tiempo hace que la roca fundida se solidificó en cristal.

Las rocas ígneas contienen normalmente muchos isótopos radiactivos diferentes, no solo potasio-40. Un aspecto afortunado de la forma en que las rocas ígneas solidifican es que lo hacen de repente, de tal modo que *todos* los relojes de un mismo pedazo de roca se ponen a cero simultáneamente.

Solo las rocas ígneas proporcionan relojes radiactivos, pero los fósiles casi nunca se encuentran en las rocas ígneas. Los fósiles se forman en rocas sedimentarias como la piedra caliza o la piedra arenisca, que no son lava solidificada. Son capas de barro, de cieno o de arena que se han depositado gradualmente en el fondo del mar, de un lago o de un estuario. La arena o el barro se compactan con el tiempo y se endurecen como una roca. Los cadáveres que quedan atrapados en el barro pueden llegar a fosilizarse. Aun cuando solo una fracción de los cadáveres realmente fosilizan, las rocas sedimentarias son las únicas que contienen fósiles de los que merece la pena hablar.

Lamentablemente, las rocas sedimentarias no pueden datarse por radiactividad. Es presumible que las partículas individuales de lodo o de arena que llegan a formar las rocas sedimentarias contengan potasio-40 y otros isótopos radiactivos; por tanto, podría decirse que contienen relojes radiactivos, pero desafortunadamente estos relojes no se pueden utilizar porque no están puestos a cero de forma adecuada, o lo están en diferentes momentos. Las partículas de arena que se compactan para formar rocas sedimentarias podrían proceder de rocas ígneas, pero dichas rocas ígneas se habrían solidificado en momentos diferentes. Cada grano de arena tiene un reloj puesto a cero en un momento distinto, y ese momento ocurrió probablemente mucho antes de que se formara la roca sedimentaria atrapando al fósil que tratamos de datar. Así pues, desde el punto de vista del cómputo del tiempo, la roca sedimentaria es un desastre. No puede ser utilizada. Lo mejor que podemos hacer —y es realmente lo mejor— es usar las fechas de las rocas ígneas que encontremos cerca de la roca sedimentaria o incrustadas dentro de ella.

Para datar un fósil no se necesita encontrarlo emparedado entre dos bloques de roca ígnea —aunque esta es una buena forma de ilustrar el principio—. El método realmente utilizado es más refinado. En toda la extensión del planeta existen capas similares reconocibles de roca sedimentaria. Mucho antes de que se descubriera la datación radiactiva, estas capas habían sido identificadas y habían recibido nombres como Cámbrico, Ordovícico, Devónico, Jurásico, Cretáceo, Eoceno, Oligoceno o Mioceno. Los sedimentos del Devónico se reconocen con claridad como devónicos, no solo en Devon (el condado del suroeste de Inglaterra del que recibe su denominación), sino también en otras partes del mundo. Son reconociblemente similares entre sí y el catálogo de sus fósiles es semejante. Los geólogos conocen desde hace mucho tiempo el *orden* en el que estos sedimentos se depositaron. Lo que ocurre es que, antes de la llegada de los relojes radiactivos, no sabíamos *cuándo* se depositaron. Podíamos darles un orden porque —obviamente— los sedimentos más antiguos tienden a estar debajo de los más modernos. Los sedimentos del Devónico, por ejemplo, son más antiguos que los del Carbonífero (llamados así por el carbón que se encuentra a menudo en las capas) y lo sabemos porque en aquellas partes del mundo donde las dos capas coinciden, la capa del Devónico se encuentra debajo de la capa del Carbonífero (las excepciones a esta regla ocurren en lugares en los que podemos afirmar, por otras evidencias, que las rocas se han plegado lateralmente o, incluso, se han dado la vuelta). Por lo general no tenemos la suerte de encontrar una secuencia completa de capas que ilustre todo el camino, desde el Cámbrico en el fondo hasta el estrato más reciente en la parte superior. Pero debido a que estas capas son tan fáciles de reconocer, sería factible deducir sus edades relativas si saliésemos por todo el mundo a buscar solapamientos y a serrar árboles.

Por tanto, mucho antes de que pudiéramos saber la edad de los fósiles, sabíamos el *orden* en que fueron depositados, o al menos el orden en el que los sedimentos conocidos fueron depositados. Sabíamos que los fósiles del Cámbrico, por todo el mundo, eran más antiguos que los del Ordovícico, a su vez anteriores a los del Silúrico, y así sucesivamente. Y dentro de estas capas más importantes, los geólogos también distinguen subzonas: Jurásico superior, Jurásico medio, Jurásico inferior, etc.

Los estratos mencionados se identifican normalmente por los fósiles que contienen. ¡Y vamos a utilizar el orden de los fósiles como evidencia para la evolución! ¿Corre esto el peligro de convertirse en un argumento circular? Ciertamente no. Pensemos sobre eso. Los fósiles del Cámbrico conforman un repertorio inconfundible que se puede reconocer sin posibilidad de error como cámbrico. De momento estamos utilizando repertorios de fósiles simplemente como *etiquetas* para las rocas del Cámbrico —especies indicadoras— donde podamos encontrarlas. Esta es la razón por la que las compañías petrolíferas emplean a expertos en fósiles para identificar determinados estratos de rocas, normalmente por microfósiles, pequeñas criaturas llamadas foraminíferas o radiolarias.

Una lista característica de fósiles se utiliza para reconocer las rocas ordovícicas, otra para las devónicas, y así sucesivamente. De momento estamos utilizando estos grupos de fósiles para identificar si una franja de roca es, digamos, pérmica o silúrica. Ahora pasamos a utilizar el orden en que el estrato fue depositado, gracias al encadenamiento de estratos existente alrededor del mundo, como evidencia para saber cuál es más o menos antiguo. Después de establecer estos dos conjuntos de información, podemos estudiar los fósiles en estratos sucesivamente más modernos para ver si constituyen una secuencia evolutiva apropiada cuando se compara con otra secuencia. ¿Progresan en la misma dirección? ¿Aparecen ciertas clases de fósiles, por ejemplo mamíferos, solo *después* de una cierta fecha y nunca antes? La respuesta a todas estas preguntas es sí. Siempre sí. Sin excepciones. Esta es una evidencia poderosa de la evolución porque nunca fue un hecho *necesario,* no era algo que tenía que deducirse de nuestro método de identificar estratos ni de nuestro método de obtener una secuencia temporal.

Es un hecho que nada de lo que, ni de forma remota, puede ser considerado un mamífero se ha encontrado en la roca devónica o en cualquier otro estrato. No son estadísticamente más raros en el Devónico que en las rocas más modernas; literalmente, nunca han aparecido en rocas más antiguas de una cierta edad. Pero no tenía por qué ser así. Podría haberse dado el caso de que, según excavábamos más y más profundo a partir del Devónico, a través del Silúrico y aún más allá hasta el Ordovícico, encontrásemos de repente que la era cámbrica —más antigua que todas ellas— estaba plagada de mamíferos. Eso es, de hecho, lo que *no* hemos hallado, pero que exista posibilidad demuestra que no se puede

tildar el argumento de circular: en cualquier momento alguien podría desenterrar un mamífero en rocas cámbricas y la teoría de la evolución se habría venido abajo instantáneamente. La evolución, en otras palabras, es una teoría refutable y, por tanto, científica. Volveré sobre este asunto en el capítulo 6.

Los intentos creacionistas de explicar estos descubrimientos a menudo llegan a ser muy cómicos. El arca de Noé, nos dijeron, es la clave para comprender el orden en que encontramos los fósiles de los grupos principales de animales. A continuación podemos ver una cita literal de una laureada página web creacionista.

> El registro fósil en los estratos geológicos muestra:
>
> (i) INVERTEBRADOS (animales marinos de movimiento lento): desaparecerían primero seguidos de los peces, de mayor movilidad, que acabarían abrumados por el diluvio de sedimentos.
>
> (ii) ANFIBIOS (cercanos al mar): perecerían a continuación al subir las aguas.
>
> (iii) REPTILES (animales terrestres de movimiento lento): serían los siguientes en morir.
>
> (iv) MAMÍFEROS: podrían huir de la crecida del agua. Los más grandes y rápidos sobrevivirían más tiempo.
>
> (v) HOMBRE: mostraría el mayor ingenio —agarrándose a troncos, etc.— para escapar de la inundación.
>
> Esta secuencia es una explicación perfectamente satisfactoria del orden en que varios fósiles aparecen en los estratos. No es el orden en el que habrían evolucionado, sino en el que sufrieron la inundación en tiempos del diluvio de Noé.

Aparte de todas las demás razones para objetar esta asombrosa explicación, solo podría haber una tendencia *estadística* para que los mamíferos, por ejemplo, fueran en promedio *mejores* que los reptiles para escapar de la crecida de las aguas. En lugar de eso, y tal como deberíamos esperar de la teoría de la evolución, *no* hay mamíferos en el estrato inferior del registro geológico. La teoría de «huir a las montañas» tendría una base más sólida si hubiera una disminución estadística de los mamíferos a medida que descendiéramos por las rocas. Literalmente, *no* hay trilobites

por encima del estrato pérmico; *no* hay dinosaurios (excepto pájaros) por encima del estrato cretácico. Una vez más, la teoría de «huir a las montañas» debería predecir una disminución estadística.

Volvamos a la datación y a los relojes radiactivos. Ya que el orden relativo de los estratos sedimentarios es bien conocido, y que el mismo orden se encuentra por todo el mundo, podemos utilizar rocas ígneas que estén por encima y por debajo de los estratos sedimentarios, o incrustadas en ellos, para datar esos denominados estratos sedimentarios y, por tanto, los fósiles que contengan. Por un refinamiento del método, podemos datar fósiles que se encuentren cerca de la cima de, digamos, el Carbonífero o el Cretácico, como más recientes que los fósiles que están ligeramente por debajo en el mismo estrato. No necesitamos encontrar una roca ígnea en la vecindad de un fósil particular para datarlo. Podemos decir que nuestro fósil es, por ejemplo, del Devónico tardío, por su posición en un estrato devónico. Y sabemos, a partir de la datación radiactiva de las rocas ígneas halladas en asociación con los estratos devónicos por todo el mundo, que el Devónico terminó hace unos 360 millones de años.

Isótopo inestable	Se convierte en	Semivida (en años)
Rubidio-87	Estroncio	49.000.000.000
Renio-187	Osmio-187	41.600.000.000
Torio-232	Plomo-208	14.000.000.000
Uranio-238	Plomo-206	4.500.000.000
Potasio-40	Argón-40	1.260.000.000
Uranio-235	Plomo-207	704.000.000
Samario-147	Neodimio-143	108.000.000
Yodo-129	Xenón-129	17.000.000
Aluminio-26	Magnesio-26	740.000
Carbono-14	Nitrógeno-14	5.730

Relojes radiactivos

El reloj de potasio-argón es solo uno de los muchos que los geólogos pueden utilizar, y todos se basan en el mismo principio en sus diferentes escalas de tiempo. Arriba puede verse una tabla de relojes ordenados en función de su lentitud o rapidez. Fijémonos de nuevo en el increíble rango

de semividas, que van desde los 49.000 millones de años en el extremo lento hasta menos de seis mil años en el rápido. Los relojes más rápidos, como el carbono-14, funcionan de forma ligeramente diferente. Para los isótopos con una semivida corta, todos los átomos que estaban presentes cuando la Tierra se formó originalmente desaparecieron hace mucho tiempo. Antes de volver a cómo funciona la datación por carbono, merece la pena hacer una pausa para considerar otra evidencia en favor de una Tierra vieja, un planeta cuya edad se mide en miles de millones de años.

Entre todos los elementos que se dan en el planeta hay 150 isótopos estables y 158 inestables, que hacen un total de 308. De los inestables, 121 se han extinguido o existen solo porque se están renovando constantemente, como el carbono-14 (como veremos a continuación). Ahora, si consideramos los 37 que no se han extinguido podemos apreciar algo significativo. Cada uno de ellos tiene una semivida superior a setecientos millones de años. Y si miramos a los 121 que se han extinguido, todos tienen una semivida inferior a doscientos millones de años. No nos confundamos ahora. ¡Recuerde que estamos hablando de *semivida*, no de vida! Pensemos en el destino de un isótopo con una semivida de cien millones de años. Los isótopos cuya semivida es menor de, aproximadamente, una décima parte de la edad de la Tierra están, a efectos prácticos, extinguidos, y no existen salvo en circunstancias especiales. Con excepciones que están ahí por una razón especial que entendemos bien, los únicos isótopos que encontramos en la Tierra son los que tienen una semivida lo bastante larga como para haber sobrevivido en un planeta muy antiguo. El carbono-14 es una de esas excepciones y es excepcional por una razón interesante, porque se repone continuamente. El papel del carbono-14 como reloj necesita, por tanto, ser entendido de una forma diferente a la de los isótopos de vida más larga. En particular, ¿qué significa poner a *cero* el reloj?

Carbono

De todos los elementos, el carbono es el que parece más indispensable para la vida —sin él la vida en cualquier planeta sería más difícil de imaginar—. Esto es así por la asombrosa capacidad del carbono

para formar cadenas y anillos, así como otras arquitecturas moleculares complejas. Entra en la red alimentaria a través de la fotosíntesis, que es el proceso por el cual las plantas verdes toman moléculas de dióxido de carbono de la atmósfera y utilizan energía de la luz solar para combinar los átomos de carbono con agua y fabricar azúcares. Todo el carbono que tenemos nosotros y todas las otras criaturas vivas procede, a través de las plantas, del dióxido de carbono de la atmósfera. Y se está reciclando continuamente de vuelta a la atmósfera cuando respiramos, cuando excretamos y cuando morimos.

La mayor parte del carbono que hay en el dióxido de carbono de la atmósfera es carbono-12, que no es radiactivo. Sin embargo, aproximadamente un átomo entre un billón es carbono-14, que sí lo es. Se desintegra rápidamente, con una semivida de 5.730 años, como hemos visto, para convertirse en nitrógeno-14. La bioquímica de las plantas es ciega a la diferencia entre estos dos carbonos. Para una planta, el carbono es carbono. Por tanto, las plantas toman carbono-14 junto con carbono-12 e incorporan los dos tipos de átomos de carbono en los azúcares, en las mismas proporciones que existen en la atmósfera. El carbono que se incorpora de la atmósfera (con la misma proporción de átomos de carbono-14) se distribuye con rapidez (comparado con la semivida del carbono-14) por la cadena alimentaria, a medida que las plantas son comidas por los herbívoros, estos por los carnívoros, y así sucesivamente. Todas las criaturas vivas, ya sean plantas o animales, tienen aproximadamente el mismo porcentaje de carbono-12 y carbono-14, que es el mismo porcentaje que hay en la atmósfera.

Entonces, ¿cuándo se pone a cero el reloj? En el momento en que una criatura viva, sea animal o planta, muere. En ese instante es apartada de la cadena alimentaria y separada de la ingesta de carbono-14 fresco, vía las plantas, de la atmósfera. A medida que pasan los siglos, el carbono-14 del cadáver, o trozo de madera, ropa o lo que sea, se desintegra lentamente para transformarse en nitrógeno-14. El porcentaje de carbono-14 y carbono-12 en el espécimen disminuye gradualmente más y más por debajo del porcentaje estándar que comparten las criaturas vivas con la atmósfera. En algún momento todo será carbono-12 —o en sentido más exacto, el contenido de carbono-14 se hará demasiado pequeño como para

ser medido—. Y el porcentaje de carbono-12 y carbono-14 se puede utilizar para calcular el tiempo pasado desde que la muerte de la criatura la separó de la cadena alimentaria y de su intercambio con la atmósfera.

Todo esto está muy bien, pero solo funciona porque hay una reposición continua de carbono-14 en la atmósfera. Sin ella, el carbono-14, con su corta semivida, habría desaparecido hace mucho tiempo de la Tierra, junto con los restantes isótopos naturales con semividas cortas. El carbono-14 es especial porque se está fabricando continuamente por la acción de los rayos cósmicos que bombardean los átomos de nitrógeno en la atmósfera superior. El nitrógeno es el gas más común en la atmósfera y su número de masa es 14, el mismo que el del carbono-14. La diferencia es que el carbono-14 tiene seis protones y ocho neutrones, mientras que el nitrógeno-14 tiene siete protones y siete neutrones (los neutrones, recordemos, tienen una masa muy parecida a la de los protones). Las partículas de los rayos cósmicos son capaces de golpear un protón en un núcleo de nitrógeno y convertirlo en un neutrón. Cuando esto ocurre, el átomo se transforma en carbono-14, que ocupa una posición inmediatamente inferior que el nitrógeno en la tabla periódica. El ritmo al que ocurre esta conversión es aproximadamente constante a través de los siglos, y esta es la razón por la que la datación por carbono funciona. En realidad, el ritmo no es exactamente el mismo e, idealmente, necesitamos compensarlo. Por fortuna disponemos de una calibración precisa del suministro fluctuante de carbono-14 en la atmósfera y podemos tenerla en cuenta para refinar nuestros cálculos de tiempo. Recordemos que, para un periodo de tiempo semejante al que cubre la datación por carbono, podemos recurrir a un método alternativo para datar la madera —la dendrocronología—, que proporciona absoluta precisión en el rango de un año. Si observamos las edades establecidas con carbono de muestras de madera datadas independientemente mediante el análisis de los anillos de árbol, podemos calibrar los errores de fluctuación en la datación del carbono. Después podemos utilizar estas medidas de calibración cuando volvemos a las muestras orgánicas para las que no disponemos de datos de anillos de árbol (la mayoría).

La datación del carbono es una invención relativamente reciente, y empezó a emplearse en los años cuarenta del siglo XX. En los primeros momentos se necesitaban grandes cantidades de material orgánico para completar el procedimiento de datación. Más tarde, en la década de 1970,

se adaptó una técnica, llamada espectrometría de masas, que permitió disminuir la cantidad de material necesario. Esto revolucionó la datación arqueológica. El ejemplo más conocido es el de la Sábana Santa de Turín. Debido a que este famoso trozo de tela parece tener impresa misteriosamente la imagen de un hombre crucificado, mucha gente pensó que podría provenir de la época de Jesús. Apareció por primera vez en el registro histórico a mediados del siglo XIV en Francia, y nadie sabe dónde estuvo antes. Se ha guardado en Turín desde 1578 y está bajo la custodia del Vaticano desde 1983. Cuando la espectrometría de masas hizo posible datar una pequeña muestra del sudario, en lugar de las grandes cantidades de tela que se habrían necesitado antes, el Vaticano permitió que se cortara un trozo. El fragmento se dividió en tres partes, que fueron enviadas a tres laboratorios de prestigio especializados en la datación por carbono, en Oxford, Arizona y Zúrich. Trabajando en condiciones de escrupulosa independencia —sin comparar notas—, los tres laboratorios informaron de sus veredictos sobre la fecha en que había muerto el lino con el que había sido fabricado el sudario. Oxford dijo que en el año 1200; Arizona, en 1304, y Zúrich, en 1274. Estas fechas son todas —dentro de los márgenes normales de error— compatibles entre sí y con la de alrededor de 1350 en que el sudario se menciona por primera vez en la historia. La datación del sudario sigue siendo controvertida, pero no por razones que hagan dudar de la técnica empleada. Por ejemplo, el carbono del sudario podría haber sido contaminado por el fuego que, se sabe, ocurrió en 1532. No me extenderé más con este asunto porque el sudario es de interés histórico, no evolutivo. Es un buen ejemplo, sin embargo, para ilustrar el método y el hecho de que, a diferencia de la dendrocronología, no tiene precisión de un año, sino de un siglo aproximadamente.

He recalcado varias veces que hay muchos relojes diferentes al servicio del detective evolutivo moderno y, también, que funcionan en diversas escalas de tiempo solapadas. Los relojes radiactivos pueden ser utilizados para dar estimaciones independientes de la edad de un trozo de roca, teniendo presente que todos los relojes fueron puestos a cero de forma simultánea cuando este mismo trozo de roca se solidificó. Cuando se hicieron estas comparaciones, los diferentes relojes coincidían entre sí —dentro de los márgenes de error esperados—. Esto aporta una gran confianza en la fiabilidad de los relojes. Calibrados y verificados mutuamente de esta manera, cabe emplear los relojes con seguridad en

problemas interesantes de datación, como la edad de la propia Tierra. La edad aceptada en la actualidad, de 4.600 millones de años, es la estimación en la que diferentes relojes convergen. Dicha coincidencia era de esperar, pero por desgracia necesitamos recalcarla porque, por sorprendente que parezca, como señalé en la Introducción (y he documentado en el Apéndice), aproximadamente el 40% de la población de Estados Unidos y un porcentaje algo menor de la población británica dicen creer que la edad de la Tierra, lejos de medirse en billones de años, es inferior a diez mil años. Lamentablemente, sobre todo en Estados Unidos y en gran parte del mundo islámico, algunos de estos negadores de la historia influyen poderosamente en los colegios y los programas que imparten.

Un negador de la historia podría sostener, por ejemplo, que hay un problema con el reloj de potasio-argón. ¿Qué pasaría si el actual ritmo lento de desintegración del potasio-40 solo hubiera estado funcionando desde el diluvio de Noé? ¿Y si, antes de eso, la semivida del potasio hubiera sido radicalmente diferente, de solo unos pocos siglos, en lugar de 1.260 millones de años? El alegato especial en estos casos es autoevidente. ¿Por qué iban a cambiar las leyes de la física, justo así, tan brutal y tan convenientemente? Y la evidencia aumenta cuando se tienen que hacer alegaciones especiales —ajustadas entre sí— para cada uno de los relojes por separado. Por ahora, todos los isótopos aplicables están de acuerdo entre sí en situar el origen de la Tierra hace entre cuatro mil y cinco mil millones de años. Y lo hacen bajo la suposición de que sus semividas siempre han sido las mismas que podemos medir hoy en día —como las leyes conocidas de la física, de hecho, sugieren con certeza que deben ser —. Los negadores de la historia tendrían que manipular las semividas de todos los isótopos en proporciones diferentes para que todas coincidieran en que el planeta comenzó su andadura hace seis mil años. ¡Esta es la razón por la que lo llamo un alegato especial! Y no he mencionado otros métodos de datación que producen el mismo resultado, por ejemplo, la «datación por trazas de fisión». Recordemos las grandes diferencias en escalas de tiempo de los distintos relojes y pensemos en la cantidad de complicados chanchullos que habría que hacer con las leyes de la física para conseguir que todos los relojes estuvieran de acuerdo entre sí, a través de órdenes de magnitud, para que la Tierra tenga seis mil años ¡y no 4.600 millones de años! Si tenemos en cuenta que el único motivo para este

juego de cifras es el deseo de mantener el mito original de un tipo concreto de tribu del desierto de la Edad del Bronce, resulta sorprendente, por decirlo de algún modo, que nadie haya sido ridiculizado por ello.

Hay un último tipo de reloj evolutivo, el reloj molecular, pero pospondré su explicación hasta el capítulo 10, cuando haya introducido algunas ideas más sobre la genética molecular.

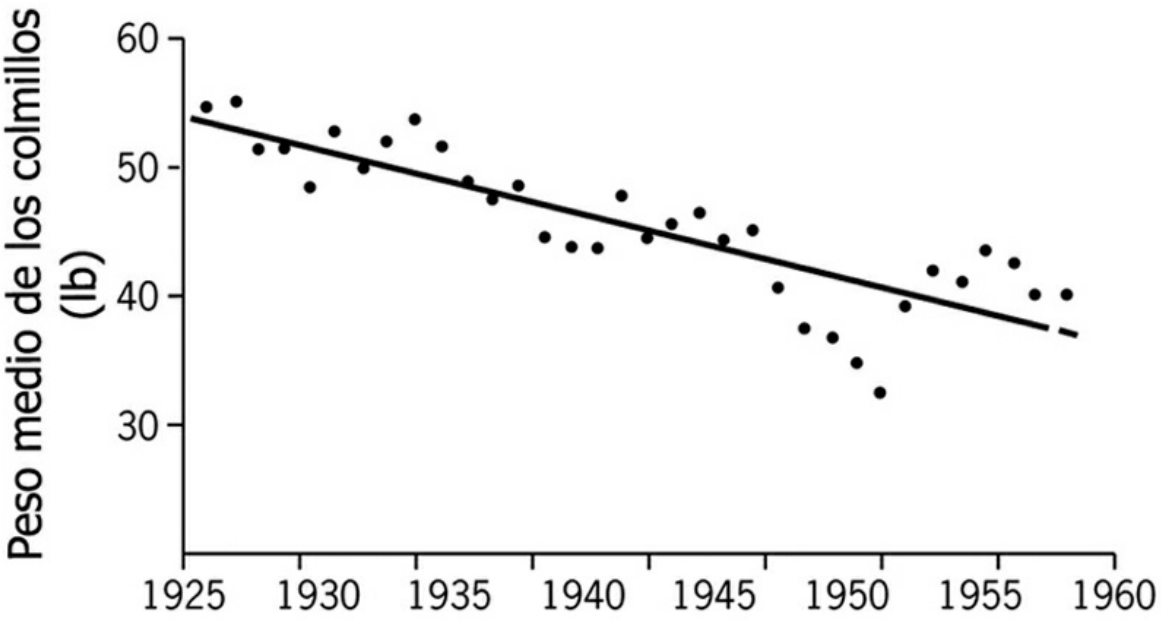
5

JUSTO DELANTE DE NUESTROS OJOS

He utilizado la metáfora de un detective que llega a la escena de un crimen después de que todo haya terminado y trata de reconstruir lo ocurrido a partir de las pistas que han quedado. Pero quizá descarté demasiado pronto la posibilidad de ver la evolución como un testigo ocular. Aunque la gran mayoría del cambio evolutivo tuvo lugar antes de que ningún ser humano hubiera nacido, algunos ejemplos son tan rápidos que podemos ver cómo se desarrolla la evolución delante de nuestros propios ojos y en el tiempo que dura una vida.

Hay una indicación plausible de que esto puede haber ocurrido incluso con el elefante, que el mismo Darwin eligió como ejemplo de uno de los animales que más despacio se reproducen y con uno de los ciclos generacionales más largos. Una de las causas principales de mortalidad entre los elefantes africanos es la caza por parte de los humanos, tanto como trofeos como para obtener marfil y tallarlo. Como es lógico, los cazadores tienden a elegir a los individuos con los colmillos más largos. Esto significa que, al menos en teoría, los animales con colmillos más pequeños tienen una ventaja selectiva. Como siempre ocurre con la evolución, habrá presiones selectivas en conflicto y el resultado evolutivo es consecuencia de un compromiso. Los colmillos más largos tienen, sin duda, una ventaja cuando se trata de competir con otros elefantes, y esta se compensa con la desventaja que supone encontrarse con hombres armados. Cualquier aumento de la actividad cinegética, ya sea furtiva o legal, tenderá a desplazar el equilibrio y convetirá en una ventaja tener colmillos más pequeños. Siendo todo lo demás igual, cabría esperar una tendencia evolutiva hacia colmillos más pequeños como resultado de la actividad de

los cazadores, pero probablemente esperaríamos que dicha predisposición tardase milenios en ser detectable. Nadie piensa verlo durante una vida humana. Analicemos ahora algunas cifras.



Peso de los colmillos de los elefantes de Uganda

Imagen 14

En el gráfico anterior se muestran datos del Departamento de Caza de Uganda, publicados en 1962. Se refieren solo a elefantes abatidos legalmente por cazadores con licencia, y muestran el peso medio de los colmillos en libras (lo que permite determinar su edad), de año en año, entre 1925 y 1958 (periodo durante el cual Uganda era un protectorado británico). Los puntos son cifras anuales. La línea que recorre los puntos no está dibujada a mano, sino con una técnica estadística llamada regresión lineal [21]. Se puede ver que hay una tendencia descendente a lo largo de los treinta años. Y la tendencia es muy significativa desde el punto de vista estadístico, lo que significa que es casi seguro que se trata de una tendencia real y no de un efecto del azar.

El hecho de que haya una tendencia estadísticamente significativa hacia la disminución de la longitud de los colmillos no significa necesariamente que sea una tendencia evolutiva. Si dibujásemos una gráfica de la altura media de los hombres de veinte años de edad, de año en

año, durante el siglo XX, veríamos una tendencia significativa en muchos países hacia un incremento de la altura. Normalmente no se considera que sea una tendencia evolutiva, sino una consecuencia de una mejora en la nutrición. Sin embargo, en el caso de los elefantes tenemos buenas razones para sospechar de la existencia de una fuerte selección en contra de los colmillos largos. Pensemos que, aunque el gráfico se refiere a colmillos obtenidos con licencia de caza, la presión selectiva que produjo la tendencia podría venir en su mayoría de la caza furtiva. Tenemos que contemplar seriamente la posibilidad de que sea una tendencia evolutiva real, en cuyo caso sería sorprendentemente rápida. Hay que ser cuidadosos antes de llegar a demasiadas conclusiones. Podría darse el caso de que estuviéramos observando una selección natural fuerte, lo que muy probablemente provocaría cambios en las frecuencias de los genes en la población, pero estos efectos genéticos no han sido demostrados. Podría ocurrir que la diferencia entre elefantes con colmillos largos y colmillos cortos fuera una diferencia no genética. Sin embargo, yo me inclino a asumir seriamente la posibilidad de que sea una tendencia evolutiva real.

Es más, mi colega el doctor Iain Douglas-Hamilton, que es una autoridad mundial en las poblaciones de elefantes africanos, se lo toma en serio y cree, seguro que con acierto, que hay que analizarlo con más cuidado. Sospecha que la tendencia comenzó bastante antes de 1925 y ha continuado después de 1958. Tiene razones para pensar que la misma causa, actuando en el pasado, está detrás de la ausencia de colmillos de muchas poblaciones locales de elefantes asiáticos. Parece que tenemos a primera vista un caso de evolución rápida que se produce delante mismo de nuestros ojos, y que requiere seguir investigando.

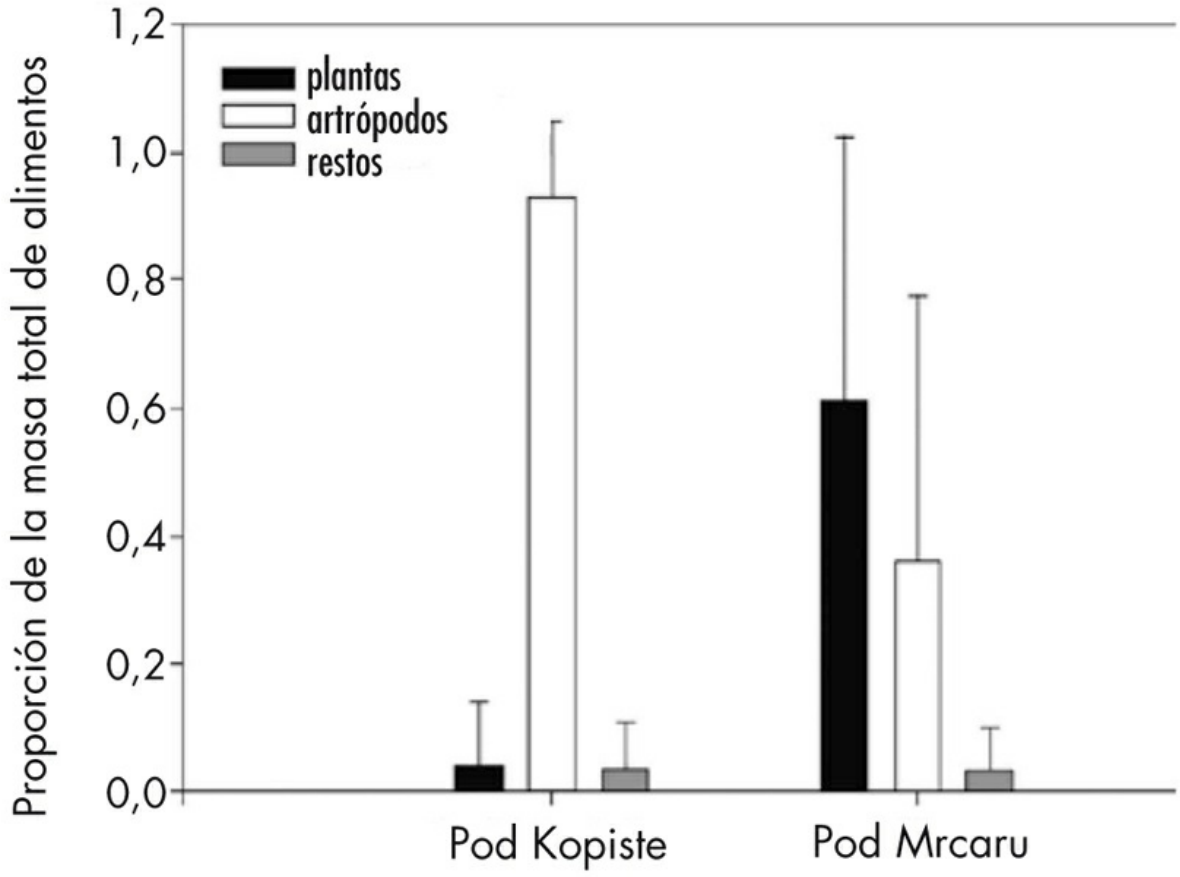
Pasemos ahora a otro caso, uno que permite observar inquietantes investigaciones muy recientes: un estudio sobre lagartijas en las islas del Adriático.

Las lagartijas de Pod Mrcaru

A escasa distancia de la costa croata hay dos pequeños islotes llamados Pod Kopiste y Pod Mrcaru. En 1971, existía una población de lagartija común del Mediterráneo, *Podarcis sicula*, que se alimenta

principalmente de insectos, en Pod Kopiste pero no en Pod Mrcaru. Ese año los investigadores recogieron cinco parejas de *Podarcis sicula* de Pod Kopista y las liberaron en Pod Mrcaru. Más tarde, en 2008, otro grupo de científicos, la mayoría belgas, en colaboración con Anthony Herrel, visitaron las islas para ver qué había sucedido. Encontraron una población floreciente de lagartijas en Pod Mrcaru, cuyo análisis de ADN confirmó que eran realmente *Podarcis sicula*. Se supone que estos ejemplares descienden de las cinco parejas originales que fueron trasladadas. Herrel y sus colegas observaron a los individuos de esta nueva población y los compararon con las lagartijas que seguían viviendo en la isla original. Encontraron marcadas diferencias. Los científicos hicieron la suposición, posiblemente justificada, de que las lagartijas de la isla original, Pod Kopiste, no habían sufrido cambios respecto a sus antepasados de treinta y siete años atrás. En otras palabras, supusieron que estaban comparando las lagartijas evolucionadas de Pod Mrcaru con sus «antepasados» sin evolucionar (refiriéndose a sus contemporáneos, pero del tipo de sus antepasados) de Pod Kopiste. Aunque esta suposición sea incorrecta —incluso si, por ejemplo, las lagartijas de Pod Kopiste hubieran estado evolucionando igual de deprisa que las de Pod Mrcaru—, aún estaríamos observando una divergencia evolutiva en la naturaleza en una escala de tiempo de décadas: el tipo de escala de tiempo que los humanos podemos observar a lo largo de nuestra vida.

Y ¿cuáles eran las diferencias entre las dos poblaciones, las diferencias que se habían producido en solo treinta y siete años? Bien, las lagartijas de Pod Mrcaru —la población «evolucionada»— tenían cabezas significativamente más grandes [22] que las de la población «original» de Pod Kopiste: más largas, más anchas y más altas. Esto se traduce en una mayor fuerza de mordida. Un cambio de este tipo conlleva una transformación hacia una dieta más vegetal y, con seguridad, las lagartijas de Pod Mrcaru comen más alimento proveniente de plantas que las de tipo «antepasado» de Pod Kopiste. De la dieta casi exclusiva de insectos (artrópodos, en el gráfico) que disfruta todavía la población moderna de Pod Kopiste, las lagartijas de Pod Mrcaru han pasado a una dieta en gran medida vegetariana, especialmente durante el verano.

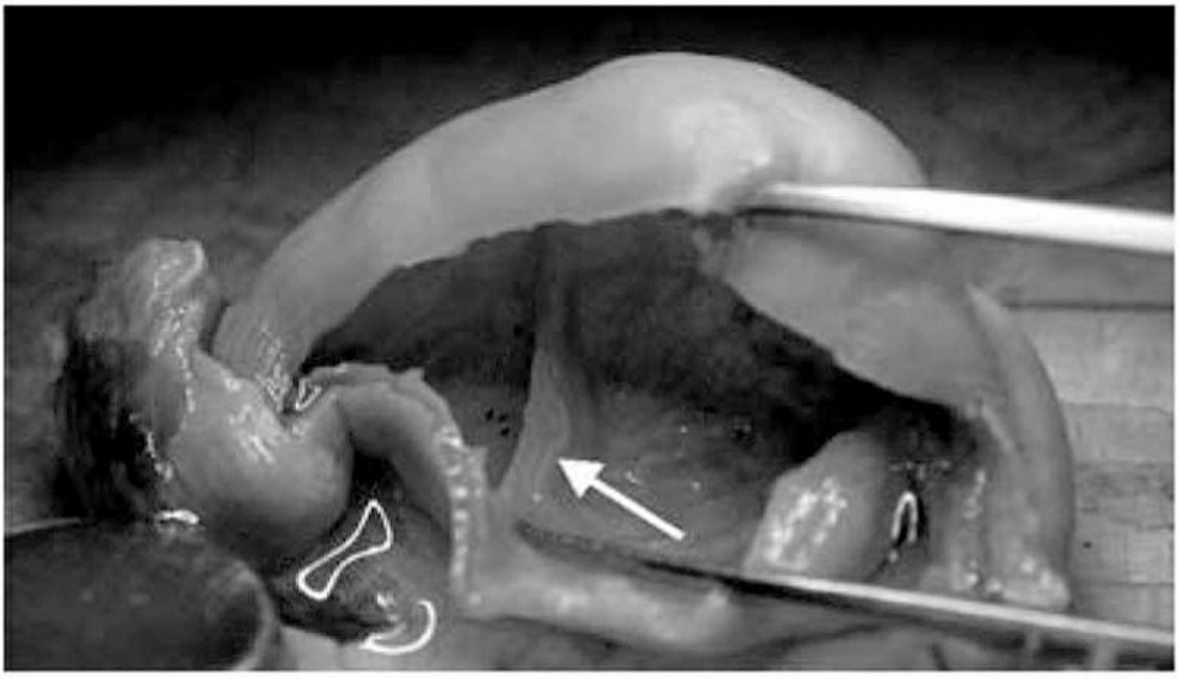


Dieta veraniega de las lagartijas en dos islas del Adriático

Imagen 15

¿Por qué necesita un animal una mordida más fuerte cuando adopta una dieta vegetariana? Porque las células de las plantas, no así las de los animales, están endurecidas por la celulosa. Los mamíferos herbívoros, como los caballos, las vacas y los elefantes, tienen muelas parecidas a piedras de molino para triturar la celulosa; son muy diferentes de los dientes del tipo cizalla de los carnívoros y de los de forma de aguja de los insectos. También tienen muchos músculos en la mandíbula y cráneos muy robustos para la sujeción de esos músculos (pensemos en la pronunciada cresta central a lo largo del cráneo de un gorila) [23]. Los vegetarianos también tienen peculiaridades características en el intestino. Los animales normalmente no pueden digerir la celulosa sin la ayuda de bacterias o de otros microorganismos, y muchos vertebrados disponen de un pequeño conducto lateral sin salida llamado «ciego» que almacena estas bacterias y actúa como una cámara de fermentación (nuestro apéndice es un vestigio

del ciego más largo de nuestros antepasados vegetarianos). El ciego y otras partes del intestino pueden llegar a ser muy complejas en los herbívoros especializados. Los carnívoros normalmente tienen intestinos más sencillos que los herbívoros, y también más pequeños. Entre los elementos exclusivos que presentan los estómagos de los herbívoros están las válvulas cecales. Son particiones incompletas, algunas veces musculares, que pueden servir para regular o ralentizar el flujo de material a través del intestino o, simplemente, para aumentar la superficie del interior del ciego. En la fotografía siguiente se puede ver la disección del ciego de una especie de lagartija que come mucha materia vegetal. La válvula se indica con una flecha. Lo fascinante es que, aunque las válvulas cecales no se dan normalmente en *Podarcis sicula* y son raras en la familia a la que pertenece, han comenzado a desarrollarse en la población de Pod Mrcaru, la que ha estado evolucionando durante —solo— los últimos treinta y siete años hacia un estatus de herbívoro. Los investigadores descubrieron otros cambios evolutivos en las lagartijas de Pod Mrcaru. La densidad de población aumentó y las lagartijas dejaron de defender territorios de la forma en que lo hacían sus «antepasados» de Pod Kopiste. Debería insistir en que el único elemento que es realmente excepcional de esta historia, y la razón por la que la cuento aquí, es que todo ha ocurrido extremadamente deprisa, en cuestión de unas pocas décadas: evolución delante de nuestros ojos.



Válvula cecal

Imagen 16

CUARENTA Y CINCO MIL GENERACIONES DE EVOLUCIÓN EN EL LABORATORIO

La duración media de una generación en las lagartijas es de dos años, por lo que el cambio evolutivo observado en Pod Mrcaru se ha producido en solo unas dieciocho o diecinueve generaciones. Pensemos en lo que podríamos ver en tres o cuatro décadas si siguiéramos la evolución de las bacterias, cuyas generaciones se miden en horas o incluso en minutos, en lugar de en años. Las bacterias constituyen un regalo incalculable para el científico evolutivo. En algunos casos se pueden congelar durante un periodo de tiempo indefinido y después devolverlas a la vida, donde vuelven a reproducirse como si nada hubiera ocurrido. Esto significa que los investigadores pueden crear su propio «registro fósil vivo», como una instantánea del punto exacto que el proceso evolutivo ha alcanzado en un cierto instante. ¡Imagine que pudiéramos revivir desde su hielo profundo a Lucy, el magnífico fósil prehumano descubierto por Don Johanson, y dejar que comenzara a evolucionar de nuevo! Todo esto se ha conseguido con la bacteria *Escherichia coli,* en un espectacular experimento a largo plazo realizado por el bacteriólogo Richard Lenski sus colegas de la Michigan State University. La investigación científica en nuestros días suele ser un trabajo de equipo. De aquí en adelante, utilizaré algunas veces el nombre de Lenski por brevedad, pero debe leerse como «Lenski, colegas y estudiantes de su laboratorio». Como veremos, los experimentos de Lenski resultan inquietantes para los creacionistas, y por una muy buena razón. Constituyen una maravillosa demostración de la evolución en acción, algo de lo que es difícil reírse aun cuando la motivación para hacerlo sea muy fuerte. Y la motivación de los creacionistas tenaces es realmente muy fuerte. Volveré sobre esto al final de la sección.

E. coli es una bacteria común. Muy común. En cualquier momento hay unos cien billones de ellas por el mundo, de las cuales aproximadamente mil millones, según el cálculo de Lenski, se encuentran en nuestro intestino grueso en este mismo instante. La mayoría de ellas son

inofensivas e incluso beneficiosas, pero de vez en cuando algunas cepas dañinas llegan a salir en los titulares. Esta innovación evolutiva periódica no debe sorprendernos si consideramos las cifras totales, aun siendo las mutaciones eventos muy poco frecuentes. Si asumimos que la probabilidad de que un gen mute durante cualquier acto reproductivo de las bacterias es de uno sobre mil millones, la cantidad de bacterias es tan colosal que casi todos los genes del genoma habrán mutado en algún lugar del mundo cada día. Como dice Richard Lenski: «Esas son muchas oportunidades para la evolución».

Lenski y sus colegas aprovecharon esa oportunidad de forma controlada en el laboratorio. Su trabajo es muy completo y cuidadoso con cada detalle. Los detalles realmente contribuyen al impacto de la evidencia en favor de la evolución que estos experimentos proporcionan y, por tanto, no voy a escatimar esfuerzos para explicarlos. Esto significa que las próximas páginas serán inevitablemente algo complicadas —no difíciles, sino intrincadamente detalladas—. Es mejor no leer esta sección del libro si se está cansado, como al final de un largo día. Lo que puede facilitar la tarea es que cada detalle tiene sentido: nada nos deja pensativos y preguntándonos de qué va todo esto. Así que, por favor, acompáñenme paso a paso a través de esta serie de experimentos espléndidamente realizados y construidos.

Estas bacterias se reproducen asexualmente —mediante simple división celular—, por lo que es fácil clonar una población enorme de individuos idénticos en un periodo corto de tiempo. En 1988, Lenski tomó una de estas poblaciones e infectó doce matraces idénticos que contenían todos ellos el mismo caldo de cultivo, compuesto por glucosa como fuente vital de alimentación. Los doce matraces, cada uno con su población inicial de bacterias, fueron puestos en una «incubadora de agitación», donde se mantuvieron templados y eran agitados para que las bacterias estuvieran bien distribuidas por el líquido. Estos doce matraces fundaron doce líneas de evolución que se mantuvieron separadas entre sí durante dos décadas y todavía permanecen así: como las doce tribus de Israel, salvo porque en el caso de las tribus no había ley alguna en contra de que procrearan entre sí.

Las doce tribus de bacterias no se mantuvieron en los mismos doce matraces todo el tiempo. Al contrario, cada tribu tenía un matraz nuevo cada día. Imaginemos doce *líneas* de matraces, estirándose continuamente,

¡con más de siete mil matraces en cada una! En cada una de las doce tribus, se infectaba cada día un matraz virgen con líquido procedente del matraz del día anterior. Una pequeña muestra, exactamente una centésima parte del volumen del matraz antiguo, se pasaba al nuevo, que contenía también un suministro de caldo de cultivo rico en glucosa. La población de bacterias del matraz comenzaba a dispararse; pero siempre se nivelaba al día siguiente, cuando el suministro de comida se acababa y aparecía el hambre. En otras palabras, la población de cada matraz se multiplicaba deprisa y después llegaba a una meseta, momento en el que se extraía una muestra para comenzar el nuevo ciclo del día siguiente. Estas bacterias pasaron por los mismos ciclos repetidos de expansión miles de veces a lo largo de su equivalente de alta velocidad del tiempo geológico, seguidos por una situación de falta de alimento de la que solo unos pocos cientos de afortunadas eran rescatadas para ser conducidas en un arca de Noé de cristal hacia un filón de glucosa nuevo —aunque también temporal: condiciones realmente perfectas para la evolución, aún más cuando el experimento se estaba realizando en paralelo en doce líneas independientes —.

Lenski y su equipo han continuado esta rutina diaria durante más de veinte años. Esto suma unas siete mil «generaciones de matraz» y cuarenta y cinco mil generaciones de bacterias —promediando entre seis y siete generaciones de bacterias por día—. Para ponerlo en perspectiva, si mirásemos hacia atrás a través de cuarenta y cinco mil generaciones de humanos, supondría aproximadamente un millón de años, hasta la época del *Homo erectus*, que no fue hace tanto tiempo. Por tanto, sea cual sea el cambio que Lenski ha podido computar en el equivalente a un millón de años de generaciones de bacterias, pensemos en cuánta más evolución podría ocurrir en, digamos, cien millones de años de evolución de los mamíferos. E incluso cien millones de años resulta un periodo comparativamente corto según los estándares geológicos.

Además del experimento principal sobre la evolución, el grupo de Lenski utilizó las bacterias para varios experimentos derivados muy ilustrativos, por ejemplo reemplazar la glucosa con otro azúcar, maltosa, después de dos mil generaciones. Pero me concentraré en el experimento central, que utiliza glucosa todo el tiempo. Se tomaron muestras de las doce tribus a intervalos durante los veinte años para ver cómo estaba progresando la evolución. También se congelaron muestras de cada tribu

como fuente de «fósiles» resucitables que representaban puntos estratégicos a lo largo del camino evolutivo. Cuesta trabajo definir la brillantez de concepción de este experimento, más bien conjunto de experimentos.

Veamos un pequeño ejemplo de la excelente planificación hacia el futuro. Recuerde que dije que los doce matraces fundadores fueron todos derivados del mismo clon, y por tanto tuvieron un comienzo genéticamente idéntico. Pero eso no es del todo cierto —por una razón interesante y astuta—. El laboratorio de Lenski había utilizado antes un gen llamado *ara* que se presenta de dos formas, Ara+ y Ara–. No se pueden diferenciar hasta que se toma una muestra de las bacterias y se «extiende» sobre un plato de agar que contenga un caldo de cultivo nutritivo, además del azúcar arabinosa y un tinte químico llamado tetrazolina. Una de las cosas que los bacteriólogos hacen es «extenderlo»; significa poner una gota del líquido que contiene las bacterias sobre un recipiente cubierto por una delgada capa de gel de agar y luego incubar el recipiente. Las colonias de bacterias crecen hacia afuera expandiéndose en círculos —anillos de hadas en miniatura [24]— a partir de las gotas, alimentándose de los nutrientes mezclados con el agar. Si la mezcla contiene arabinosa y el tinte indicador, entonces se desvela la diferencia entre Ara+ y Ara–, como si calentásemos tinta invisible: aparecen colonias blancas y rojas, respectivamente. Para el equipo de Lenski esta distinción es útil en tareas de marcado, como veremos, y ellos anticiparon esta utilidad fijando seis de sus doce tribus como Ara+ y las otras seis como Ara–. Ejemplo de la utilidad de la codificación por color de las bacterias es la comprobación de los propios procedimientos de laboratorio. Cuando realizaban su ritual diario de infectar nuevos matraces, tenían cuidado de manejar los matraces de Ara+ y de Ara– alternativamente. De esa forma, si alguna vez cometían un error —salpicar una pipeta de transferencia con líquido o algo parecido—, quedaría de manifiesto cuando sometiesen las muestras a la prueba rojo/blanco. ¿Ingenioso? Sí. Y escrupuloso. Los científicos realmente buenos tienen que ser ambas cosas.

Pero olvidémonos del Ara+ y el Ara– por el momento. En todos los demás aspectos, las poblaciones fundacionales de las doce tribus eran idénticas al comenzar. No se ha detectado ninguna otra diferencia entre las

Ara+ y las Ara–, por lo que se pueden tratar como marcadores de color apropiados, de la misma forma que los ornitólogos ponen anillas de color en las patas de los pájaros.

De acuerdo entonces. Tenemos doce tribus caminando por su propio equivalente acelerado del tiempo geológico, en paralelo, bajo las mismas condiciones de crecimiento y colapso periódicas. La cuestión interesante era: ¿se mantendrían igual que sus antepasados? ¿O evolucionarían? Y si evolucionaban, ¿lo harían las doce tribus de la misma forma o divergirían entre sí?

El caldo de cultivo, como dije, contenía glucosa. Ese no era el único alimento, pero sí el recurso que marcaba un límite. Esto significa que quedarse sin glucosa era el factor clave responsable de que el tamaño de la población, en cada matraz, cada día, dejara de crecer y alcanzara una meseta. Dicho de otra forma, si los investigadores hubieran puesto más glucosa en los matraces diarios, la meseta de población al final del día habría sido más alta. O bien, si hubieran añadido una segunda dosis de glucosa después de haber alcanzado la meseta, habrían sido testigos de un segundo crecimiento de la población, hasta alcanzar una nueva meseta.

En estas condiciones, la expectativa darwiniana es que, si apareciera una mutación que ayudara a una bacteria individual a aprovechar la glucosa de modo más eficiente, la selección natural la favorecería y sus portadores se extenderían por el matraz reproduciéndose más que los individuos no mutantes. Su tipo infectaría de manera desproporcionada al siguiente matraz y, según se pasase de matraz a matraz, los mutantes muy pronto tendrían el monopolio de la tribu. Bien, esto es exactamente lo que ocurrió en las doce tribus. A medida que se sucedieron las «generaciones de los matraces», las doce líneas mejoraron a sus antepasados: se hicieron mejores aprovechando la glucosa como fuente de alimento. Pero, sorprendentemente, lo hicieron de formas distintas —es decir, tribus diferentes desarrollaron diferentes conjuntos de mutaciones—.

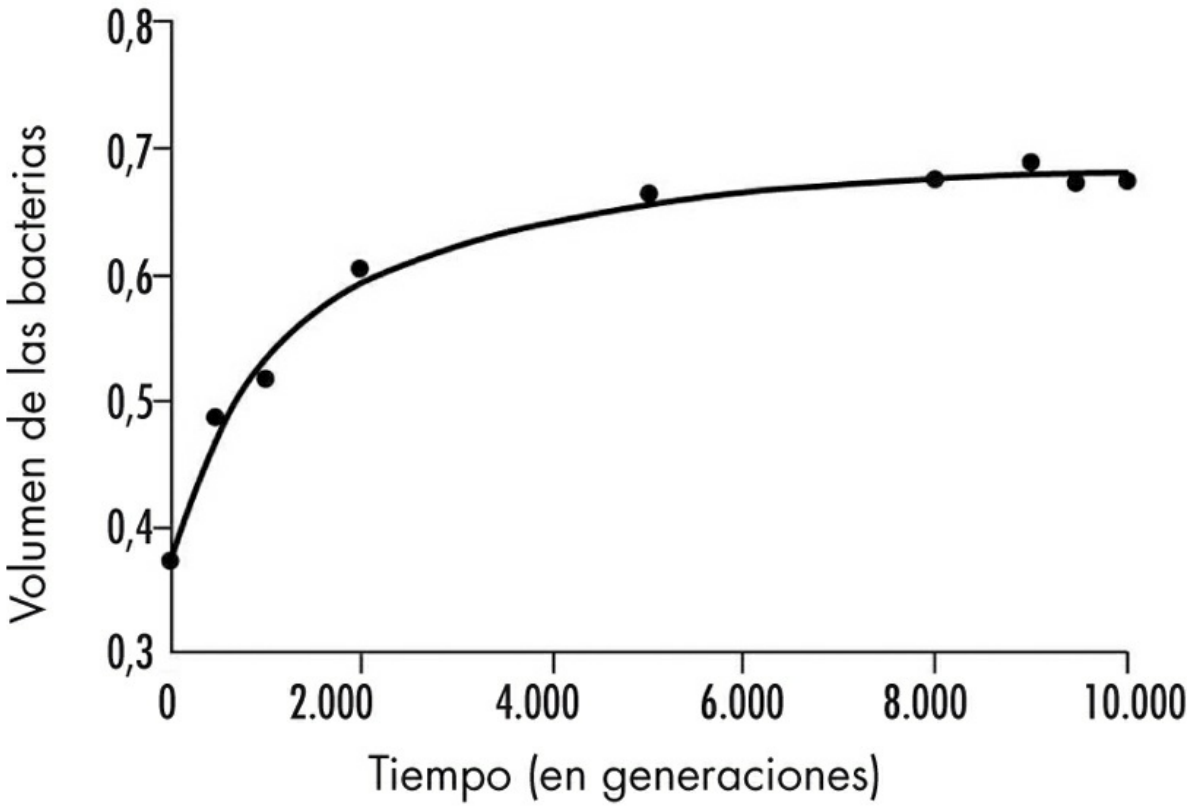
¿Cómo supieron esto los científicos? Lo averiguaron tomando muestras de las líneas sucesorias a medida que evolucionaban y comparando la «eficacia biológica» de cada muestra con las muestras «fósiles» de la población fundacional original. Recordemos que los «fósiles» son muestras congeladas de bacterias que, cuando se descongelan, siguen viviendo y se reproducen con normalidad. Y entonces, ¿cómo lograron Linski y sus colegas esta comparación de «eficacia

biológica»? ¿Cómo compararon las bacterias «modernas» con sus antepasados «fósiles»? Con mucha imaginación. Tomaron una muestra de la población que habría evolucionado y la pusieron en un matraz limpio. Y pusieron una muestra del mismo tamaño de los antepasados descongelados en el mismo matraz. No hace falta decir que estos matraces mezclados experimentalmente fueron a partir de entonces apartados de las líneas sucesorias de las doce tribus del experimento de la evolución a largo plazo. Este experimento complementario se hizo con muestras que no volvieron a intervenir en el experimento principal.

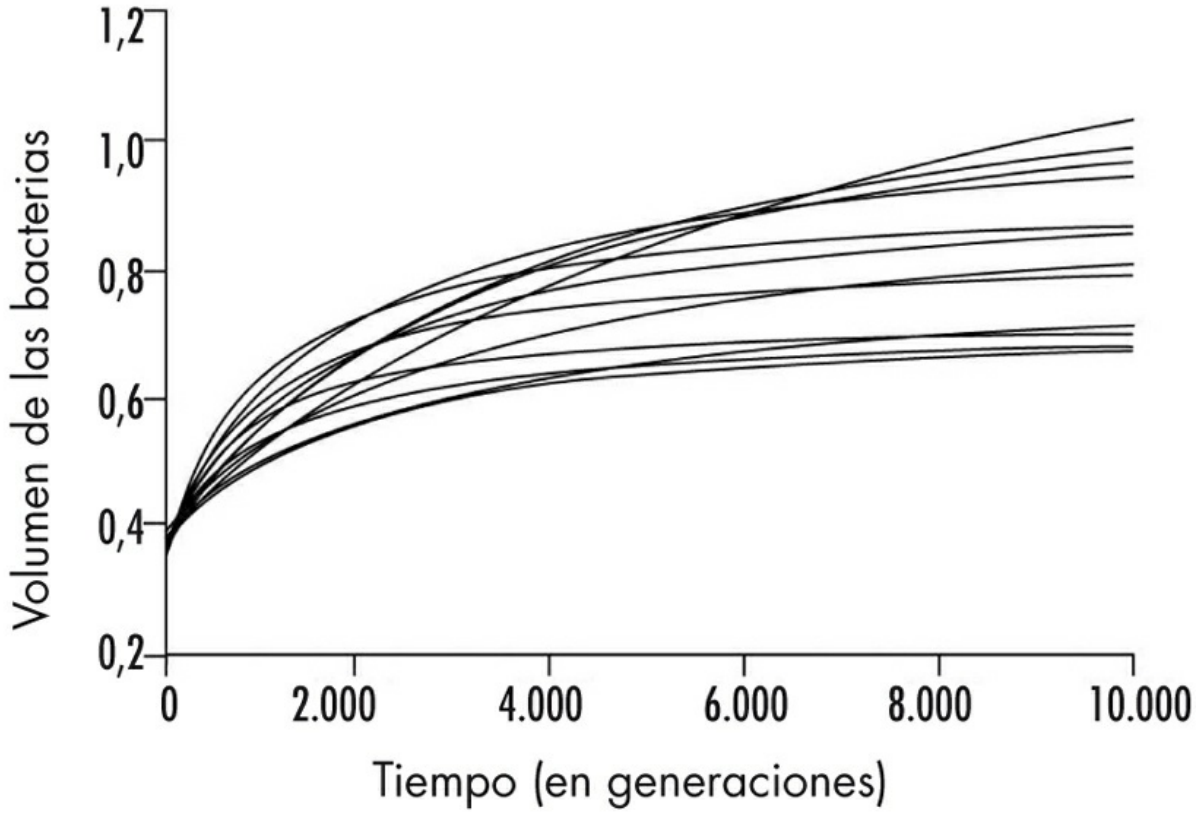
Por tanto, tenemos un nuevo matraz experimental que contiene dos cepas en competición, las «modernas» y los «fósiles vivos», y queremos saber cuál de las dos cepas se reproducirá con mayor éxito. Pero si todas están mezcladas, ¿cómo se pueden diferenciar? ¿Cómo se distinguen dos cepas cuando están mezcladas en el «matraz de competición»? Antes dije que era ingenioso. ¿Recuerda la codificación del color, con los «rojos» (Ara–) y los «blancos» (Ara+)? Si quisiéramos comparar la eficacia biológica de, por ejemplo, la tribu 5 con la población fósil ancestral, ¿qué haríamos? Supongamos que la tribu 5 era Ara+. Entonces nos aseguraríamos de que los «fósiles ancestrales» con los que se va a comparar la tribu 5 fueran Ara–. Y si la tribu 6 resulta ser Ara–, los «fósiles» que elegiríamos descongelar y mezclar con *ellos* serían todos Ara+. Los genes Ara+ y Ara–, como el equipo de Lenski ya sabía por trabajos previos, no tienen efecto sobre la eficacia biológica. Por tanto, podían utilizarse los marcadores de color para evaluar las habilidades competitivas de cada una de las tribus en evolución, empleando en cada caso «antepasados» fosilizados como estándar competitivo. Todo lo que tenían que hacer era cultivar muestras de los matraces con la mezcla y ver cuántos grupos de bacterias crecían de color rojo y cuántos de color blanco.

Tal como ya dije, en las doce tribus la eficacia biológica media se incrementó a medida que pasaron las miles de generaciones. Las doce líneas mejoraron la supervivencia en condiciones de glucosa limitada. La mejora de eficacia biológica se puede atribuir a varios cambios. Las poblaciones crecieron más deprisa en matraces sucesivos y el tamaño medio del cuerpo de las bacterias aumentó en las doce líneas. El primer gráfico de la página siguiente muestra la evolución del tamaño medio del cuerpo de las bacterias de una de las tribus, que era característica. Los

puntos gruesos representan datos reales. La curva dibujada es una aproximación matemática. Es la más ajustada a los datos observados para este tipo particular de curva, que se llama hipérbola [25]. Siempre es posible que una función matemática más compleja que una hipérbola se ajuste mejor a los datos, pero esta hipérbola lo hace bastante bien, por lo que no merece la pena intentarlo. Los biólogos a menudo ajustan curvas matemáticas a los datos observados, pero a diferencia de los físicos, no están acostumbrados a ajustes tan precisos. Normalmente nuestros datos son demasiado poco ordenados. En biología, a diferencia de lo que sucede con las ciencias físicas, solo esperamos obtener curvas suaves cuando tenemos una gran cantidad de datos obtenidos bajo condiciones controladas escrupulosamente. La investigación de Lenski es un ejemplo de esta clase.



Experimento de Lenski: tamaño del cuerpo de las bacterias en una tribu



Experimento de Lenski: tamaño del cuerpo de las bacterias en las doce tribus

Imágenes 17-18

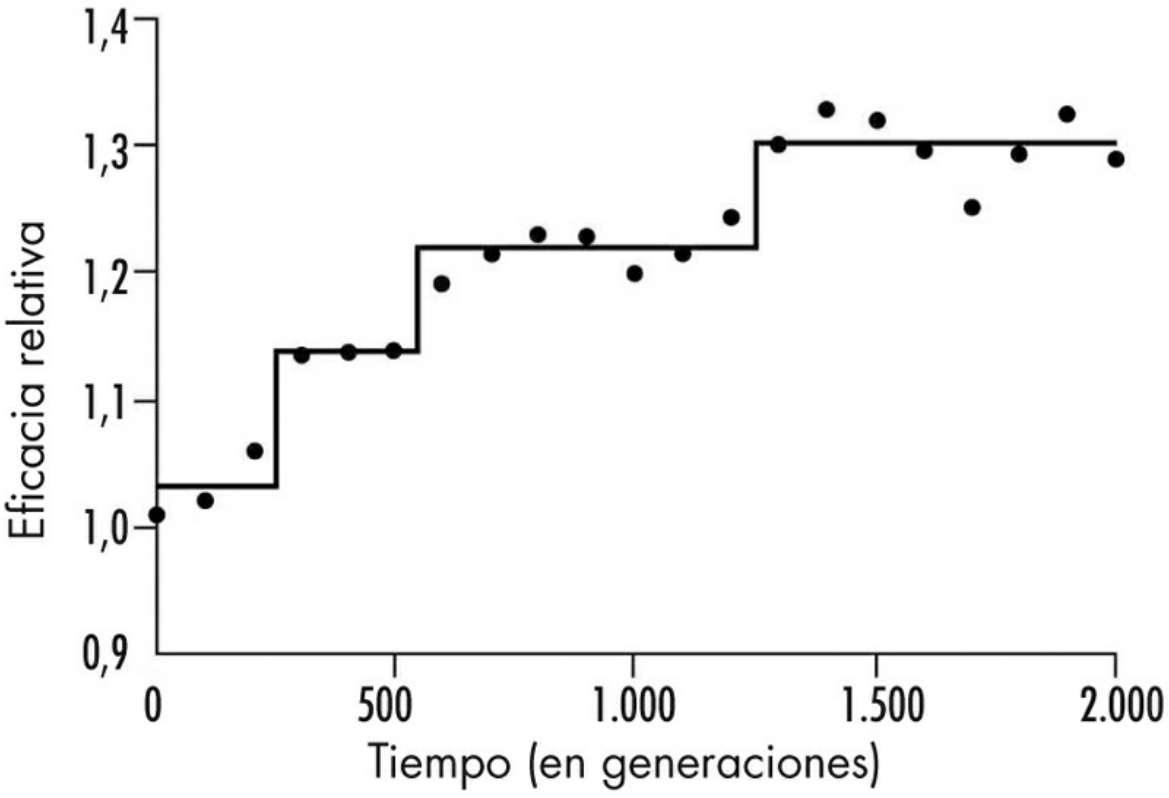
Podemos ver que casi todo el incremento del tamaño del cuerpo ocurrió durante las primeras dos mil generaciones. La siguiente pregunta importante es esta. Dado que las doce tribus aumentaron de tamaño a lo largo del tiempo evolutivo, ¿crecieron todas de la misma forma, siguiendo la misma ruta genética? No, no lo hicieron, y ese es el segundo resultado de interés. El primer gráfico correspondía a una de las doce tribus. Observe ahora, en el segundo gráfico, los mejores ajustes hiperbólicos equivalentes para las doce. Fíjese en su dispersión. Todas parecen estar acercándose a una meseta, pero la más alta de las doce es casi el doble que la más baja. Y las curvas tienen diferentes formas: la curva que alcanza el valor más alto en la generación diez mil comienza creciendo más despacio que algunas de las otras, y luego las adelanta antes de la generación siete mil. Por cierto, no hay que confundir estas mesetas con las mesetas diarias del tamaño de la población dentro de cada matraz. Estamos viendo ahora curvas en tiempo evolutivo, medidas en generaciones de matraces, no en el tiempo de vida de las bacterias, que se mide en horas dentro de un matraz.

Lo que sugiere este cambio evolutivo es que hacerse más grande es, por alguna razón, una buena idea cuando se está luchando para sobrevivir en este entorno alternativamente rico y pobre en glucosa. No especularé sobre por qué el tamaño cada vez mayor del cuerpo puede ser una ventaja —hay muchas posibilidades—, pero parece que debe de ser así porque lo hicieron todas las tribus. Sin embargo hay muchas formas diferentes de hacerse más grande —conjuntos distintos de mutaciones—, y parecería que se hubieran descubierto diversos linajes evolutivos en este experimento. Esto es muy interesante. Pero quizá resulta aún más importante que, algunas veces, un par de tribus parecen haber descubierto de modo independiente la *misma* forma de hacerse más grandes. Lenski y un grupo diferente de colegas investigaron este fenómeno tomando dos tribus, llamadas Ara+1 y Ara–1, que parecían haber seguido, después de veinte mil generaciones, la misma trayectoria evolutiva, y estudiaron su ADN. El sorprendente resultado fue que encontraron cincuenta y nueve genes que habían cambiado sus niveles de expresión en ambas tribus y *los cincuenta y nueve habían cambiado en la misma dirección*. Si no fuera por la selección natural, este paralelismo independiente en cincuenta y nueve genes parecería del todo increíble. Las posibilidades en contra de que esto ocurra por azar son asombrosamente grandes. Este es exactamente el tipo de cuestión que los creacionistas dicen que no puede suceder, porque piensan que es demasiado improbable que pudiera haberse producido por azar. Pero aun así ocurrió. Y la explicación es, por supuesto, que *no* ocurrió por azar, sino debido a que la selección natural, gradualmente, paso a paso y de forma acumulativa, favoreció los mismos —literalmente los mismos— cambios beneficiosos en ambas líneas de modo independiente.

La curva suave del gráfico en la que se ve al aumento de tamaño de las bacterias a medida que pasan las generaciones aporta evidencia a la idea de que la mejora es gradual. ¿Pero es tal vez demasiado gradual? ¿No cabría esperar que aparecieran realmente *pasos* a medida que la población «espera» a que se manifieste la siguiente mutación? No necesariamente. Eso depende de factores como el número de mutaciones implicadas, la magnitud del efecto de cada mutación, la variación en tamaño de la célula causada por influencias distintas a las de los genes y la frecuencia con que se toman muestras de las bacterias. Y es interesante que, si miramos el gráfico del incremento de eficacia biológica en relación con el tamaño de

la bacteria (página siguiente), vemos lo que podría ser interpretado como una línea claramente más escalonada. Recuerde que cuando introduje la hipérbola dije que sería posible encontrar una función matemática más compleja que se ajustase mejor a los puntos. Los matemáticos llaman a esto un «modelo». Podríamos ajustar un modelo hiperbólico a estos puntos, como en el gráfico anterior, pero aún podríamos obtener un ajuste mejor con un «modelo de pasos», como el utilizado en la figura. No es un ajuste tan preciso como el de la hipérbola del gráfico de tamaño de las bacterias. En ninguno de los dos casos se puede probar que el modelo se ajusta exactamente a los datos, ni que eso se pueda conseguir alguna vez. Pero los datos son al menos compatibles con la idea de que el cambio evolutivo que observamos representa la acumulación paso a paso de mutaciones [26].

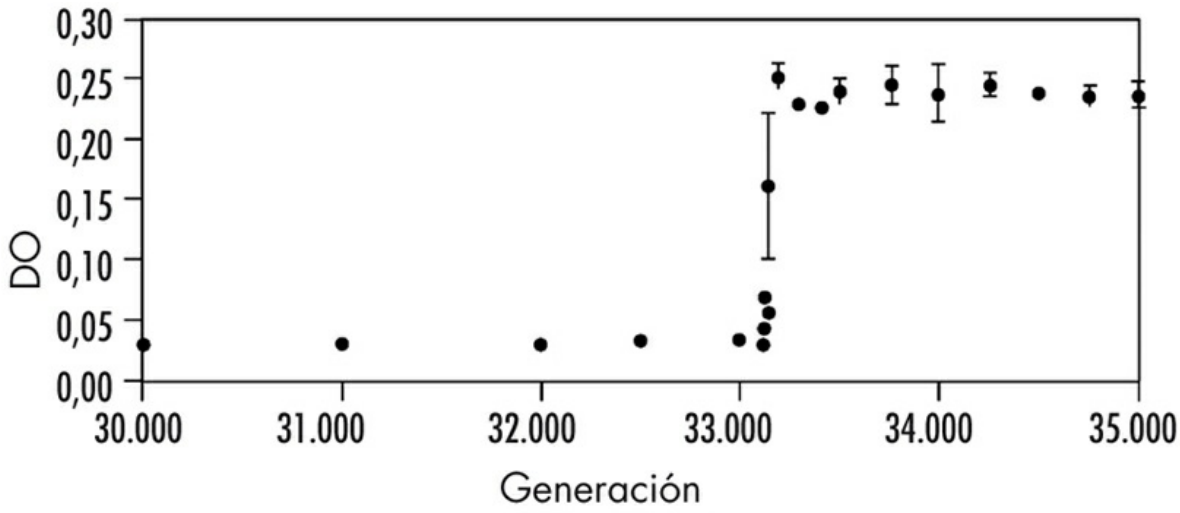
Hasta ahora hemos visto una demostración muy atractiva de la evolución en acción: evolución delante de nuestros ojos, documentada por comparación de doce líneas independientes y también de cada línea con «fósiles vivos» que, en sentido literal, en lugar de solo metafóricamente, proceden del pasado.



Experimento de Lenski: incremento en la eficacia

Imagen 19

Ahora ya estamos listos para avanzar hacia un resultado aún más interesante. Hasta el momento, he supuesto que las doce tribus evolucionaron para mejorar su eficacia biológica de la misma forma genérica, diferenciándose solo en el detalle —algunas iban algo más deprisa, otras un poco más despacio—. Sin embargo, el experimento a largo plazo produjo una excepción espectacular. Poco después de la generación 33.000, sucedió algo sorprendente. Una de las doce líneas, llamada Ara–3, se volvió loca de repente. Observe el gráfico inferior. El eje vertical, etiquetado como DO, que quiere decir densidad óptica o «nubosidad», es una medida del tamaño de la población en el matraz. El líquido se hace *nuboso* debido al enorme número de bacterias; el espesor de la nube se puede medir como un número y ese número es nuestro índice de densidad de población. Se puede ver que, hasta la generación 33.000, la densidad media de población de la tribu Ara–3 andaba cercana a una DO de unos 0,04, que no es muy diferente a la de las otras tribus. Después, justo al pasar la generación 33.100, la DO de la tribu Ara–3 (y solo de esa tribu entre las doce) comenzó un despegue. Su valor se multiplicó por seis hasta alcanzar aproximadamente 0,25. Las poblaciones de los sucesivos matraces de esta tribu aumentaron. Después de solo unos pocos días la meseta típica en la que se estabilizaban los matraces de esta tribu tenía un número de DO seis veces superior al que solía tener y al que todavía mostraban las otras tribus. Era como si se hubiera inyectado una gran dosis de glucosa extra en cada matraz de la tribu Ara–3 y no se le hubiera aportado a ninguna otra tribu. Pero no era eso lo que había ocurrido. Cada matraz siguió recibiendo la misma ración de glucosa administrada escrupulosamente.



Experimento de Lenski: densidad de población

Imagen 20

¿Qué estaba pasando? ¿Qué le ocurrió tan de repente a la tribu Ara–3? Lenski y dos colegas lo investigaron más a fondo y lo descubrieron. Es una historia fascinante. Recuerde que dije que la glucosa era el recurso limitador y que cualquier mutante que «descubriera» cómo aprovechar mejor la glucosa tendría una ventaja. Eso es de hecho lo que ocurrió en la evolución de las doce tribus. Pero también dije que la glucosa no era el único nutriente en el caldo de cultivo. Otro era el citrato (relacionado con la sustancia que hace amargos los limones). El caldo contenía mucho citrato, pero *E. coli* normalmente no lo puede utilizar, al menos no cuando hay oxígeno en el agua, como era el caso en los matraces de Lenski. Pero si un mutante pudiera «descubrir» cómo aprovechar el citrato, se abriría un filón para él. Esto es exactamente lo que ocurrió con Ara–3. Esta tribu, y solo esta tribu, adquirió de repente la capacidad de alimentarse de citrato y glucosa, y no solo de glucosa. En consecuencia, la cantidad de comida disponible en cada matraz sucesivo en la secuencia se disparó. Y también lo hizo la meseta en la que se estabilizaba diariamente la población de cada matraz sucesivo.

Después de descubrir lo que tenía de especial la tribu Ara–3, Lenski y sus colegas se hicieron una pregunta aún más interesante. ¿Se debió este aumento repentino en la capacidad de obtener alimento a una única mutación espectacular, tan extraña que solo una de las doce líneas sucesorias tuvo la suerte de conseguir? ¿Fue, en otras palabras, solo el

paso de una mutación, como los que parecían demostrados en los pequeños escalones del gráfico de incremento de eficacia? A Lenski le parecía poco probable por una razón interesante. Sabiendo el ritmo de mutación medio de cada gen en el genoma de cada bacteria, calculó que treinta mil generaciones era tiempo suficiente para que todos los genes hubieran mutado al menos una vez en cada una de las doce líneas. Por tanto, parecía poco probable que fuera la rareza de la mutación lo que distinguió a Ara–3. Debería haber sido «descubierta» por otras tribus.

Había otra posibilidad teórica, y extremadamente tentadora. Aquí es donde la historia se pone complicada, por lo que, si se le ha hecho tarde, sería preferible que siguiera leyendo mañana...

¿Qué pasaría si la brujería bioquímica precisa para alimentarse del citrato necesitara no solo una mutación, sino dos o tres? No estamos hablando de dos o tres mutaciones que se construyen sobre las anteriores simplemente de forma aditiva. Si fuera así, sería suficiente con obtener las dos mutaciones en cualquier orden. Cualquiera, por sí misma, nos haría avanzar medio camino hacia el objetivo; y cualquiera, por sí misma, proporcionaría alguna capacidad para nutrirse del citrato, pero no tanto como la que proporcionarían las dos mutaciones juntas. Estaría a la par con las mutaciones que hemos comentado en relación con el incremento del tamaño del cuerpo. Pero una circunstancia así no sería lo bastante rara como para explicar la extraordinaria singularidad de la tribu Ara–3. No, la rareza del metabolismo del citrato sugiere que estamos buscando algo más parecido a la «complejidad irreducible» de la propaganda creacionista. Sería una vía metabólica en la que el producto de una reacción química alimentara a una segunda reacción, y *ninguna pudiera hacer ningún progreso sin la otra.* Esto requeriría dos mutaciones, llamémoslas A y B, para catalizar las dos reacciones. Con esta hipótesis necesitaríamos *ambas* mutaciones *antes de que hubiera alguna mejora*, y eso sería lo suficientemente improbable como para explicar el resultado observado: que solo una de las doce tribus consiguiera esa hazaña.

Todo esto es hipotético. ¿Podría haber descubierto el grupo de Lenski de modo experimental lo que en realidad estaba pasando? El caso es que consiguieron dar grandes pasos en esa dirección, haciendo un uso brillante de los «fósiles» congelados que tanto habían ayudado hasta entonces. La hipótesis, repitámoslo, es que, en algún momento desconocido, la tribu Ara–3 sufrió una mutación, la mutación A. Los efectos de esta mutación

no fueron detectados porque todavía faltaba la otra mutación necesaria, la B. Era igual de probable que la mutación B apareciera en cualquiera de las doce tribus. De hecho, es posible que lo hiciera. Pero B no es útil —no tiene en absoluto un efecto beneficioso—, a menos que la tribu hubiera sido premiada con la aparición previa de la mutación A. Y ocurrió que solo la tribu Ara–3 fue premiada de esa manera.

Lenski podía incluso haber escrito su hipótesis dándole forma de una predicción comprobable —y es interesante plantearlo así porque es realmente una predicción, aunque en cierto sentido se refiere al pasado—. Yo la hubiera planteado de esta manera, de haber sido Lenski:

> Descongelaría fósiles de la tribu Ara-3, de fechas correspondientes a varios momentos del pasado elegidos estratégicamente. Cada uno de estos «clones de Lázaro» comenzaría a evolucionar de nuevo con un régimen similar al del experimento principal, del cual serían aislados completamente. Y ahora, mi predicción. Algunos de los clones Lázaro «descubrirán» cómo aprovecharse del citrato, pero *solo* si fueron descongelados y sacados del registro fósil *después* de una generación crítica y particular del experimento original de la evolución. No sabemos —todavía— cuándo se dio la generación mágica, pero la identificaremos, en retrospectiva, como el momento en que, de acuerdo con nuestra hipótesis, la mutación A apareció en la tribu.

Le encantará saber que esto es exactamente lo que encontró un estudiante de Lenski, Zachary Blount, cuando llevó a cabo una serie de experimentos que involucraban aproximadamente a cuarenta billones —40.000.000.000.000— de bacterias *E. coli* a lo largo de generaciones. El momento mágico resultó ser aproximadamente la generación veinte mil. Los clones descongelados de Ara–3 posteriores a la generación veinte mil en el «registro fósil» mostraron una mayor probabilidad de desarrollar *posteriormente* la capacidad de metabolizar el citrato. Ningún clon anterior a la generación veinte mil lo hizo. De acuerdo con la hipótesis, después de la generación veinte mil los clones estaban «cebados» para sacar ventaja de la mutación B cuando esta llegara. Y no hubo un cambio subsiguiente en la probabilidad, en ningún sentido, cuando el «día de la resurrección» de los fósiles era posterior a la fecha mágica de la generación veinte mil; fuera cual fuese la generación después de la veinte mil tomada como prueba por Blount, la probabilidad de los fósiles para adquirir en algún

momento la capacidad de metabolizar citrato se mantenía igual. Además, para los fósiles descongelados antes de la generación veinte mil, la probabilidad de desarrollar la capacidad de metabolizar citrato era la misma que para las otras tribus. La tribu Ara–3, antes de la generación veinte mil, era igual que las demás. Aunque sus miembros pertenecieran a la tribu Ara–3, no poseían la mutación. Pero después de la generación veinte mil, la tribu Ara–3 estaba «cebada». Solo ellos eran capaces de sacar partido de la «mutación B» cuando aparecía —como ocurrió probablemente en otras tribus, pero sin efecto—. Hay momentos de gran alegría en la investigación científica, y seguro que este fue uno de ellos.

La investigación de Lenski muestra, en un microcosmos y en el laboratorio, de forma extremadamente acelerada para que pueda ocurrir delante de nuestros ojos, muchos de los componentes esenciales de la evolución por selección natural: mutación aleatoria seguida de selección natural no aleatoria; adaptación al mismo entorno independientemente por rutas separadas; acumulación de mutaciones sucesivas en los predecesores para producir un cambio evolutivo; dependencia de los genes, para sus efectos, de la presencia de otros genes. Y todo ocurriendo en una fracción del tiempo que normalmente tardaría la evolución.

Esta exitosa historia de esfuerzo científico tiene una secuela cómica: los creacionistas la odian. No solo muestra la evolución en acción; no solo muestra nueva información que penetra en los genomas sin la intervención de un diseñador, hecho que a todos les han dicho que es posible negar («dicho» porque la mayoría no entiende qué significa «información»); no solo demuestra el poder de la selección natural para provocar combinaciones de genes que, por los cálculos triviales que tanto gustan a los creacionistas, deberían ser tanto como imposibles; también mina su dogma central de «complejidad irreducible». No es de extrañar, por tanto, que estén desconcertados con la investigación de Lenski y deseosos de encontrar un error en ella.

Andrew Schlafly, editor creacionista de Conservapedia, la mendaz imitación de Wikipedia, escribió al doctor Lenski para pedirle acceso a sus datos originales, lo que presumiblemente implicaba que tenía dudas sobre su veracidad. Lenski no tenía ninguna obligación ni siquiera de responder a tan impertinente sugerencia, pero lo hizo de forma muy cortés, sugiriendo amablemente que Schlafly podría hacer el esfuerzo de leer el artículo antes de criticarlo. Lenski continuó explicándole que sus mejores

datos estaban almacenados en forma de cultivos congelados de bacterias que cualquiera podía examinar para verificar sus conclusiones. Señaló que estaría encantado de enviar muestras a cualquier bacteriólogo cualificado para manejarlas, dado que en manos no entrenadas podrían llegar a ser muy peligrosas. Lenski detalló esta cualificación con despiadado detalle y uno casi puede oír el placer con que lo hizo, sabiendo con certeza que Schlafly —un *abogado*, en absoluto un científico— apenas sería capaz de deletrear las palabras y mucho menos ejercer como bacteriólogo competente para llevar a cabo procedimientos avanzados de laboratorio, seguidos del análisis estadístico de los resultados. Todo el asunto fue resumido mordazmente en el célebre blog de PZ Myers, en un pasaje que comenzaba así: «Una vez más, Richard Lenski ha contestado a los tontos y necios de Conservapedia, y chico..., ¡cómo los ha dejado!».

Los experimentos de Lenski, especialmente los que utilizan la ingeniosa técnica de la «fosilización», muestran el poder de la selección natural para crear cambio evolutivo a una escala temporal que los humanos podemos apreciar en vida. Pero las bacterias proporcionan otros ejemplos impresionantes, aunque menos desarrollados. Muchas cepas de bacterias se han hecho resistentes a los antibióticos en periodos de tiempo espectacularmente cortos. Después de todo, el primer antibiótico, la penicilina, fue desarrollado hace relativamente poco tiempo, y en condiciones heroicas, por Florey y Chain durante la Segunda Guerra Mundial. Desde entonces se han seguido produciendo nuevos antibióticos y las bacterias han terminado por volverse resistentes a la práctica totalidad. Hoy en día, el ejemplo más inquietante es la MRSA *(Stafilococo aureous*, resistente a la meticilina), que ha conseguido que muchos hospitales sean lugares peligrosos. Otra amenaza es *C. diff. (Clostridium difficile).* De nuevo, tenemos aquí a la selección natural favoreciendo a cepas resistentes a los antibióticos; pero a este efecto hay que sumarle otro. El uso prolongado de antibióticos tiende a matar a las bacterias «buenas» del estómago, junto con las malas. *C. diff*, resistente a la mayoría de los antibióticos, se ve muy favorecida por la *ausencia* de otras especies de bacterias con las que normalmente competiría. Este es el principio de «el enemigo de mi enemigo es mi amigo».

Me molestó leer en un panfleto de la sala de espera de mi médico una advertencia sobre el peligro de no terminar los tratamientos con antibióticos. La advertencia no tenía nada de malo; pero fue la razón que

se daba lo que me preocupó. El panfleto explicaba que las bacterias son más «inteligentes»; que «aprenden» a tratar con los antibióticos. Presumiblemente los autores pensaron que el fenómeno de la resistencia a los antibióticos sería más fácil de entender si lo llamaban aprendizaje en lugar de selección natural. Pero hablar de que las bacterias se hacen más inteligentes y de «aprender» es claramente confuso y, además de eso, no ayuda al paciente a entender la recomendación de seguir tomando las pastillas hasta acabar el tratamiento. Cualquier tonto puede ver que no tiene sentido describir a una bacteria como inteligente. Incluso si hubiera bacterias inteligentes, ¿por qué terminar un tratamiento antes de tiempo supondría una diferencia en la habilidad para aprender de una bacteria más inteligente? Pero en cuanto empezamos a pensar en términos de la selección natural, todo encaja a la perfección.

Como cualquier veneno, los antibióticos dependen de la dosis. Una dosis suficientemente alta mataría a todas las bacterias. Una demasiado baja no mataría a ninguna. Una dosis intermedia mataría a algunas pero no a todas. Si hay una variación genética entre las bacterias, de tal forma que algunas son más susceptibles a los antibióticos que otras, una dosis intermedia tendrá la proporción precisa para seleccionar favorablemente los genes de la resistencia. Cuando el médico nos dice que terminemos de tomar las pastillas, es para aumentar la probabilidad de matar a *todas* las bacterias y evitar dejar con vida a las mutantes resistentes o semirresistentes. Visto en perspectiva, podríamos decir que, si hubiésemos sido mejor educados en el pensamiento darwiniano, nos habríamos dado cuenta antes de los peligros de la selección de las cepas resistentes. Panfletos como el que había en la sala de espera de mi médico no ayudan a esa educación —y qué oportunidad tristemente perdida de enseñar algo del maravilloso poder de la selección natural—.

GUPPIES

Mi colega el doctor John Endler, que se ha trasladado recientemente desde América del Norte a la Universidad de Exeter, me contó esta maravillosa —aunque deprimente— historia. Viajaba en un vuelo interior por Estados Unidos y el pasajero que estaba sentado junto a él inició una

conversación en la que mostraba su interés por lo que hacía. Endler respondió que era profesor de Biología y realizaba investigaciones en poblaciones de guppies salvajes en Trinidad. El hombre se interesó por la investigación e hizo numerosas preguntas. Intrigado por la elegancia de la teoría que parecía subyacer a los experimentos, preguntó a Endler en qué consistía y quién la introdujo originalmente. Solo entonces el doctor Endler dejó caer lo que correctamente adivinó sería una bomba: «¡Se llama la teoría de la evolución por selección natural de Darwin!». El humor del hombre cambió al instante. Su cara se puso roja; de repente se dio la vuelta y rehusó seguir la charla, poniendo fin a lo que hasta entonces había sido una conversación amigable. Incluso más que amigable: el doctor Endler me escribió para decirme que el hombre había «hecho algunas preguntas excelentes antes de eso, indicando que estaba siguiendo con entusiasmo e inteligencia el argumento. Es realmente trágico».

Los experimentos que el doctor Endler relató a su compañero de viaje, hombre de cortas miras, son atractivos y sencillos, y sirven maravillosamente para ilustrar la velocidad con la que puede funcionar la selección natural. Encaja muy bien que utilice aquí la investigación de Endler, porque él es también el autor de *Natural Selection in the Wild* [Selección natural en la vida salvaje], el libro en el que se han recogido los ejemplos de estos estudios y se han planteado sus métodos.

Los guppies son peces de agua dulce muy habituales en los acuarios. Igual que ocurre con los faisanes que encontramos en el capítulo 3, los machos tienen colores más brillantes que las hembras y los cuidadores de acuarios los han criado selectivamente para que sean todavía más brillantes. Endler estudió los guppies salvajes *(Poecilia reticulata)* que viven en los riachuelos de Trinidad, Tobago y Venezuela. Se dio cuenta de que las poblaciones locales son muy diferentes entre sí. En algunas poblaciones los machos adultos tienen los colores del arco iris, casi tan brillantes como los criados en acuarios. Supuso que sus antepasados habían sido seleccionados por las hembras. En otras zonas, los machos son mucho más grisáceos, aunque todavía más brillantes que ellas. Como las hembras, pero algo menos, todos están bien equipados para camuflarse en los fondos de grava de los riachuelos donde viven. Endler mostró, mediante elegantes comparaciones entre muchas localizaciones de Venezuela y Trinidad, que los ríos en los que los machos tenían colores menos brillantes eran también los ríos donde la depredación era mayor. En

los ríos con menos depredadores, los machos presentaban colores más brillantes, con más manchas, más grandes y llamativas: allí los machos podían desarrollar colores brillantes para atraer a las hembras. La presión de las hembras sobre los machos para desarrollar colores brillantes era una constante en todas las poblaciones, independientemente de que los depredadores empujaran en la otra dirección con más o menos fuerza. Como siempre, la evolución encuentra un compromiso entre las presiones de selección. Lo interesante de los guppies es que Endler pudo ver cómo variaba este compromiso en los diferentes ríos. Pero aún hizo mucho más. Llevó a cabo experimentos.

Supongamos que queremos plantear el experimento ideal para demostrar la evolución del camuflaje: ¿qué haríamos? Los animales camuflados se parecen al fondo sobre el que se desenvuelven. ¿Podríamos plantear un experimento en el que los animales realmente evolucionasen, delante de nuestros ojos, para parecerse al fondo que se les ha proporcionado de forma artificial? ¿Preferiblemente dos fondos con diferentes poblaciones cada uno? El objetivo es hacer algo semejante a la selección de dos líneas de plantas de maíz para alto y bajo contenido de aceite que vimos en el capítulo 3. Pero en este experimento la selección no será hecha por humanos, sino por depredadores y guppies hembra. La única cosa que separará las dos líneas experimentales son los diferentes fondos que proporcionaremos.

Tomemos dos animales de una especie con camuflaje, quizá una especie de insecto, y asignémosles dos cajas diferentes (o habitáculos o estanques o lo que sea apropiado) tomadas al azar que tengan fondos de diferente color o diferente patrón. Por ejemplo, podríamos darle a la mitad de los habitáculos un fondo verde bosque y a la otra mitad un fondo desértico, de color marrón rojizo. Tras poner a los animales en sus habitáculos verdes o marrones, los dejamos allí para que vivan y se reproduzcan durante tantas generaciones como tiempo tengamos, después de lo cual volveremos para ver si han evolucionado para parecerse a sus respectivos fondos, verde o marrón. Pero solo esperaríamos este resultado si contáramos también con depredadores. Por tanto, introduzcamos, por ejemplo, un camaleón. ¿En *todos* los habitáculos? No, por supuesto que no. Recordemos que esto es un experimento; por lo que solo introducimos un depredador en la mitad de los habitáculos verdes y en la mitad de los marrones. El experimento consistirá en probar la predicción de que, en los

habitáculos con depredador, los insectos evolucionarán hasta volverse verdes o marrones —para hacerse más parecidos a su fondo—. Pero en los habitáculos sin depredador podrían evolucionar para distinguirse más del fondo y volverse más atractivos para las hembras.

Durante mucho tiempo he deseado hacer este mismo experimento con moscas de la fruta (debido a que su ciclo reproductivo es muy corto), pero lamentablemente nunca conseguí ponerme a ello. Por eso estoy especialmente contento de poder decir que eso es justo lo que John Endler hizo, no con insectos, sino con guppies. Por supuesto, él no utilizó los camaleones como depredadores, sino un pez llamado cíclido, *Crenichla alta*, que es un peligroso depredador de estos guppies en libertad. Tampoco utilizó fondos verdes y marrones —optó por algo más interesante que eso—. Se dio cuenta de que los guppies obtienen gran parte de su camuflaje de sus manchas, a menudo bastante grandes, cuyo patrón recuerda al de los fondos con grava de sus ríos nativos. Algunos ríos tienen grava más gruesa, con cantos rodados, otros la tienen más fina, más parecida a la arena. Esos fueron los dos fondos que utilizó y estaremos de acuerdo en que el camuflaje que buscaba es más sutil e interesante que mi versión de verde frente a marrón.

Endler se hizo con un invernadero de gran tamaño para simular el mundo tropical de los guppies, e instaló diez estanques dentro. Puso grava en el fondo de los diez estanques, pero cinco de ellos tenían grava más gruesa con cantos rodados y los otros cinco tenían grava arenosa, más fina. Podemos intuir el propósito de todo esto. La predicción es que, cuando estén expuestos a una depredación muy severa, los guppies de los dos fondos diferentes comenzarán a divergir entre sí a lo largo del tiempo evolutivo, cada uno en la dirección de parecerse más a su fondo respectivo. Cuando la depredación sea débil o no exista, la predicción es que los machos deberían tender a hacerse más visibles, para atraer a las hembras.

En lugar de poner depredadores en la mitad de los estanques y dejar la otra mitad sin ellos, Endler hizo de nuevo algo más sutil. Tenía tres niveles de depredación. Dos estanques (uno con grava fina y otro con grava gruesa) carecían de depredadores. Cuatro (dos con grava fina y dos con gruesa) tenían peligrosos peces cíclidos. En los cuatro estanques restantes, Endler introdujo otra especie de pez, *Rivulus hartii*, que a pesar de su nombre en inglés, *killifish* (en realidad es poco relevante porque el nombre proviene de un tal Mr. Kille), es relativamente inocuo para los

guppies. Es un «depredador débil», mientras que el cíclido es un «depredador fuerte». La presencia del «depredador débil» supone una condición de control mejor que la de ningún depredador. Esto es así porque, como Endler explica, había intentado simular las condiciones naturales y no conocía ningún río natural que estuviera totalmente libre de depredadores: por tanto, la comparación entre depredación fuerte y débil es una comparación más natural.

Por tanto, veamos cómo queda el escenario: los guppies se asignan aleatoriamente a los diez estanques, cinco con grava gruesa y cinco con grava fina. Las diez colonias de guppies pueden procrear libremente durante seis meses sin depredadores. En ese punto comienza el experimento propiamente dicho. Endler colocó un «depredador fuerte» en dos estanques con grava gruesa y en dos con grava fina. Puso seis «depredadores débiles» (seis en lugar de uno para recrear de forma más fidedigna las densidades relativas de los tipos de peces en su entorno natural) en dos estanques con grava gruesa y en dos con grava fina. Y los demás estanques se mantuvieron como estaban, sin depredadores.

Después de haber tenido en marcha el experimento durante cinco meses, Endler realizó un censo de los estanques y contó y midió las manchas de los guppies de todos ellos. Nueve meses más tarde, es decir, después de que pasaran catorce meses en total, llevó a cabo otro censo, contando y midiendo de la misma forma. ¿Y cuáles fueron los resultados? Incluso después de tan poco tiempo resultaron espectaculares. Endler utilizó varias medidas de patrones de color de los peces, una de las cuales era «manchas por pez». Cuando se puso a los guppies en sus estanques, antes de introducir los depredadores, había un rango muy grande en el número de manchas, porque los peces provenían de una gran variedad de riachuelos con contenido muy variable en depredadores. Presumiblemente esto sucedía en respuesta a la selección por parte de las hembras. Después, cuando se introdujeron los depredadores, hubo un cambio drástico. En los cuatro estanques que tenían depredadores peligrosos, el número medio de manchas cayó en picado. La diferencia se hizo ya evidente en el censo de los cinco meses, y el número de manchas disminuyó aún más en el de los catorce meses. Pero en los estanques sin depredadores y en los cuatro estanques con depredación débil, el número de manchas continuó aumentando. Alcanzó una meseta en el censo de los cinco meses y se mantuvo ahí en el de los catorce. Con respecto al número de manchas, la

depredación débil parece ser muy parecida a la no depredación, y resulta aventajada por la selección sexual de las hembras, que prefieren muchas manchas.

Todo ello en relación con el número de manchas. El tamaño de las manchas nos cuenta una historia igualmente interesante. En presencia de depredadores, débiles o fuertes, la grava gruesa incentivó manchas relativamente más grandes, mientras que la grava fina favoreció manchas relativamente más pequeñas. Cabe interpretar esto fácilmente como que el tamaño de las manchas imita al tamaño de las piedras. Es fascinante que, sin embargo, en los estanques en los que no había depredadores, Endler descubrió exactamente lo contrario. La grava fina favorecía grandes manchas en guppies machos y la grava gruesa favorecía manchas pequeñas. Son más llamativos si *no* imitan a las piedras de sus fondos respectivos, y eso es bueno para atraer a las hembras. ¡Fantástico!

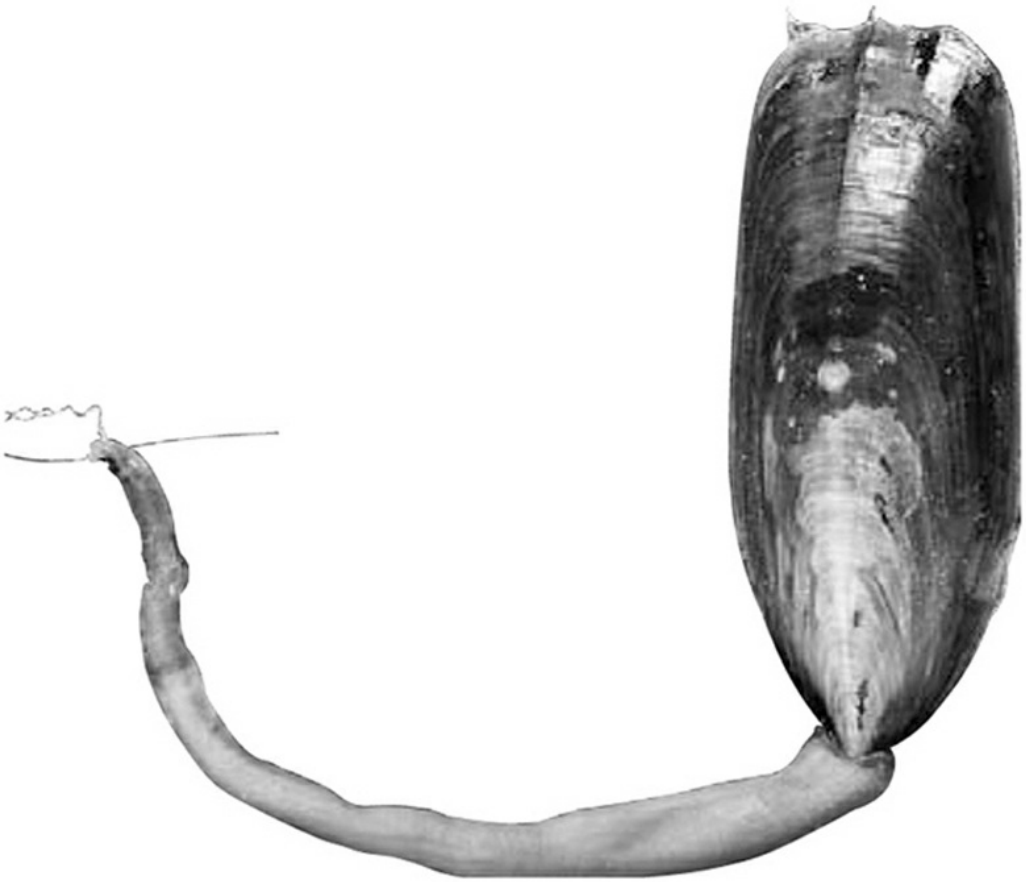
Todo esto está muy bien, pero todo ocurrió en el laboratorio. ¿Podría obtener Endler resultados similares en condiciones naturales? Sí. Fue a un río que contenía al peligroso cíclido y en el que los guppies macho eran relativamente poco llamativos. Capturó guppies de ambos sexos y los llevó a un afluente del río en el que no había guppies ni depredadores peligrosos, aunque estaba presente el depredador débil *Rivulus*. Los dejó allí para que siguieran viviendo y reproduciéndose, y se fue. Veintitrés meses más tarde volvió y reexaminó los guppies para ver qué había sucedido. Sorprendentemente, después de menos de dos años, los machos se habían desplazado considerablemente hacia la adquisición de un colorido más brillante —empujados por las hembras, sin duda, y liberados para moverse hacia allí por la ausencia de depredadores peligrosos—.

Una de las cosas buenas de la ciencia es que es una actividad pública. Los científicos publican sus métodos, así como sus conclusiones, lo que significa que cualquiera, en cualquier parte del mundo, puede repetir su trabajo. Si no obtienen los mismos resultados, queremos saber la razón. Normalmente no solo repiten el trabajo previo, sino que lo extienden: lo llevan más lejos. La brillante investigación de John Endler sobre los guppies estaba pidiendo ser continuada y extendida. Entre los que se han decidido a hacerlo, se encuentra David Reznick, de la Universidad de California en Riverside.

Nueve años después de que Endler tomara muestras en su río experimental con tan espectaculares resultados, Reznick y sus colegas volvieron al lugar y tomaron muestras de los descendientes de la población experimental de Endler. Los machos tenían ahora colores muy brillantes. La tendencia dirigida por las hembras que Endler observó había continuado con ahínco. Y eso no era todo. ¿Se acuerda de los zorros plateados del capítulo 3 y de cómo la selección artificial de una característica (docilidad) arrastró consigo a todo un grupo de otras: cambios en la estación de cría, en las orejas, en la cola, en el color del pelo y otras cosas? Pues bien, algo similar ocurrió con los guppies bajo la selección natural.

Reznick y Endler ya se habían dado cuenta de que cuando se comparan guppies de ríos infestados de depredadores con guppies de ríos con solo depredación débil, las diferencias de color son apenas la punta del iceberg. Existe todo un conjunto de diferencias. Los guppies de baja depredación alcanzan la madurez sexual más tarde que aquellos que viven en ríos de alta depredación, y son más grandes cuando alcanzan la madurez; producen camadas con menor frecuencia, y estas son menos numerosas pero con individuos más grandes. Cuando Reznick examinó a los descendientes de los guppies de Endler, lo que descubrió fue casi demasiado bueno como para ser cierto. Los que habían sido liberados para seguir la selección sexual dirigida por las hembras, en lugar de la selección individual dirigida por los depredadores, no solo tenían colores más brillantes: estos peces habían evolucionado en los otros aspectos que he comentado hasta igualarse con las poblaciones salvajes libres de depredadores. Los guppies maduraban a una edad más tardía que en los ríos infestados de depredadores, eran más grandes y producían camadas con menos descendientes y de mayor tamaño. El balance se había desplazado hacia la norma de las poblaciones libres de depredadores, donde el atractivo sexual es prioritario. Y todo ocurrió extraordinariamente rápido para los estándares evolutivos. Más adelante, veremos en el libro que el cambio evolutivo del que fueron testigos Endler y Reznick, dirigido solo por la selección natural (incluyendo estrictamente la selección sexual), se desarrolló a una velocidad comparable con la conseguida por selección artificial de animales domésticos. Es un ejemplo espectacular de evolución delante de nuestros propios ojos.

Una de las cosas sorprendentes que hemos aprendido sobre la evolución es que puede ser muy rápida —como hemos visto en este capítulo—, y bajo otras circunstancias, como sabemos por el registro fósil, muy lenta. La más lenta de todas es la de aquellos organismos que llamamos «fósiles vivientes». No son traídos de vuelta a la vida como las bacterias congeladas de Lenski, pero son criaturas que han cambiado tan poco desde sus antepasados remotos que es casi como si fueran fósiles.

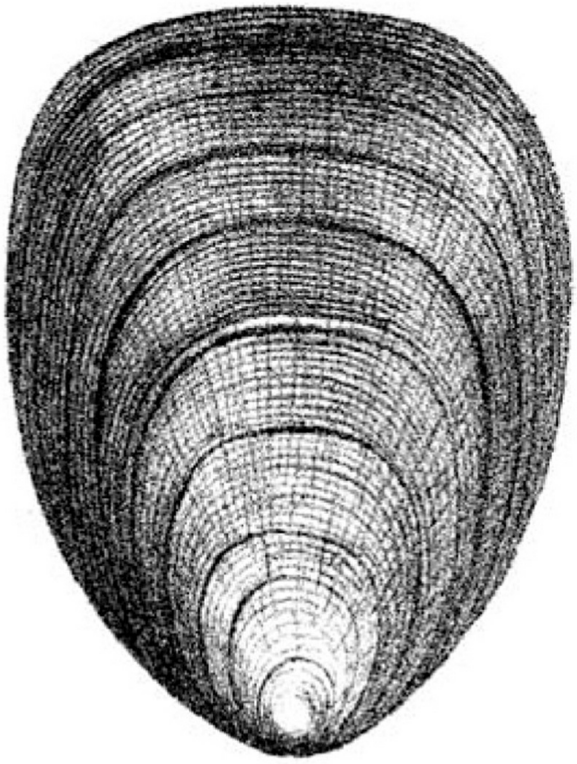


Lingula

Imagen 21

Mi fósil viviente favorito es el braquiópodo *Lingula*. No es necesario que sepan qué es un braquiópodo. Los braquiópodos habrían sido seguramente un alimento básico del menú si los restaurantes de pescado se hubieran puesto de moda antes de la primera extinción del Pérmico, hace doscientos cincuenta millones de años —la mayor extinción catastrófica de todos los tiempos—. A simple vista parecen moluscos bivalvos —

mejillones y sus parientes—, pero realmente son muy diferentes. Sus dos conchas se sitúan arriba y abajo, mientras que las conchas de los mejillones están a izquierda y derecha. En la historia evolutiva, los bivalvos y los braquiópodos eran, tal y como Stephen Jay Gould dijo memorablemente, barcos que se cruzan en la noche. Unos pocos braquiópodos sobrevivieron a la «Gran Extinción» (expresión de Gould, de nuevo), y los *Lingula* modernos son tan similares a los *Lingulella*, el fósil de la imagen siguiente, que originalmente se les dio el mismo nombre genérico, *Lingula*. Este espécimen en particular de *Lingulella* es del Ordovícico, de hace cuatrocientos cincuenta millones de años. Pero hay fósiles, también llamados *Lingula* y ahora conocidos como *Lingulella*, que son de hace más de quinientos millones de años y pertenecen al Cámbrico. Debo admitir, no obstante, que una concha fosilizada no es mucho con lo que trabajar, y algunos zoólogos discuten la reivindicación de que *Lingula* sea un «fósil viviente» que casi no ha cambiado.



Lingulella, casi idéntico a sus parientes modernos

Imagen 22

Muchos de los problemas que encontramos en la argumentación evolutiva son consecuencia de que los animales son tan poco considerados que pueden evolucionar a diferentes ritmos, y podrían ser incluso tan poco considerados como para no evolucionar en absoluto. Si hubiese una ley de la naturaleza que dijera que la cantidad de cambio evolutivo debería ser obligatoriamente proporcional al tiempo transcurrido, el grado de parecido reflejaría fielmente la cercanía del parentesco. En el mundo real, sin embargo, tenemos que lidiar con velocistas evolutivos como los pájaros, que dejan sus orígenes de reptil todavía frescos en el polvo del Mesozoico —ayudados, según nuestra percepción de su singularidad, por la casualidad de que sus vecinos en el árbol evolutivo fueron todos eliminados por una catástrofe celestial—. Y en el otro extremo, tenemos que lidiar con «fósiles vivientes» como *Lingula* que, en casos extremos, han cambiado tan poco que casi podrían aparearse con sus antepasados remotos si una máquina del tiempo les organizara una cita.

Lingula no es el único ejemplo famoso de fósil viviente. También está *Limulus*, el «cangrejo» de herradura y el celacanto, al que conoceremos en el próximo capítulo.

6

¿EL ESLABÓN PERDIDO? ¿QUÉ SIGNIFICA «PERDIDO»?

Los creacionistas están profundamente enamorados del registro fósil porque han aprendido (unos de otros) a repetir, una y otra vez, el mantra de que está lleno de «saltos»: «¡Muéstrame tus "especímenes intermedios"!». Imaginan ingenuamente (muy ingenuamente) que estos «saltos» son un problema para los evolucionistas. Realmente es una suerte disponer de algún fósil, más aún de la enorme cantidad que ahora tenemos para documentar la historia evolutiva —buena parte de los cuales, bajo cualquier estándar, constituyen maravillosos «especímenes intermedios»—. Insistiré en los capítulos 9 y 10 en que no necesitamos fósiles para demostrar que la evolución es un hecho. La evidencia de la evolución estaría completamente a salvo incluso si no se hubiera fosilizado ni un solo cadáver. La existencia de grandes filones de fósiles para excavar es un auténtico regalo, y cada día se descubren más. La evidencia fósil de la evolución en muchos grupos principales de animales es singularmente fuerte. Sin embargo, hay, por supuesto, saltos, y los creacionistas se agarran a ellos de manera obsesiva.

Hagamos uso otra vez de nuestra analogía del detective que llega a la escena de un crimen del que no hay testigos oculares. Han disparado al baronet [27]. Huellas dactilares, huellas de pisadas, ADN de una mancha de sudor en la pistola y un móvil claro: todo apunta hacia el mayordomo. Es un caso abierto y cerrado, y el jurado y todo el tribunal están convencidos de que lo hizo el mayordomo. Pero se descubre una prueba en el último minuto, justo antes de que el jurado se retire a deliberar lo que parece ser un veredicto inevitable de culpabilidad: alguien recuerda que el baronet había instalado una cámara de seguridad. Con la respiración contenida, el tribunal ve las cintas. Una de ellas muestra al mayordomo abriendo un cajón de su despensa, sacando una pistola, cargándola y

saliendo silenciosamente de la habitación con una mirada maligna en sus ojos. Podríamos pensar que esto refuerza las sospechas sobre la culpabilidad del mayordomo. Pero esperemos al desenlace. El abogado defensor del mayordomo señala astutamente que no había cámara espía en la biblioteca, donde tuvo lugar el asesinato, y no había cámara espía en el pasillo que conducía hasta la despensa del mayordomo. Mueve su dedo, de esa forma tan convincente que los abogados han hecho propia: «¡Hay un *salto* en la grabación del vídeo! No sabemos qué ocurrió después de que el mayordomo saliera de la despensa. La prueba es claramente insuficiente para condenar a mi cliente».

El fiscal señala en vano la existencia de una segunda cámara en la sala de billar que muestra, a través de la puerta abierta, al mayordomo, pistola en mano, deslizándose de puntillas por el pasillo en dirección a la biblioteca. ¿Debería esto rellenar el salto en la grabación del vídeo? ¿Podría considerarse ahora el caso contra el mayordomo sólidamente probado? Pues no. El abogado defensor juega sus cartas triunfalmente. «No sabemos lo que ocurrió antes o después de que el mayordomo pasara junto a la puerta abierta de la sala de billar. Ahora hay dos *saltos* en el vídeo. Señoras y señores del jurado, mi argumento se sostiene. Ahora hay incluso menos pruebas en contra de mi cliente de las que había antes».

El registro fósil, como la cámara espía en la historia del asesinato, es una *bonificación*, algo que no podemos esperar como un derecho. Ya hay pruebas más que suficientes para condenar al mayordomo sin la cámara espía, y el jurado iba a emitir un veredicto de culpabilidad antes de que dicha cámara fuese descubierta. De forma similar, hay pruebas suficientes sobre el hecho de la evolución en el estudio comparativo de las especies modernas (capítulo 10) y su distribución geográfica (capítulo 9). No *necesitamos* los fósiles, el argumento a favor de la evolución se sostiene sin ellos; por tanto, es paradójico utilizar los *saltos* en el registro fósil como si fueran pruebas en contra de la evolución. Tenemos, como digo, suerte de disponer de algún fósil.

Una prueba en contra de la evolución, y muy evidente, sería el descubrimiento de, al menos, un fósil en el estrato geológico equivocado. Ya he comentado esto en el capítulo 4. Cuando le pidieron que nombrara una observación que refutase la teoría de la evolución, J. B. S. Haldane contestó: «¡Conejos fósiles en el Precámbrico!». Nunca se han encontrado esos conejos, ni fósiles auténticamente anacrónicos de ningún tipo. Todos

los fósiles de que disponemos, y realmente hay muchos, se localizan, sin una sola excepción verificada, en la secuencia temporal correcta. Sí, hay saltos cuando no hay fósiles de ningún tipo, y eso es lo que cabría esperar. Pero ni un solo fósil ha sido encontrado *antes* de cuando podía haber vivido. Este es un hecho muy convincente (y no hay razón por la que pudiéramos esperarlo en la teoría creacionista). Como mencioné brevemente en el capítulo 4, una buena teoría, una teoría científica, es aquella que resulta vulnerable a la refutación, y aun así, no ha sido refutada. La evolución podría ser fácilmente refutada si apareciera un solo fósil en el orden temporal incorrecto. Sin embargo, ha pasado esta prueba con muy buena nota. Los escépticos que deseen probar su argumento deberían excavar pacientemente en las rocas intentando hallar por todos los medios fósiles anacrónicos. Quizá encuentren alguno. ¿Alguien quiere apostar?

El mayor salto y el que más gusta a los creacionistas es el que precedió a la llamada Explosión Cámbrica. Hace poco más de quinientos millones de años, en el Cámbrico, la mayoría de los grandes filos animales —las principales divisiones dentro del mundo animal— aparecen «repentinamente» en el registro fósil. «Repentinamente» quiere decir que no se conocen fósiles de estos grupos animales en rocas más antiguas que el Cámbrico; el término no se emplea con el sentido de «instantaneidad»: el periodo del que estamos hablando cubre unos veinte millones de años. Veinte millones de años parece poco cuando hablamos de hace quinientos millones de años. ¡Pero representa exactamente la misma cantidad de tiempo para la evolución que veinte millones de años en la actualidad! De cualquier forma, es bastante repentino, y como comenté en un libro anterior, el Cámbrico nos muestra un número considerable de filos de animales importantes:

> [...] ya en un estado avanzado de evolución la primera vez que aparecen. Es como si estuvieran ahí plantados, sin ninguna historia evolutiva. No hace falta decir que esta idea de plantaciones repentinas ha encantado a los creacionistas.

La última frase muestra que estuve suficientemente alerta como para darme cuenta de que a los creacionistas les gustaría la Explosión Cámbrica; pero (en 1986) no estuve lo bastante despierto como para advertir que citarían alegremente estas líneas en mi contra y en su propio

beneficio, una y otra vez, omitiendo de forma intencionada mis cuidadosas palabras de explicación. Por capricho busqué en la red la frase «Es como si estuvieran ahí plantados, sin ninguna historia evolutiva», y obtuve no menos de 1.250 coincidencias. Como prueba muy elemental de la hipótesis de que la mayoría de estas coincidencias representan citas tergiversadas, busqué por comparación la frase que sigue inmediatamente al texto anterior en *El relojero ciego*: «Los evolucionistas de todo tipo creen, sin embargo, que esto realmente representa un salto muy grande en el registro fósil». Obtuve un total de 63 coincidencias, frente a las 1.250 de la frase anterior. La razón entre 1.250 y 63 es 19,8. Podríamos llamar a esta razón el Índice de Tergiversación de Citas.

He escrito en profundidad sobre la Explosión Cámbrica, especialmente en *Destejiendo el arco iris.* Aquí solo añadiré un argumento, ilustrado por los gusanos planos Platelmintos. Este gran filo de gusanos incluye a los trematodos y las tenias, que son de gran importancia médica. Mis favoritos, sin embargo, son los gusanos turbelarios de vida autónoma, de los cuales hay más de cuatro mil especies: eso es tanto como todas las especies de mamíferos juntas. Algunos de estos turbelarios son criaturas de gran belleza, como muestran los dos especímenes de la ilustración. Son frecuentes, tanto en el agua como en la tierra, y presumiblemente lo han sido durante mucho tiempo. Cabría esperar, por tanto, ver una rica historia fósil. Por desgracia no hay casi nada. Como gusanos, los Platelmintos «están ya en un estado evolutivo avanzado la primera vez que aparecen. Es como si hubieran sido puestos allí sin ninguna historia evolutiva». Pero en este caso, «la primera vez que aparecen» no es en el Cámbrico, sino en la actualidad. ¿Entienden lo que esto significa, o al menos lo que debería significar, para los creacionistas? Los creacionistas piensan que los gusanos planos fueron creados en la misma semana que las demás criaturas. Han tenido, por tanto, exactamente el mismo tiempo para fosilizarse que los otros animales. Durante todos los siglos en que esos animales con huesos o conchas depositaban sus fósiles por miles, los gusanos planos habrían vivido felizmente junto a ellos, pero sin dejar ninguna huella significativa de su presencia en las rocas. ¿Entonces, qué es lo verdaderamente especial de los saltos en el registro de los animales que se *fosilizan,* dado que la historia pasada de los gusanos planos se reduce a *un gran salto,* aun cuando los gusanos planos, según la versión de los creacionistas, han estado vivos ese mismo periodo de

tiempo? Si se utiliza el salto previo a la Explosión Cámbrica como evidencia de que la mayoría de los animales comienza a existir de repente en el Cámbrico, exactamente la misma «lógica» debería ser utilizada para pensar que los gusanos planos comenzaron a existir ayer. Esto contradice la idea creacionista de que los gusanos planos fueron creados durante la misma semana que todo lo demás. No se pueden mantener las dos cosas. Este razonamiento destruye de un golpe el argumento creacionista de que el salto precámbrico en el registro fósil debilita la evidencia a favor de la evolución.

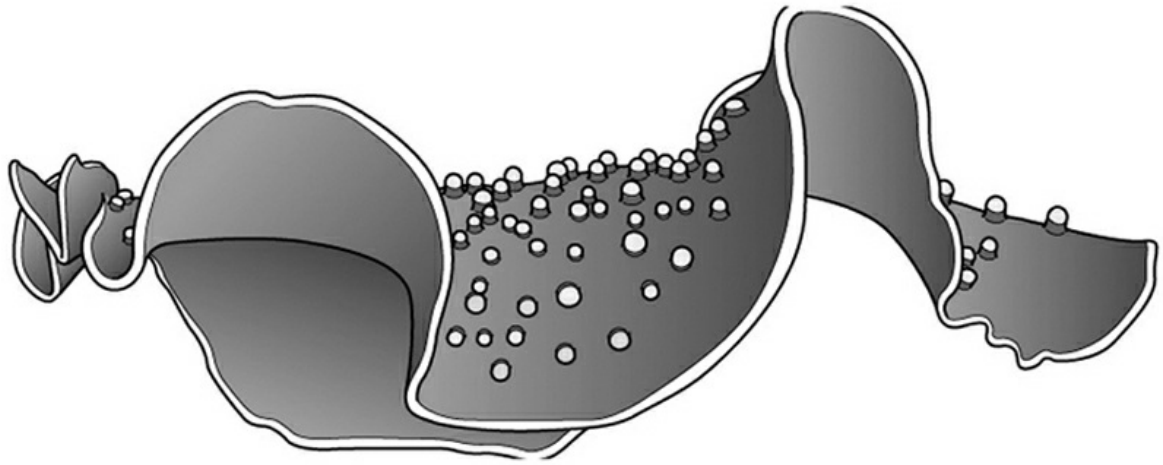


Imagen 23

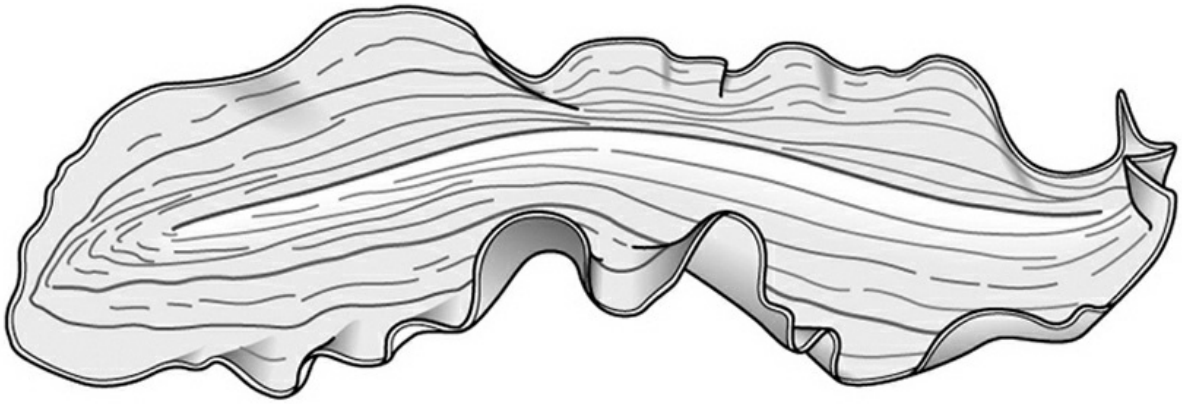


Imagen 24

Turbelarios: sin registro fósil, aunque deben de haber existido durante mucho tiempo

¿Por qué, desde el enfoque evolutivo, hay tan pocos fósiles antes de la era cámbrica? Bien, presumiblemente los factores que incidieron sobre los gusanos planos a lo largo del tiempo geológico hasta nuestros días también lo hicieron sobre el resto del reino animal antes del Cámbrico. Es probable que, antes de esta era, la mayoría de los animales tuvieran el cuerpo blando como los gusanos planos modernos, posiblemente también eran pequeños como los turbelarios modernos —no buen material para fosilizar—. Después, algo ocurrió hace quinientos millones de años que permitió a los animales que se fosilizaran libremente —la aparición de esqueletos duros mineralizados, por ejemplo—.

Antiguamente, el «salto en el registro fósil» se conocía como el «eslabón perdido». Tal denominación estuvo de moda en el último periodo de la Inglaterra victoriana y persistió hasta el siglo XX. Inspirada por un malentendido de la teoría de Darwin, fue utilizada como un insulto, más o menos de la misma forma en que se emplea hoy en día de modo coloquial (e injustamente) el término «neandertal». Entre la lista de citas representativas del *Oxford English Dictionary*, hay una de 1930 en la que D. H. Lawrence habla de una mujer que le escribió diciendo que su nombre «apestaba», y que continuaba con la frase siguiente: «Usted, que es una mezcla del eslabón perdido y del chimpancé».

El significado original, equivocado como demostraré ahora, implicaba que la teoría de Darwin carecía de un enlace vital entre los humanos y otros primates. Otra de las citas ilustrativas del diccionario, una victoriana, dice así: «He oído hablar de un eslabón perdido entre los hombres y los puggies» («puggie» es una palabra dialectal escocesa que significa ‘mono’). En la actualidad, los negadores de la historia se sienten muy orgullosos al decir, en lo que ellos imaginan que es un tono de voz burlón: «¿Pero todavía no han encontrado el eslabón perdido?». Y a menudo lanzan una pulla sobre el Hombre de Piltdown, para completar la broma. Nadie sabe quién inventó el fraude de Piltdown, pero tendría mucho a lo que responder [28]. El hecho de que uno de los primeros fósiles de hombre-mono que se descubrieron resultara ser un fraude proporcionó una excusa a los negadores de la historia para ignorar los numerosos fósiles que no son fraudulentos; y todavía no han dejado de pavonearse de ello. Si miraran a los hechos, pronto descubrirían que ahora tenemos un suministro rico de fósiles intermedios que enlazan a los humanos modernos con el antepasado común que compartimos con los

chimpancés. En el lado humano de la división, claro está. Sorprendentemente no hay todavía fósiles que relacionen a ese antepasado (que no era ni humano ni chimpancé) con los chimpancés modernos. Quizá porque los chimpancés viven en bosques que no proporcionan buenas condiciones de fosilización. Si hay alguien que deba quejarse hoy en día por los eslabones perdidos, son los chimpancés, y no los humanos.

Ese es, por tanto, uno de los significados de «eslabón perdido». Es el supuesto salto entre los humanos y el resto del reino animal. El eslabón perdido en ese sentido no está ya «perdido», por decirlo suavemente. Volveré sobre esto en el próximo capítulo, que está dedicado de manera específica a los fósiles humanos.

Otro significado hace referencia a la supuesta penuria de las llamadas «formas transicionales» entre los grupos principales: entre reptiles y pájaros, por ejemplo, o entre peces y anfibios. «¡Produzca sus especímenes intermedios!». Los evolucionistas a menudo responden a este desafío de los negadores de la historia «lanzándoles» los huesos del *Archaeopteryx*, el famoso «espécimen intermedio» entre los «reptiles» y las aves. Eso es un error, como mostraré a continuación. El *Archaeopteryx* no es la respuesta a ese desafío porque no hay un desafío que merezca ser respondido. Utilizar un único fósil famoso como el *Archaeopteryx* conduce a una falacia. De hecho, de un gran número de fósiles se puede decir que cada uno de ellos es un espécimen intermedio entre algo y otra cosa. El supuesto desafío que parece ser respondido por el *Archaeopteryx* está basado en una noción anticuada, la que se conocía como Gran Cadena del Ser; y ese es el título bajo el que hablaré de ello más tarde, en este mismo capítulo.

Lo más absurdo de todos estos desafíos sobre el «eslabón perdido» son las siguientes dos afirmaciones (o las muy numerosas variantes de ellas). Primera: «Si la gente viene de los monos a través de las ranas y los peces, entonces ¿por qué el registro fósil no contiene un “mono-rana”?». He visto a un creacionista islámico preguntar agresivamente por qué no hay «coco-patos». Y segunda: «Creeré en la evolución cuando vea a un mono dar a luz a un bebé humano». Esta cae en el mismo error que todas las restantes, y añade además el de pensar que un cambio evolutivo muy importante puede ocurrir de un día para otro.

Al parecer, estas dos falacias aparecen una al lado de la otra en la larga lista de comentarios que siguieron a un artículo del *Sunday Times* de Londres acerca de un documental televisivo sobre Darwin que presenté yo

mismo:

> La opinión de Dawkins sobre la religión es absurda, ya que la Evolución no es más que una religión en sí misma —tenemos que creer que todos venimos de una única célula... y que un caracol puede convertirse en un mono, etc. ¡Ja, ja!—. ¡Es la religión más ridícula de todas!
>
> *Joyce, Warwickshire, Reino Unido*

> Dawkins debería explicar por qué la ciencia no ha podido encontrar los eslabones perdidos. La fe en la ciencia infundada es más un cuento de hadas que la fe en Dios.
>
> *Bob, Las Vegas, EE.UU.*

En este capítulo hablaremos sobre todas estas falacias, comenzando por la más tonta de todas, ya que la respuesta servirá como introducción para el resto.

«¡MOSTRADME VUESTRO "COCO-PATO"!»

«¿Por qué el registro fósil no contiene un mono-rana?». Bien, por supuesto que los monos no descienden de las ranas. Ningún evolucionista en su sano juicio dijo que lo hicieran, o que los patos descienden de los cocodrilos o viceversa. Los monos y las ranas comparten un antepasado que, ciertamente, no se parecía en nada a una rana ni a un mono. Quizá se parecía un poco a una salamandra, y sí tenemos fósiles de esa época parecidos a las salamandras. Pero esa no es la cuestión. Cada una de las millones de especies de animales comparte un antepasado con todas las demás. Si la comprensión que tenemos de la evolución es tan retorcida que creemos que debería haber un mono-rana o un coco-pato, también deberíamos volvernos sarcásticos por la ausencia de perro-pótamos o de elef-pancés. De hecho, ¿por qué limitarnos a los mamíferos? ¿Por qué no un cangur-racha (intermedio entre canguro y cucaracha) o un pulpo-pardo (intermedio entre un pulpo y un leopardo)? Hay un número infinito de nombres de animales que se pueden encadenar de esa forma [29]. Por supuesto, los hipopótamos no descienden de los perros o viceversa. Los

chimpancés no descienden de los elefantes o viceversa, igual que los monos no descienden de las ranas. Ninguna especie moderna desciende de ninguna otra (si excluimos algunas separaciones recientes). De la misma forma que se pueden encontrar fósiles que se aproximan al antepasado común de las ranas y de los monos, se pueden encontrar fósiles que se aproximan al antepasado común de los elefantes y de los chimpancés. Podemos ver uno llamado *Eomaia* que vivió al principio del periodo cretácico, hace un poco más de cien millones de años.

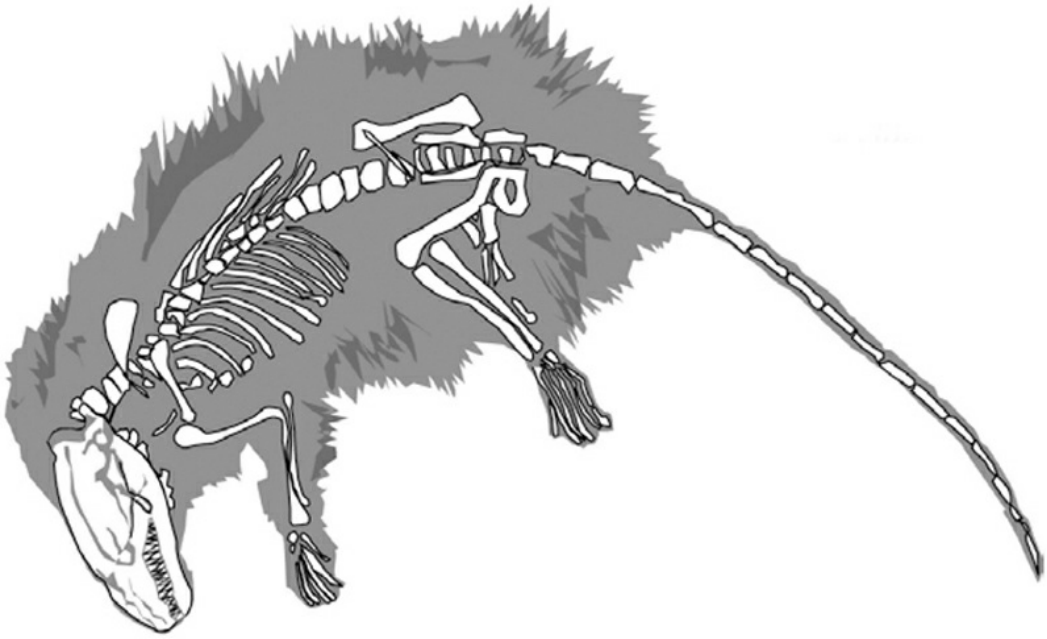


Imagen 25 (Ilusraciones en el texto) Imagen 25 (Créditos Individuales)

Eomaia

Evidentemente, *Eomaia* no se parece en nada a un chimpancé ni a un elefante. Ligeramente parecido a una musaraña, es probable que fuera muy similar al antepasado común de ambos, del que fue más o menos contemporáneo, y se puede ver que ha habido un gran cambio evolutivo a lo largo de los caminos que van desde el antepasado tipo *Eomaia* hasta el elefante, y desde el mismo antepasado tipo *Eomaia* hasta el chimpancé. Pero en ningún sentido es un elef-pancé. Si lo fuera, también tendría que haber un perro-natí, porque cualquiera que sea el antepasado común de un chimpancé y un elefante, también lo es de un perro y de un manatí. Y también tendría que haber un cerdo-pótamo hormiguero porque el mismo

antepasado es también el antepasado común de un cerdo hormiguero y de un hipopótamo. La idea misma de un perro-natí (o de un elef-pancé, o de un cerdo-pótamo hormiguero, o de un canga-ceronte o de un bufa-león) es profundamente antievolutiva y ridícula. También lo es un mono-rana y es una desgracia que el responsable de esta tontería, el predicador itinerante australiano John Mackay, haya estado recorriendo los colegios británicos en 2008 y 2009, disfrazado de «geólogo» y enseñando a niños inocentes que si la evolución fuese cierta el registro fósil debería contener monos-rana.

Un ejemplo igual de ridículo se puede encontrar en un libro magníficamente producido, brillantemente ilustrado y enormemente fatuo e ignorante del apologista musulmán Harun Yahya, *El atlas de la creación*. Es obvio que editar este libro cuesta una fortuna, lo que hace aún más increíble que fuera distribuido gratis a decenas de miles de profesores de ciencia, incluyéndome a mí. A pesar de la enorme cantidad de dinero gastado en él, los errores que contiene se hicieron legendarios. Intentando ilustrar la falsedad de que la mayoría de los fósiles antiguos son indistinguibles de sus homólogos modernos, Yahya muestra una serpiente como una anguila (dos animales tan diferentes que están situados en distintas clases de vertebrados), una estrella de mar como una «ofiura de espinas finas» (realmente, diferentes clases de equinodermos), un gusano sabellida (anélido) como un «lirio de mar crinoideo» (un equinodermo: estos dos no solo provienen de diferentes filos, sino de diferentes subreinos, por lo que difícilmente podrían estar más distantes entre sí, aunque se intentara, siendo ambos animales) y —lo mejor de todo— un cebo de pesca como un «tricóptero» (véase página en color 8[c]). Pero además de estos ridículos ejemplos, el libro tiene una sección sobre los eslabones perdidos. Con total seriedad se incluye una fotografía para ilustrar el hecho de que no hay una forma intermedia entre un pez y una estrella de mar. En mi opinión, el autor no puede pensar que los evolucionistas esperan encontrar una transición entre dos animales tan diferentes como una estrella de mar y un pez. Por tanto, no puedo evitar sospechar que él conoce a su audiencia muy bien y que está aprovechándose deliberada y cínicamente de su ignorancia.

Creeré en la evolución cuando un mono dé a luz un bebé humano

Lo diré una vez más, los humanos no descienden de los monos. Compartimos un antepasado común con ellos. Resulta que el antepasado común se parecería mucho más a un mono que a un hombre, y lo habríamos llamado probablemente «mono» si nos lo hubiésemos encontrado hace veinticinco millones de años. Pero aunque los humanos hayan evolucionado de un antepasado que llamaríamos sensatamente «mono», ningún animal da a luz de forma instantánea a nuevas especies, o al menos a ninguna tan diferente de sí misma como lo es un hombre de un mono, o incluso de un chimpancé. No es de eso de lo que trata la evolución. De hecho, la evolución no solo es un proceso gradual; *tiene* que ser gradual si quiere hacer un trabajo de exploración. Los saltos enormes en una sola generación —así cabría considerar que un mono diese a luz a un hombre— son casi tan irrealizables como la creación divina, y están descartados por la misma razón: demasiado improbables desde un punto de vista estadístico. Estaría bien que todos aquellos que se oponen a la evolución se molestasen un poco en aprender los rudimentos básicos de aquello a lo que se oponen.

El pernicioso legado de la Gran Cadena del Ser

Detrás de gran parte de las demandas de «eslabones perdidos» hay un mito medieval, que ocupaba las mentes de los hombres justo hasta la época de Darwin y las confundió pertinazmente a partir de entonces. Es el mito de la Gran Cadena del Ser, según el cual todo el Universo descansa sobre una escalera, con Dios en la parte más alta, luego los arcángeles, luego varios rangos de ángeles, luego los seres humanos, luego los animales, luego las plantas y luego las piedras y otras creaciones inanimadas. Dado que esto procede de una época en la que el racismo era normal, no necesito añadir que no todos los seres humanos estaban sentados en el mismo peldaño. ¡Oh, no! Y por supuesto los machos estaban un peldaño por encima de las hembras de su clase (que es la razón por la que escribí «ocupaba las mentes de los *hombres»* en la frase inicial de esta sección).

Pero fue la supuesta jerarquía dentro del reino animal la que tuvo mayor capacidad para enturbiar las aguas cuando entró en escena la idea de la evolución. Parecía natural suponer que los animales «inferiores» evolucionaron hacia animales «superiores». Si esto fuera así, deberíamos esperar ver «eslabones» entre ellos, en todo el recorrido hacia arriba y hacia abajo de la «escalera». Una escalera en la que faltan muchos peldaños no es convincente. Es esta imagen de una escalera sin escalones la que se esconde detrás de gran parte del escepticismo sobre los «eslabones perdidos». Pero el mito de la escalera completa está profundamente mal planteado y es antievolutivo, como mostraré ahora.

Las denominaciones «animales superiores» y «animales inferiores» se nos escapan tan fácilmente de la boca que sorprende darse cuenta de que, lejos de encajar con naturalidad en el pensamiento evolutivo, como uno podría suponer, eran, y son, profundamente antitéticas con él. Pensamos que sabemos que los chimpancés son animales superiores y las lombrices inferiores, pensamos que siempre hemos sabido lo que esto significa, y pensamos que la evolución lo evidencia de forma aún más clara. Pero no lo hace. No está en absoluto claro lo que significa. O, si significa algo, significa tantas cosas diferentes que es desorientador, e incluso pernicioso.

Esta es una lista de las cosas más o menos confusas que se podrían querer expresar cuando se dice, por ejemplo, que un mono es «superior» a una lombriz:

1. *Los monos evolucionaron a partir de las lombrices.* Esto es falso, igual que es falso que los humanos evolucionaron de los chimpancés. Los monos y las lombrices comparten un antepasado común.
2. *El antepasado común de los monos y de las lombrices se parecía más a una lombriz que a un mono*. Bien, eso tiene potencialmente más sentido. Podríamos incluso utilizar la palabra «primitivo» de una forma casi precisa, si le damos el significado de ‘semejante a los antepasados’, y es obviamente cierto que algunos animales modernos son más primitivos en este sentido que otros. Lo que eso significa exactamente, si lo pensamos, es que la más primitiva de una pareja de especies ha cambiado menos desde su antepasado común (todas las especies sin excepción comparten un antepasado común, si nos remontamos lo

suficiente). Si ninguna de las especies ha cambiado drásticamente más que la otra, la palabra «primitivo» no debería utilizarse para compararlas.

Merece la pena detenerse aquí para plantear un argumento relacionado. Es difícil medir el grado de parecido. Y no hay, en cualquier caso, una razón *necesaria* por la que el antepasado común de dos animales modernos debiera parecerse más a uno que a otro. Dados dos animales, por ejemplo una ardilla y un calamar, es *posible* que uno de ellos se parezca al antepasado común más que otro, pero de ahí no se deduce que ese *tiene* que ser el caso. Ha habido una cantidad de tiempo exactamente igual para que ambos hayan divergido, por lo que, a priori, la expectativa de un evolucionista sería, si es que hay alguna, que ningún animal moderno debe ser más primitivo que otro. Cabría esperar que ambos hayan cambiado en la misma proporción, pero en diferentes direcciones, desde la época del antepasado común. Esta expectativa resulta ser a menudo inexacta (como en el caso del mono y la lombriz), pero no hay ninguna razón necesaria por la que debiéramos esperar que fuera así. Aún más, las diferentes partes de los animales no tienen por qué evolucionar al mismo ritmo. Un animal puede ser primitivo de cintura para abajo pero muy desarrollado de cintura para arriba. Hablando más en serio, uno de ellos podría ser más primitivo en su sistema nervioso y otro más primitivo en su esqueleto. Fijémonos especialmente en que «primitivo» en el sentido de ‘semejante a los antepasados’; no tiene por qué querer decir «simple» (entendido como menos complejo). El pie de un caballo es más simple que un pie humano (solo tiene un dedo en lugar de cinco, por ejemplo), pero el pie humano es más primitivo (el antepasado que compartimos con los caballos tiene cinco dedos, como nosotros, por lo que el caballo ha cambiado más). Esto nos conduce al siguiente elemento de nuestra lista:

3. *Los monos son más inteligentes [o más guapos, tienen genomas más grandes, diseños corporales más complejos, etc.] que las lombrices*. Este tipo de esnobismo zoológico constituye un embrollo cuando comenzamos a aplicarlo científicamente. Lo comento porque es muy fácil de confundir con los otros significados, y la mejor forma de aclarar la confusión es exponiéndola. Podemos imaginar un gran número de criterios respecto a los cuales sería posible ordenar los animales —no

solo los cuatro que he mencionado—. Los animales que están muy arriba en una de estas clasificaciones podrían no estarlo en otra. Los mamíferos tienen cerebros más grandes que las salamandras, pero sus genomas son más pequeños que los de algunas salamandras.

4. *Los monos se parecen más a los humanos que las lombrices.* Esto es innegable para el ejemplo concreto de los monos y las lombrices, pero ¿y qué? ¿Por qué elegimos a los humanos como estándar por el que juzgar a los otros organismos? Una sanguijuela despechada podría señalar que las lombrices tienen la gran virtud de parecerse más a las sanguijuelas que los humanos. A pesar de que la Gran Cadena del Ser tradicionalmente sitúa al hombre entre los animales y los ángeles, no hay una justificación evolutiva para la suposición frecuente de que la evolución, de alguna manera, estaba «dirigida» a los humanos, o que los humanos eran «la última palabra de la evolución». Es sorprendente cómo este arrogante supuesto se realimenta a sí mismo. En su nivel más básico lo encontramos en el ubicuo y quejumbroso «Si los chimpancés evolucionaron hacia nosotros, ¿cómo puede haber todavía chimpancés por aquí?». Ya he mencionado esto y no estoy bromeando. Me encuentro con esta pregunta una y otra vez, y algunas veces formulada por personas con buena formación académica [30].
5. *Los monos [y otros animales «superiores»] sobreviven mejor que las lombrices [y otros animales «inferiores»].* Esto no es razonable ni cierto. Todas las especies vivas han sobrevivido al menos hasta el presente. Algunos monos, como el exquisito tamarín dorado, están en peligro de extinción. Son mucho peores para la supervivencia que las lombrices. Las ratas y las cucarachas prosperan a pesar de ser vistas por mucha gente como «inferiores» a los gorilas y a los orangutanes, que están peligrosamente cerca de extinguirse.

Espero haber dicho lo suficiente como para mostrar que es una tontería intentar situar a las especies modernas en una escalera, como si fuera obvio lo que significa «superior» e «inferior», y también lo antievolutivo del intento. Podemos imaginar muchas escaleras; algunas veces tendría sentido ordenar a los animales en varias escaleras por separado, pero las escaleras no se correlacionan bien entre sí y ninguna de ellas tiene el derecho a ser llamada una «escala evolutiva». Hemos visto la tentación histórica de caer en errores burdos como «¿Por qué no hay ranas-

mono?», pero el legado pernicioso de la Gran Cadena del Ser también alimenta el reto de «¿Dónde están los especímenes intermedios entre los principales grupos de animales?», y casi tan absurda es la tendencia de los evolucionistas a *responder* a ese desafío con fósiles específicos, como el *Archaeopteryx*, el famoso «espécimen intermedio entre los reptiles y las aves». Sin embargo, hay algo más detrás de la falacia del *Archaeopteryx* y es de importancia general: por lo que le dedicaré un par de párrafos utilizando el *Archaeoepteryx* como ejemplo particular de un caso general.

Los zoólogos han dividido tradicionalmente a los vertebrados en *clases*, que son divisiones principales con nombres como mamíferos, aves, reptiles y anfibios. Algunos zoólogos, llamados «cladistas» [31], insisten en que una clase correcta debe incluir animales que compartan un antepasado común que perteneciera a esa clase y que no tuviera descendientes fuera del grupo. Las aves serían un ejemplo de una buena clase [32]. Todas las aves descienden de un único antepasado que también sería llamado «ave» y habría compartido con las aves modernas los caracteres clave de diagnóstico —plumas, alas, pico, etc.—. Los animales comúnmente llamados «reptiles» no son una buena clase en este sentido. Esto es debido, al menos en las taxonomías convencionales, a que la categoría *excluye* explícitamente a las aves (estas constituyen su propia clase) y aun así algunos «reptiles», como se les reconoce convencionalmente (por ejemplo, cocodrilos y dinosaurios), son primos más cercanos de las aves que de otros «reptiles» (como lagartos y tortugas). De hecho, algunos dinosaurios son parientes más cercanos de las aves que de otros dinosaurios. La de los «reptiles» es, entonces, una clase artificial, porque las aves están *excluidas* artificialmente.

Pero, ¿qué tienen las aves que nos hace separarlas de los reptiles? ¿Qué parece justificar el que otorguemos a las aves el distintivo de «clase» cuando son, hablando evolutivamente, solo una rama de los reptiles? Es el hecho de que los reptiles que las rodean, los vecinos de al lado de las aves en el árbol de la vida, se han extinguido, mientras que las aves han seguido su camino. Los parientes más cercanos de las aves se incluyen todos entre los dinosaurios extinguidos hace mucho tiempo. Si hubiera sobrevivido una estirpe de dinosaurios, las aves no destacarían: no habrían sido elevadas al estatus de clase de vertebrados y no estaríamos haciéndonos una pregunta como «¿Dónde están los eslabones perdidos entre los reptiles y las aves?». El *Archaeopteryx* sería un bonito fósil para tenerlo en el

museo, pero no tendría un papel estelar como respuesta estándar a (lo que ahora vemos como) un desafío vacío: «Produzcan sus especímenes intermedios». Si las cartas de la extinción hubiesen salido de otra forma, habría muchos dinosaurios correteando por ahí, incluidos algunos voladores con plumas y pico, llamados aves. Y, de hecho, se están descubriendo cada vez más dinosaurios con plumas fosilizados, por lo que está haciéndose evidente que no hay tal cosa como un desafío del tipo «¡Produzcan sus eslabones perdidos!» para el que el *Archaeopteryx* sea la respuesta.

Pasemos ahora a algunas de las principales transiciones en la evolución, en las que se supone que «faltan eslabones».

SALIENDO DEL MAR

Casi a la altura de los viajes espaciales, es difícil imaginar un paso más atrevido o que cambie más la vida que dejar el agua para vivir en la tierra firme. Las dos áreas de vida son diferentes en tantos aspectos que trasladarse de la una a la otra requiere un cambio radical en casi todas las partes del cuerpo. Las branquias, que funcionan bien extrayendo oxígeno del agua, son inútiles en el aire, y los pulmones son igual de inútiles en el agua. Los métodos de propulsión rápidos y elegantes en el agua son peligrosamente torpes en tierra, y viceversa. No sorprende, por tanto, que «como pez fuera del agua» se haya convertido en una frase hecha. Y tampoco debe sorprender que los «eslabones perdidos» en esta región del registro fósil tengan un interés extraordinario.

Si nos remontamos lo bastante en el tiempo, todo vivió en el mar —acuoso, salado, *alma mater* de toda la vida—. En varios puntos de la historia evolutiva, individuos emprendedores de muchos grupos diferentes de animales abandonaron el agua —llegando algunas veces incluso hasta los desiertos más secos— y llevaron con ellos su propia agua de mar en los fluidos celulares y en la sangre. Además de los reptiles, las aves, los mamíferos y los insectos que vemos a nuestro alrededor, existen otros grupos que han tenido éxito en el gran viaje fuera del útero acuoso de la vida, como los escorpiones, los caracoles, crustáceos como las cochinillas de humedad y los cangrejos de tierra, miriápodos y centípedos, arañas y

tipos similares, y al menos tres filos de gusanos. Y no debemos olvidar las plantas, engendradoras del carbono utilizable, sin cuya invasión inicial de la tierra ninguna de las otras habría tenido éxito.

Afortunadamente las etapas transicionales de nuestro éxodo, cuando los peces emergieron a la tierra firme, están documentadas maravillosamente en el registro fósil. También lo están las etapas transicionales que van en el otro sentido, cuando, mucho más tarde, los antepasados de las ballenas y los dugongos (vacas marinas) decidieron abandonar el hogar ganado con esfuerzo en tierra firme y volvieron a sus mares ancestrales. En ambos casos, los eslabones que antaño faltaban ahora abundan y embellecen nuestros museos.

Cuando decimos que un pez «emergió» a la tierra tenemos que recordar que los peces, como los reptiles, no constituyen un grupo natural. Los peces se definen por exclusión. Peces son todos los vertebrados excepto aquellos que se trasladaron a la tierra. Debido a que la evolución temprana de los vertebrados ocurrió en el agua, no debe sorprendernos que la mayoría de las ramas del árbol de los vertebrados que subsisten estén todavía en el mar. Y todavía los llamamos «peces» aun cuando solo están relacionados lejanamente con otros «peces». La trucha y el atún son parientes más próximos de los humanos que de los tiburones, pero los llamamos «peces». Y el pez pulmonado y el celacanto son parientes más cercanos de los humanos que de la trucha o el atún (y por supuesto que de los tiburones), pero, de nuevo, los llamamos «peces». Incluso los tiburones son parientes más cercanos de los humanos que de las lampreas y los mixines (los únicos supervivientes modernos del, una vez, próspero y variado grupo de peces sin mandíbula), pero una vez más llamamos a todos «peces». Todos los vertebrados cuyos antepasados nunca se aventuraron a la tierra parecen peces, todos nadan como peces (menos los delfines, que lo hacen con un movimiento ascendente y descendente de la columna en lugar de un movimiento lateral como aquellos) y todos, sospecho, saben a pez.

Para un evolucionista, como vimos en el ejemplo de los reptiles y las aves, un grupo «natural» de animales es un grupo cuyos miembros son parientes más cercanos entre sí que de todos los que no son miembros del grupo. Las «aves», como hemos visto, son un grupo natural, ya que el antepasado más reciente que comparten no es compartido por ningún no-ave. Por la misma definición, los «peces» y los «reptiles» no son grupos

naturales. El antepasado común más reciente de todos los peces también es compartido por muchos no-peces. Si dejamos a nuestros distantes parientes los tiburones a un lado, los mamíferos pertenecemos a un grupo natural que incluye a todos los peces óseos modernos (con hueso, a diferencia de los cartilaginosos tiburones). Si ahora dejamos a un lado a los «peces con aletas radiales» óseos (salmón, trucha, atún, pez ángel: en realidad, casi todos los peces que podamos ver que no sean tiburones), el grupo natural al que pertenecemos incluye a los vertebrados terrestres más los llamados peces con aletas lobuladas. Surgimos de la categoría de los peces con aletas lobuladas, y ahora debemos prestar una atención especial a los sarcopterigios.

Los sarcopterigios se han reducido hoy en día a los peces pulmonados y a los celacantos («reducido» como «peces» pero están poderosamente expandidos por la tierra: nosotros los vertebrados terrestres somos peces pulmonados aberrantes). Son peces con aletas lobuladas porque sus aletas son como patas, a diferencia de las aletas radiales de los peces habituales. De hecho, *Old Fourlegs* [Cuadrúpedos antiguos] era el título de un libro muy popular sobre los celacantos escrito por J. L. B. Smith, el biólogo sudafricano responsable de llamar la atención mundial sobre ellos después de que se descubriera el primero en 1938, en las redes de un barco arrastrero sudafricano: «No me habría sorprendido tanto ver a un dinosaurio bajando por la calle». Los celacantos se conocían antes como fósiles, pero se pensaba que llevaban extinguidos desde el tiempo de los dinosaurios. Smith escribió conmovedoramente sobre el momento en que fijó sus ojos sobre este sorprendente hallazgo, al que llegó por una llamada de su descubridora, Margaret Latimer (más tarde lo llamó *Latimeria)*, para que le diera su opinión de experto:

> Fuimos directos al museo. La señora Latimer había salido un momento y el cuidador nos condujo a una habitación interior y allí estaba ¡el celacanto, sí, Dios! Aunque había venido preparado, la primera visión me golpeó como una explosión de calor ardiente y me hizo temblar y sentirme raro, un hormigueo recorría mi cuerpo. Me quedé quieto como si me hubiera convertido en piedra. Sí, no había sombra de duda, escama a escama, hueso a hueso, aleta a aleta, era un auténtico celacanto. Podría haber sido una de esas criaturas de hace doscientos millones de años volviendo a la vida. Me olvidé de todo lo demás y miré y miré y, luego, casi con miedo, me acerqué y lo toqué, y lo acaricié mientras mi esposa miraba en

silencio. La señora Latimer regresó y nos saludó cariñosamente. Solo entonces me volvió el habla. He olvidado las palabras exactas, pero en resumen decía que era cierto, que era realmente cierto, que incuestionablemente era un celacanto. Ni siquiera yo podía dudarlo ya.

Los celacantos son parientes más cercanos a nosotros de lo que lo son la mayoría de los peces. Han cambiado un poco desde el tiempo de nuestro antepasado común, pero no lo suficiente como para haber salido de la categoría de los animales que, coloquialmente y para un pescador, serían clasificados como peces. Pero ellos, y los peces pulmonados, son definitivamente parientes nuestros más cercanos de lo que lo son la trucha, el salmón, el atún y la mayoría de los peces. Los celacantos y los peces pulmonados son ejemplos de fósiles vivientes.

Sin embargo, nosotros no descendemos de los peces pulmonados, ni de los celacantos. Compartimos un antepasado común con los peces pulmonados que se parecía más a los peces pulmonados que a nosotros. Pero no se parecía mucho a ninguno de los dos. Los peces pulmonados pueden ser fósiles vivientes, pero aun así no se parecen mucho a nuestros antepasados. Para encontrarlos debemos buscar en los fósiles reales de las rocas. Y en particular estamos interesados en fósiles del Devónico que capturen la transición entre peces acuáticos y los primeros vertebrados que vivieron sobre la tierra. Pero seríamos demasiado optimistas si esperásemos hallar a nuestros antepasados incluso entre los fósiles reales. Podemos, sin embargo, esperar encontrar parientes de nuestros antepasados que estén suficientemente próximos como para decirnos de manera aproximada qué aspecto tenían.

Uno de los saltos más famosos del registro fósil —suficientemente evidente como para que se le haya dado un nombre—, la «brecha de Romer» (A. S. Romer fue un famoso paleontólogo estadounidense), se extiende desde hace aproximadamente 360 millones de años, al final del periodo Devónico, hasta hace unos 340 millones de años, en la primera parte del Carbonífero. Después de la brecha de Romer, encontramos sin lugar a dudas anfibios moviéndose por los pantanos, una gran variedad de animales parecidos a salamandras, algunos tan grandes como cocodrilos, a los que se parecen superficialmente. Parece que hubo una época de gigantes en la que había libélulas con una envergadura de alas tan grande como mi brazo, los insectos más grandes que jamás han existido [33].

Podríamos considerar el Carbonífero, que dio comienzo hace unos 340 millones de años, equivalente, pero con anfibios, a la era de los dinosaurios. Sin embargo, antes de eso está la brecha de Romer. Y antes de este salto, Romer solo podía ver peces, peces con colas lobuladas, viviendo en el agua. ¿Dónde estaban los individuos intermedios y qué les condujo a aventurarse a salir a la tierra?

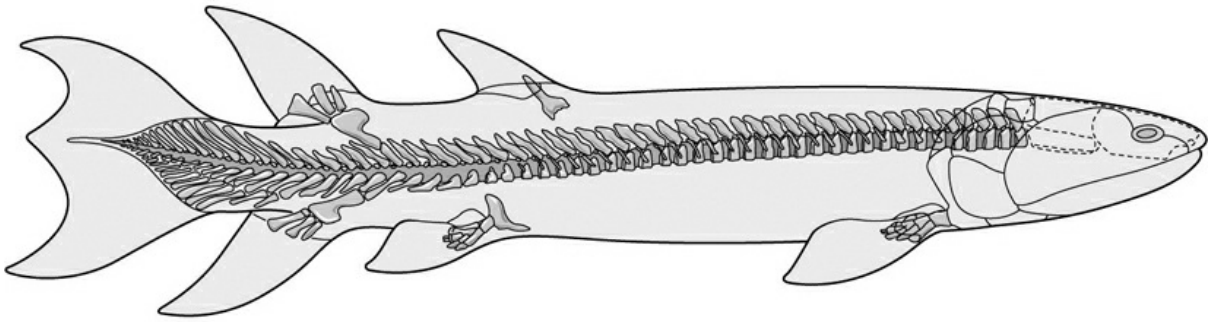
Mi imaginación de estudiante en Oxford estaba alimentada por las clases del prodigioso erudito Harold Pusey, quien, a pesar de su gesto seco y obstinado, tenía un don para ver, más allá de los huesos secos, hasta la carne y la sangre de los animales que debían de haber vivido en algún mundo apartado [34]. Su narración de lo que condujo a algunos peces lobulados a desarrollar pulmones y patas, que obtuvo del propio Romer, tuvo un impacto memorable en mis oídos de estudiante, y todavía tiene sentido para mí, aunque no está tan de moda entre los paleontólogos actuales como lo estaba en la época de Romer. Romer y Pusey imaginaron sequías anuales durante las cuales los lagos, las charcas y los arroyos se quedaban sin agua, para llenarse solo en las inundaciones del año siguiente. Los peces que vivían en el agua se podían beneficiar de una capacidad de supervivencia temporal en la tierra, mientras se arrastraban desde un charco o pequeño lago amenazado por la inminente desecación a uno más profundo en el que pudieran sobrevivir hasta la siguiente estación húmeda. Según esta idea, nuestros antepasados no emergieron a tierra firme, sino que utilizaron la tierra firme como un puente temporal para escapar de vuelta hacia el agua. Muchos animales modernos hacen lo mismo.

Lamentablemente, Romer introdujo su teoría con un preámbulo cuyo propósito era mostrar que la era del Devónico fue una época de sequía. En consecuencia, cuando pruebas más recientes refutaron esta suposición, también pareció que se negaba toda la teoría de Romer. Le habría ido mejor si hubiera omitido el preámbulo, que era, en cualquier caso, exagerado. Como sostuve en *El cuento del antepasado*, la teoría todavía funciona aun cuando el Devónico fue menos tendente a la sequía de lo que Romer pensó originalmente.

Volvamos, en cualquier caso, a los fósiles. Aparecen gota a gota a lo largo del Devónico tardío, el periodo inmediatamente anterior al Carbonífero: huellas tentadoras de «eslabones perdidos», animales que parecen conducir hacia el salto entre los peces lobulados, tan abundantes

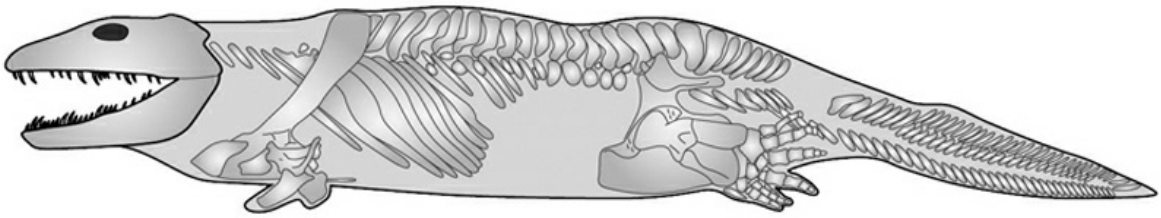
en los mares del Devónico, y los anfibios que más tarde se deslizaron por los pantanos del Carbonífero. En el lado del salto correspondiente a los peces, el *Eusthenopteron* fue descubierto en 1881 entre un grupo de fósiles en Canadá. Parece haber sido un pez cazador de superficie y probablemente nunca llegó a la tierra, a pesar de algunas reconstrucciones muy imaginativas. Sin embargo, sí tuvo ciertos parecidos anatómicos con los anfibios de cincuenta millones de años más tarde, incluidos los huesos del cráneo, los dientes y, sobre todo, las aletas. Aunque las utilizaba probablemente para nadar y no para andar, los huesos seguían el típico patrón de los tetrápodos (el nombre dado a todos los vertebrados terrestres). En las extremidades delanteras, un único húmero se unía a dos huesos, el radio y el cúbito, unidos a muchos huesos pequeños que en los tetrápodos se llaman carpos, metacarpos y dedos. Y la extremidad trasera muestra un patrón similar de tetrápodo.

Más tarde, cerca del lado del salto correspondiente a los anfibios, aunque unos veinte millones de años antes, en la frontera entre el Devónico y el Carbonífero, el descubrimiento en 1932, en Groenlandia, del *Ichthyostega* causó un gran entusiasmo. Por cierto, no hay que despistarse con la idea del frío y el hielo. En los días del *Ichthyostega*, Groenlandia estaba en el ecuador. El *Ichthyostega* fue reconstruido por primera vez en 1955 por el paleontólogo sueco Erik Jarvik, quien lo situó más cerca de los habitantes terrestres de lo que creen los expertos modernos. La reconstrucción más reciente, realizada por Per Ahlberg en la antigua Universidad de Jarvik, en Uppsala, sitúa al *Ichthyostega* mayoritariamente en el agua, aunque pudo hacer salidas ocasionales a tierra firme. Sin embargo, se parecía más a una salamandra gigante que a un pez y tenía la cabeza plana característica de los anfibios. A diferencia de todos los tetrápodos modernos, que tienen cinco dedos en pies y manos (al menos en el embrión, aunque puedan perderlos como adultos), el *Ichthyostega* tenía siete dedos en los pies. Parece que los tetrápodos disfrutaban de más libertad para «experimentar» con un número variable de dedos de la que tenemos hoy en día. Presumiblemente, en algún momento los procesos embriológicos los redujeron a cinco y este paso parece que es difícil de revertir. No obstante, hay que reconocer que no es tan difícil, después de todo. Hay especímenes de gatos y también de humanos que tienen seis dedos. Estos dedos extra surgen probablemente por un error de duplicación en el desarrollo embrionario.



Eusthenopteron

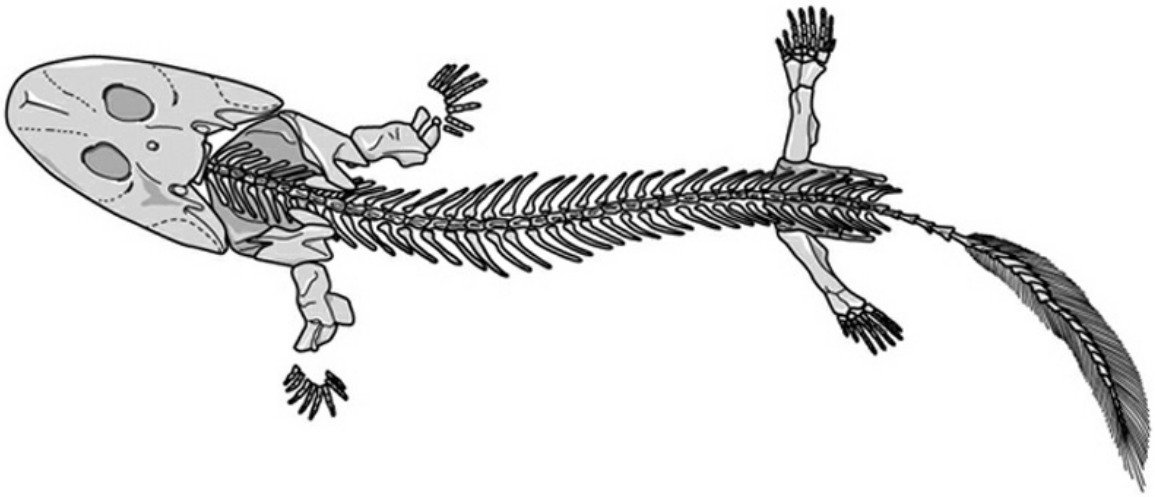
Imagen 26 (Ilusraciones en el texto) Imagen 26 (Créditos Individuales)



Ichthyostega

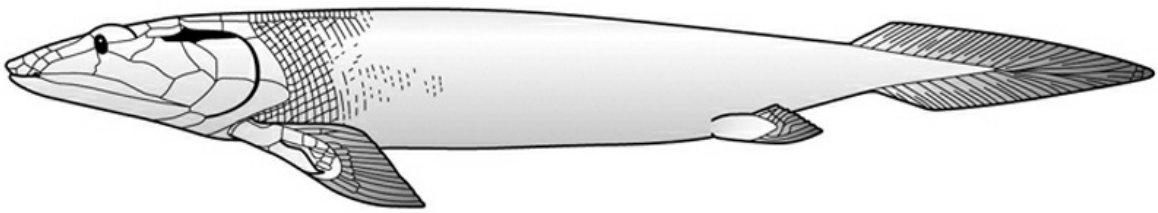
Imagen 27 (Ilusraciones en el texto) Imagen 27 (Créditos Individuales)

Otro descubrimiento emocionante, también de la Groenlandia tropical, y datado asimismo en la frontera entre el Devónico y el Carbonífero, fue el de *Acanthostega*. También tenía una cabeza plana, un cráneo de anfibio y extremidades parecidas a las de los tetrápodos. Tenía ocho dedos. Los científicos Jenny Clack y Michael Coates, de la Universidad de Cambridge —suyo es el mérito de que conozcamos todo esto—, creen que, al igual que el *Ichthyostega*, *Acanthostega* era principalmente acuático, pero tenía pulmones y sus extremidades sugieren con fuerza que podría sobrevivir sobre la tierra si tuviera que hacerlo. También se parecía mucho a una salamandra gigante. Si volvemos ahora hacia el lado de los peces en la división, *Panderichthys,* también del Devónico tardío, es un poco más parecido a los anfibios y menos a los peces que el *Eusthenopteron.* Pero si lo miramos con detenimiento, seguramente diríamos que es un pez más que una salamandra.



Acanthostega

Imagen 28 (Ilusraciones en el texto) Imagen 28 (Créditos Individuales)



Panderichthys

Imagen 29 (Ilusraciones en el texto) Imagen 29 (Créditos Individuales)

Nos queda, por tanto, un salto entre *Panderichthys*, el pez que parece un anfibio, y *Acanthostega*, el anfibio que parece un pez. ¿Dónde está el «eslabón perdido» entre ellos? Un equipo de científicos de la Universidad de Pennsylvania, entre los que estaban Neil Shubin y Edward Daeschler, decidió encontrarlo. Shubin hizo de la expedición la base de una sugerente serie de reflexiones sobre la evolución humana en su libro *Your Inner Fish* [El pez que llevamos dentro]. Pensaron cuidadosamente cuál sería el mejor sitio para buscar, y eligieron una zona rocosa de la época del Devónico tardío en el Ártico canadiense. Fueron hasta allí, y encontraron un tesoro zoológico: ¡El *Tiktaalik!* Un nombre para no olvidar. Viene de una palabra inuit que designa a un gran pez de agua dulce. En relación con el nombre

específico, *roseae*, déjenme contar una fábula sobre mí mismo. La primera vez que oí el término y vi fotografías como las que se reproducen en la sección en color, mi mente saltó inmediatamente al Devónico, «La Antigua Arenisca Roja», el color del condado epónimo de Devon, el color de Petra («Una ciudad rosa y roja, la mitad de antigua que el tiempo»). Desgraciadamente, yo estaba equivocado. La fotografía exagera el brillo rosado. El nombre fue elegido en honor de un benefactor que ayudó a financiar la expedición al Ártico devónico. Tuve el privilegio de que el doctor Daeschler, con el que había comido en Filadelfia poco después de su descubrimiento, me enseñara el *Tiktaalik roseae*, y el zoólogo de toda la vida que hay en mí —o quizá mi pez interior— se quedó sin habla. Imaginé, a través de lentes teñidas de rosa, que estaba mirando a la cara a mi antepasado directo. Por poco realista que fuera, este fósil, no tan sonrosado, era probablemente lo más cerca que iba a estar de un antepasado muerto real la mitad de antiguo que el tiempo.

Si fuésemos a encontrarnos con un *Tiktaalik* real y vivo, nariz con nariz, nos echaríamos para atrás como si nos hubiera amenazado un cocodrilo, porque es a eso a lo que se parece su cara. La cabeza de un cocodrilo en el tronco de una salamandra, unida a la parte final y cola de un pez. A diferencia de cualquier pez, *Tiktaalik* tenía cuello. Podía girar su cabeza. En casi todos los detalles, *Tiktaalik* es un perfecto eslabón perdido —perfecto porque casi divide exactamente la diferencia entre un pez y un anfibio, y perfecto porque ha dejado de estar perdido—. Tenemos el fósil. Podemos verlo, tocarlo, intentar estimar su edad —y equivocarnos—.

DEBO VOLVER DE NUEVO AL MAR [35]

El cambio del agua a la tierra supuso una rediseño general de todos los aspectos de la vida, desde la respiración a la reproducción: una gran expedición a través del espacio biológico. Sin embargo, con lo que casi parece perversidad caprichosa, un buen número de animales terrestres se dieron la vuelta, abandonaron su refugio terrestre tan duramente ganado y volvieron de nuevo al agua. Las focas y los leones marinos solo han hecho la mitad del camino de vuelta. Nos muestran cómo podrían haber sido los especímenes intermedios, en el camino hasta casos extremos como las

ballenas y los dugongos. Las ballenas (incluidas las pequeñas ballenas que llamamos delfines) y los dugongos con sus parientes cercanos, los manatíes, dejaron de ser criaturas terrestres y volvieron a los hábitos marinos de sus antepasados remotos. Ni siquiera vuelven a la costa para aparearse. Lo que sí hacen, sin embargo, es respirar aire, ya que nunca desarrollaron algo parecido a las agallas de sus antiguos progenitores marinos. Otros animales que han regresado de la tierra al agua, al menos parte del tiempo, son los caracoles de agua dulce, las arañas de agua, los escarabajos de agua, los cocodrilos, las nutrias, las serpientes marinas, las musarañas, los cormoranes no voladores de las Galápagos, las iguanas marinas de las Galápagos, los yapoks (marsupiales acuáticos de América del Sur), los ornitorrincos, los pingüinos y las tortugas.

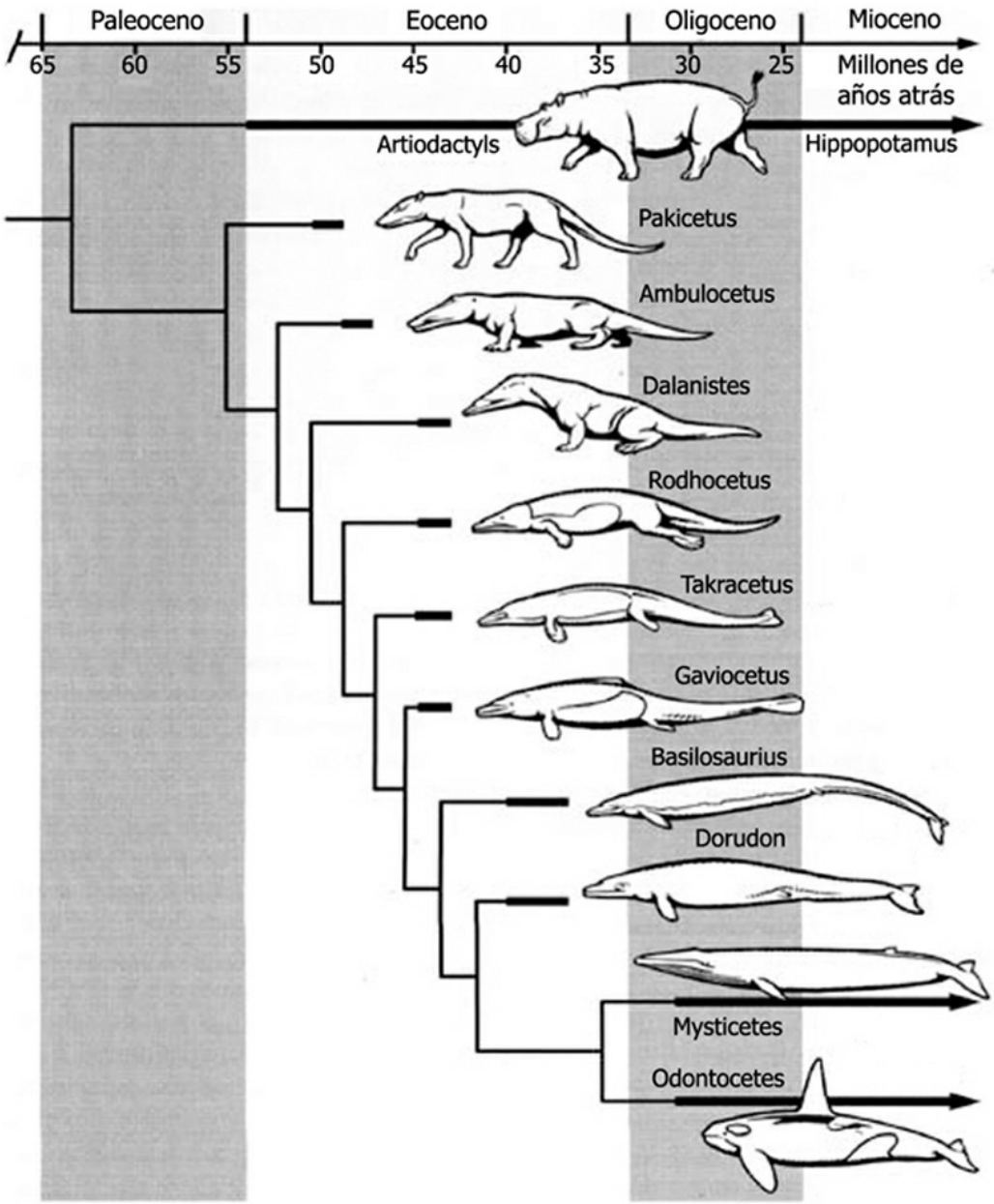
Las ballenas han sido un enigma durante mucho tiempo, pero recientemente nuestro conocimiento sobre su evolución se ha enriquecido mucho. Pruebas procedentes de la genética molecular (véase el capítulo 10 donde se explica la naturaleza de esta clase de pruebas) muestran que los parientes vivos más cercanos de las ballenas son los hipopótamos, luego los cerdos y luego los rumiantes. Aún más sorprendente es la evidencia molecular que muestra que los hipopótamos tienen una relación más próxima con las ballenas que con los animales de pezuña hendida (como los cerdos y los rumiantes), a los que se parecen mucho más. Este es otro ejemplo del desajuste que puede surgir a veces entre la cercanía del parentesco y el grado de parecido físico. Lo comentamos antes en relación con peces que son parientes más cercanos a nosotros que a otros peces. En ese caso, la anomalía surgió porque nuestro linaje dejó el agua para ir a la tierra y, consecuentemente, se separó en la evolución dejando a nuestros parientes peces más cercanos, el pez pulmonado y el celacanto, más parecidos a nuestros parientes lejanos peces, porque todos se quedaron en el agua. Ahora nos encontramos el mismo fenómeno de nuevo, pero al revés. Los hipopótamos se quedaron, al menos parcialmente, en tierra, por lo que se parecen a sus parientes terrestres más lejanos, los rumiantes, mientras que sus parientes más cercanos, las ballenas, se fueron al mar y cambiaron tan drásticamente que su parecido con los hipopótamos pasó inadvertido a todos los biólogos, excepto a los biólogos moleculares. De forma parecida a cuando sus remotos antepasados peces fueron originalmente en la otra dirección, en el momento en que los antepasados

de las ballenas flotaron libres de la fuerza de la gravedad y soltaron sus amarras con tierra firme, debieron de sentirse como saliendo al espacio o, al menos, como volando en globo.

Al mismo tiempo, gracias en gran medida a un hallazgo encontrado en Pakistán, el antaño escaso registro fósil sobre la evolución de las ballenas ha sido rellenado convincentemente. Sin embargo, la historia de las ballenas fósiles ha sido abordada tan correctamente en otros libros, por ejemplo *Evolution: What the Fossil Say and Why it Matters* [Lo que dicen los fósiles y por qué es importante], de Donald Prothero, y, más recientemente, *Why Evolution is True* [¿Por qué es cierta la evolución?], de Jerry Coyne, que he decidido no entrar en los mismos detalles aquí. En lugar de eso me he limitado a incluir un diagrama (en la página siguiente) sacado del libro de Prothero en el que se muestra una secuencia de fósiles ordenados en el tiempo. Observe la forma tan cuidadosa con que se ha hecho el dibujo. Es tentador —y en libros más antiguos solía hacerse— dibujar secuencias de fósiles con flechas apuntando desde el más antiguo hacia el más moderno. Pero nadie sabe, por ejemplo, si el *Ambulocetus* descendió del *Pakicetus*. O si el *Basilosaurus* descendió del *Rodhocetus.* En lugar de eso, el diagrama opta por la estrategia más cuidadosa de sugerir que, por ejemplo, las ballenas descienden de un pariente contemporáneo del *Ambulocetus* que era probablemente parecido al *Ambulocetus* (y podría haber sido el *Ambulocetus).* Los fósiles que se muestran son representativos de varias etapas de la evolución de las ballenas. La desaparición gradual de las extremidades posteriores, la transformación de las anteriores en aletas para nadar y el aplastamiento de la cola son algunos de los cambios que emergieron en elegante progresión.

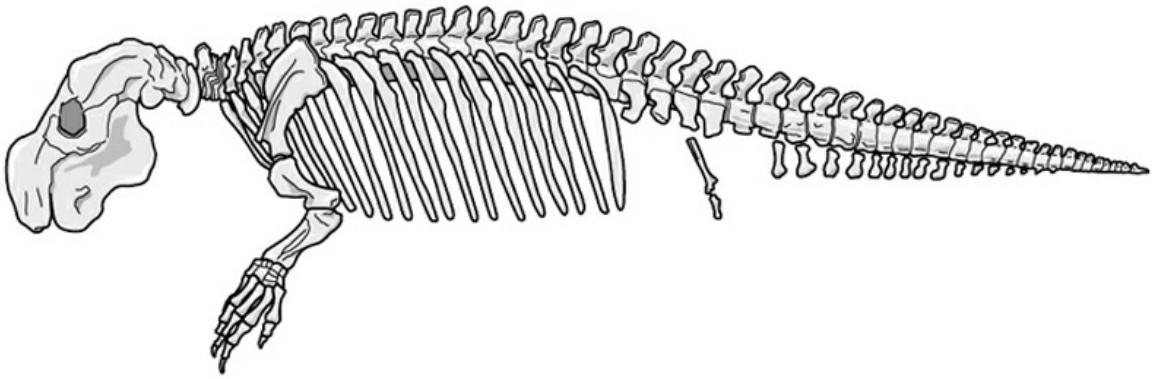
Esto es todo lo que voy a decir sobre la historia fósil de las ballenas, porque ya se ha contado espléndidamente en los libros que he mencionado. El otro grupo, menos numeroso y diverso pero igual de acuático, de mamíferos marinos, los sirenios —dugongos y manatíes—, no está tan bien documentado en el registro fósil, pero recientemente se ha descubierto un «eslabón perdido» maravilloso: *Pezosiren.* Más o menos contemporáneo del *Ambulocetus*, la «ballena caminante» del Eoceno, *Pezosiren,* es el fósil del «manatí caminante» de Jamaica. Se parece mucho a un manatí o a un dugongo, excepto porque tiene patas para caminar

delante y detrás, cuando ellos tienen aletas delante y no tienen patas detrás. Contemplemos la figura que muestra el esqueleto de un dugongo moderno y un *Pezosiren.*



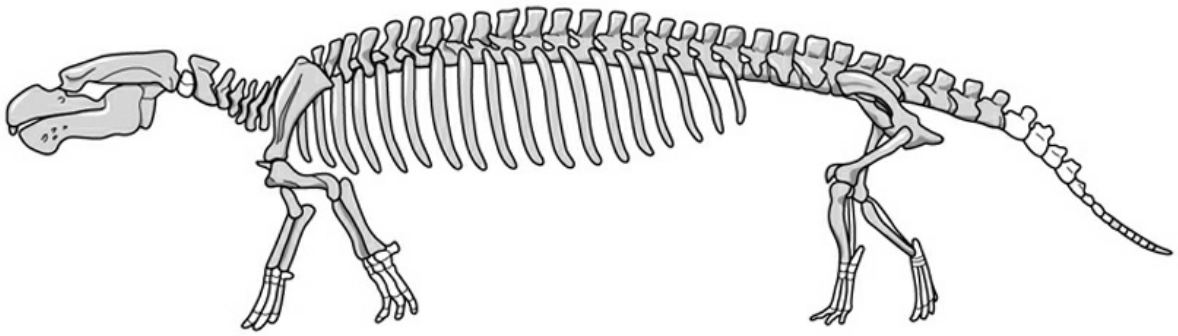
Evolución de las ballenas a partir de criaturas terrestres, con los distintos fósiles intermedios documentados hasta ahora, procedentes de los lechos del Eoceno en África y Pakistán. (Ilustración de Carl Buell)

Imagen 30



Dugongo moderno

Imagen 31



Pezosiren, antiguo dugongo

Imagen 32 (Ilusraciones en el texto) imagen 32 (Créditos Individuales)

De la misma forma que las ballenas están relacionadas con los hipopótamos, los sirenios están relacionados con los elefantes, como sugiere gran número de pruebas, incluida la muy importante evidencia molecular. *Pezosiren*, sin embargo, probablemente vivió como un hipopótamo, pasando gran parte de su tiempo en el agua y utilizando sus patas para caminar por el fondo, así como para nadar. El cráneo es de un sirenio sin posibilidad de error. *Pezosiren* puede ser o no el antepasado de los manatíes y de los dugongos modernos, pero es realmente una candidato excelente para el papel.

Cuando este libro estaba a punto de entrar en imprenta, la revista *Nature* publicó una interesante noticia sobre un nuevo fósil hallado en el Ártico canadiense, que venía a cubrir un salto evolutivo entre los ancestros de las focas modernas, los leones marinos y las morsas (agrupados comúnmente con el nombre de pinnípedos). Llamado *Puijila darwini,* se trata de un único esqueleto, completo en un 65%, que se ha datado a principios del Mioceno (hace unos veinte millones de años). Esta fecha es tan reciente que el mapa del mundo podría considerarse igual al actual. Por lo tanto, este león marino/foca (aún no se habían diferenciado) fue un animal ártico, un habitante del agua helada. Las pruebas sugieren que vivía y pescaba en agua dulce (como la mayoría de las nutrias, a excepción de la conocida nutria marina de California), en lugar de hacerlo en el mar (como la mayoría de las focas modernas actuales, a excepción de la famosa foca del lago Baikal). La *Puijila* no tenía aletas, sino pies. Probablemente corría como un perro sobre tierra firme (de forma muy distinta a una foca actual), pero pasaba la mayor parte del tiempo en el agua, donde nadaba también como un perro, a diferencia de los estilos actuales tanto de focas como de leones marinos. *Puijila* ocupa ese salto entre el agua y la tierra en los ancestros de los actuales pinnípedos. Y de hecho es otra deliciosa pieza más en nuestra creciente lista de «eslabones» que ya no están perdidos.

Ahora quiero pasar a otro grupo de animales que volvió de la tierra al agua: ¡un ejemplo particularmente interesante porque algunos de ellos invirtieron el proceso y volvieron a la tierra una segunda vez! En un aspecto importante, las tortugas marinas han regresado al agua en menor grado que las ballenas o los dugongos, porque siguen poniendo sus huevos en las playas. Como todos los vertebrados que han retornado al agua, las tortugas no han dejado de respirar aire, pero algunas de ellas lo hacen mejor que las ballenas. Estas tortugas extraen oxígeno adicional del agua a través de un par de cámaras situadas en su parte posterior, en las que hay una gran cantidad de vasos sanguíneos. Una tortuga australiana de río, de hecho, consigue la mayoría de su oxígeno respirando (como un australiano no dudaría en decir) por su trasero.

Antes de seguir avanzando, no puedo pasar por alto un tedioso punto terminológico y una lamentable reivindicación de la observación de George Bernard Shaw de que «Inglaterra y Estados Unidos son dos países divididos por un lenguaje común». En Gran Bretaña las tortugas viven en el mar; las *tortoises,* en tierra, y los galápagos, en agua dulce o ligeramente

salada. En Norteamérica todos estos animales son «tortugas», ya vivan en la tierra o en el agua. «Tortuga de tierra» me suena raro, pero no sucede así para un norteamericano, para quien las *tortoises* son el conjunto de las tortugas que viven en tierra. Algunos norteamericanos utilizan *tortoise* en un sentido taxonómico estricto para referirse a las *Testudinidae*, que es el nombre científico de las tortugas modernas de tierra. En Gran Bretaña preferimos llamar a cualquier quelónido terrestre *tortoise*, ya sea miembro de las *Testudinae* o no (como veremos, hay *tortoises* fósiles que vivieron sobre la tierra pero no son miembros de las *Testudinae).* En adelante, intentaré evitar esta confusión, para ser indulgente con los lectores de Gran Bretaña y Norteamérica (y de Australia, donde el uso es también diferente), pero será difícil. La terminología es un embrollo, por decirlo suavemente. Los zoólogos utilizan el término «quelonios» para todos estos animales, tortugas, *tortoises* y galápagos, sea cual sea la versión de inglés que se hable.

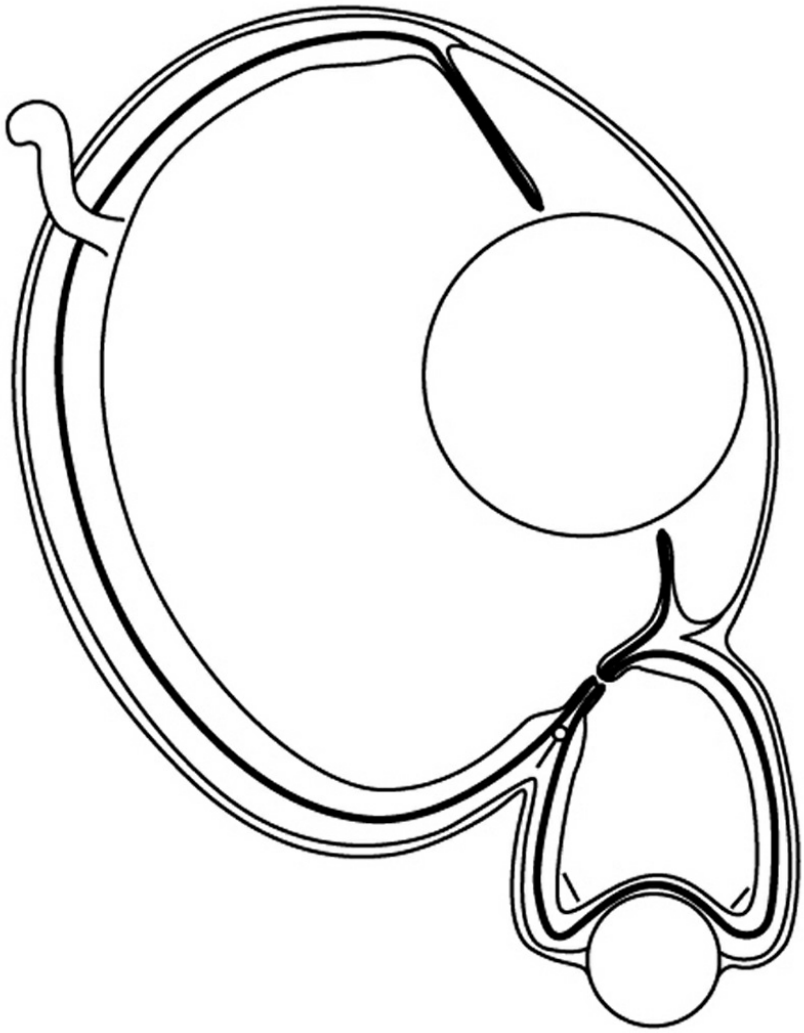
La característica que más llama la atención de los quelonios es su caparazón. ¿Cómo evolucionó y qué aspecto tenían sus versiones intermedias? ¿Dónde están los eslabones perdidos? ¿Qué utilidad tiene medio caparazón (preguntaría un creacionista fanático)? Bien, sorprendentemente, se acaba de describir un nuevo fósil que responde de forma elocuente a la pregunta. Hizo su presentación en la revista *Nature* justo antes de que tuviera que entregar este libro a los editores. Era una tortuga acuática encontrada en los sedimentos del Triásico tardío en China, y su edad se estima en 220 millones de años. Su nombre es *Odontochelys semitestacea,* de lo cual se puede deducir que, a diferencia a una tortuga moderna, tenía dientes y media concha. También tenía una cola mucho más larga que la de una tortuga actual. Estas tres características le otorgan la condición de «eslabón perdido». El vientre estaba cubierto por una concha, llamada plastrón, de forma muy parecida a la de una tortuga marina moderna. Pero carecía totalmente de la parte dorsal de la concha, conocida como caparazón. Su espalda posiblemente era semejante a la del cocodrilo y las costillas posteriores estaban aplastadas como si quisieran «intentar el inicio» de la evolución de un caparazón.

Y aquí tenemos una controversia interesante. Los autores del artículo en el que se presentó *Odontochelys* al mundo, Li, Wu, Rieppel, Wang y Zhao (por brevedad los llamaré los autores chinos, aunque Rieppel no es chino), creen que su animal estaba realmente a medio camino en la

adquisición de un caparazón. Hay quien discute la pretensión de que *Odontochelys* demuestra que el caparazón evolucionó en el agua. *Nature* tiene la admirable costumbre de pedir a otros expertos diferentes de los autores un comentario sobre los artículos más interesantes de la semana, que se publica en una sección llamada «Noticias y opiniones». El comentario de «Noticias y opiniones» sobre el artículo de *Odontochelys* fue escrito por dos biólogos canadienses, Robert Reisz y Jason Head, y ambos ofrecen una interpretación alternativa. Quizá la concha completa había evolucionado en tierra antes de que los antepasados de *Odontochelys* volviesen al agua. Y quizá *Odontochelys* perdió su caparazón después de volver al agua. Reisz y Head señalan que algunas de las tortugas marinas, por ejemplo, la tortuga laúd, han perdido o reducido una gran parte de su caparazón, por lo que su teoría es bastante plausible.

Necesito desviarme ahora momentáneamente para responder a la pregunta «¿Qué utilidad tiene media concha?». En particular, ¿por qué estaría *Odontochelys* armada por debajo pero no por arriba? Quizá porque el peligro acechaba desde abajo, lo que sugeriría que estas criaturas pasaban gran parte de su tiempo nadando cerca de la superficie —y, por supuesto, de todas formas tenían que salir a la superficie para respirar—. Los tiburones actuales a menudo atacan desde abajo, por lo que habrían desempeñado un papel amenazador importante para *Odontochelys*, y no hay razón para suponer que sus hábitos de caza fueran diferentes en aquellos tiempos. Como ejemplo paralelo, uno de los logros más sorprendentes de la evolución, el par extra de ojos del pez *Bathylychnops*, está probablemente dirigido a detectar ataques de depredadores desde abajo. El ojo principal mira hacia fuera como en cualquier pez ordinario. Pero cada uno de los dos ojos tiene un ojo extra pequeño, completo, con lente y retina, incrustado en la parte inferior. Si los *Bathylychnops* pueden hacer el esfuerzo (saben de lo que hablo, no sean pedantes) de desarrollar un par completo de ojos extra, presumiblemente para detectar ataques que vinieran desde abajo, parece bastante plausible que *Odontochelys* pudiera haber desarrollado una armadura dirigida a defenderse de ataques provenientes de esa misma dirección. El plastrón tiene sentido. Y entonces podríamos preguntarnos, pero ¿por qué no un caparazón en la parte de arriba también, solo para tener una seguridad extra? La respuesta es sencilla. Las conchas son pesadas y aparatosas, son costosas de desarrollar y costosas de transportar. Siempre hay compromisos en la evolución. Para

las tortugas terrestres, el compromiso favorece la armadura pesada y robusta tanto arriba como abajo. Para muchas tortugas marinas, el compromiso favorece un plastrón fuerte debajo y una armadura muy ligera arriba. Y es una sugerencia plausible que *Odontochelys* llevara esta tendencia un poco más lejos.



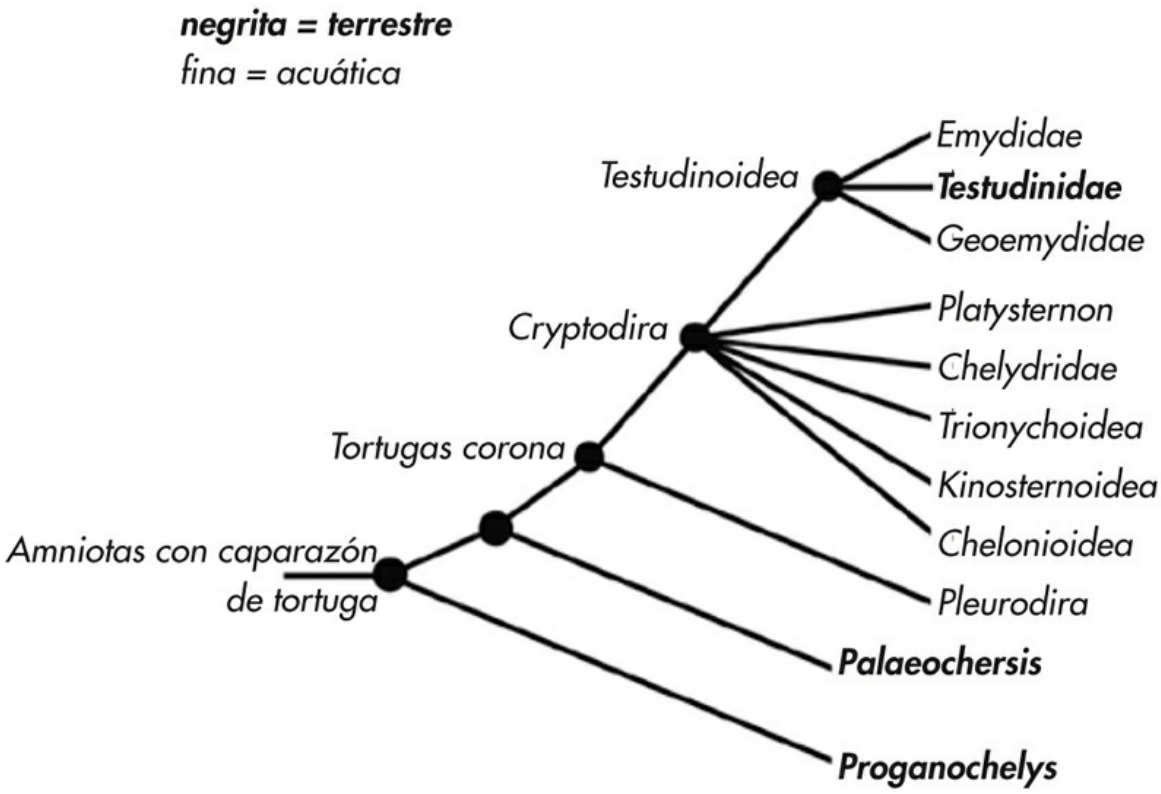
Ojo extra del Bathylychnops

Imagen 33

Si, por otra parte, los autores chinos tuvieran razón en que *Odontochelys* estaba en camino de desarrollar una concha completa, y que la concha evolucionó en el agua, se deduciría que las tortugas terrestres modernas, que tienen conchas bien desarrolladas, descienden de las tortugas marinas. Esto es, como veremos, probablemente cierto. Pero es

sorprendente, porque significa que las tortugas terrestres actuales representan una *segunda* migración desde el agua hacia la tierra. Nadie ha dicho nunca que las ballenas o los dugongos *volvieran* a la tierra después de invadir el agua. La historia alternativa para las tortugas terrestres es que se mantuvieron en tierra todo el tiempo y desarrollaron su concha independientemente y en paralelo a sus parientes acuáticas. Esto no es imposible; pero ocurre que tenemos buenas razones para creer que las tortugas marinas realmente volvieron a la tierra en un segundo viaje para convertirse en tortugas terrestres.

Si dibujamos el árbol genealógico de todas las tortugas modernas, marinas y terrestres, basándonos en comparaciones moleculares y de otro tipo, casi todas las ramas son acuáticas. Las tortugas de tierra están señaladas en negrita, y podemos ver que las tortugas terrestres actuales constituyen una única línea, las *Testudinidae*, anidada en profundidad dentro de ramificaciones de otros quelonios acuáticos. Todos sus parientes cercanos son acuáticos. Las tortugas terrestres modernas son una única ramita en el arbusto de lo que en su gran mayoría son tortugas acuáticas. Sus antepasados acuáticos se dirigieron hacia la tierra. Este hecho es compatible con la hipótesis de que la concha evolucionó en el agua, en una criatura como *Odontochelys*. Pero ahora tenemos otra dificultad. Si miramos al árbol genealógico, veremos que, además de las *Testudinidae* (todas las tortugas terrestres modernas), hay dos géneros fósiles de animales con concha completa llamados *Proganochelys* [36] y *Palaeochersis*. Ambos están representados como terrestres por razones a las que llegaremos en el próximo párrafo. Están justo fuera de las líneas negras que representan a las tortugas de agua. Podría parecer que estos dos géneros son terrestres desde hace mucho tiempo.



Árbol genealógico de tortugas

Imagen 34 (Ilusraciones en el texto) Imagen 34 (Créditos Individuales)

Antes de que se descubriera *Odontochelys,* estos dos fósiles eran los quelonios más antiguos conocidos. Como aquella, vivían en el Triásico tardío, pero unos quince millones de años después que *Odontochelys.* Algunas autoridades en la materia los han reconstruido como animales de agua dulce, pero hay pruebas recientes que los sitúan en tierra, como indican las letras en negrita del diagrama. Cabría preguntarse cómo distinguimos si los animales fósiles, especialmente cuando solo se han encontrado unos fragmentos, vivían en la tierra o en el agua. Algunas veces es muy obvio. Los ictiosaurios eran reptiles contemporáneos de los dinosaurios, con aletas y cuerpos alargados. Los fósiles se parecen a los delfines y seguramente vivían como delfines, en el agua. Con las tortugas marinas y terrestres es un poco menos obvio. Como se podría esperar, lo que las delata son sus extremidades. Las aletas son muy diferentes de las patas para andar. Walter Joyce y Jacques Gauthier, de la Universidad de Yale, partieron de esta intuición de sentido común y proporcionaron los datos que la sustentaban. Tomaron tres medidas clave de los huesos del

brazo y de la mano de 71 especies de quelonios vivos. Me resistiré a la tentación de explicar sus elegantes cálculos, pero su conclusión era clara. Estos animales tenían patas para caminar, no aletas. En inglés británico eran *tortoises*, no *turtles*. Vivían sobre la tierra. Sin embargo, solo eran parientes lejanos de las tortugas terrestres modernas.

Ahora parece que tenemos un problema. Si, como creen los autores del artículo en el que se describe *Odontochelys*, su fósil con media concha muestra que la concha evolucionó en el agua, ¿cómo explicamos dos géneros de *tortoises* con la concha completa en tierra, quince millones de años después? Hasta el descubrimiento de *Odontochelys*, no habría dudado en decir que *Proganochelys* y *Palaeochersis* eran representativos del tipo ancestral terrestre *antes* de volver al agua. La concha evolucionó en tierra. Algunas tortugas con concha volvieron al mar, como las focas, las ballenas y los dugongos hicieron más tarde. Otras se quedaron en tierra, pero se extinguieron. Y entonces algunas tortugas regresaron a la tierra para dar lugar a todas las tortugas terrestres modernas. Eso es lo que habría dicho —de hecho es lo que dije en una versión de este capítulo anterior al anuncio de *Odontochelys*—. Pero *Odontochelys* vuelve a introducir la especulación en este asunto. Ahora tenemos tres posibilidades, todas igual de intrigantes:

1. *Propanochelys* y *Palaeochersis* podrían haber sido supervivientes de animales terrestres que habían enviado antes a algunos representantes al mar, incluidos los antepasados de *Odontochelys*. Esta hipótesis sugiere que la concha evolucionó antes en la tierra y *Odontochelys* perdió su caparazón en el agua, manteniendo el plastrón ventral.
2. La concha podría haber evolucionado en el agua, como sugieren los autores chinos, desarrollando el plastrón de la barriga primero y el caparazón de la espalda más tarde. En este caso, ¿qué hacemos con *Proganochelys* y *Palaeochersis*, que vivieron en tierra *después de que lo hiciera Odontochelys*, con su media concha en el agua? Las conchas de *Proganochelys* y *Palaeochersis* podrían haber evolucionado independientemente. Pero hay otra posibilidad:
3. *Proganochelys* y *Palaeochersis* podrían representar un retorno anterior del agua a la tierra. ¿No es una idea realmente apasionante?

Estamos bastante seguros del hecho asombroso de que las tortugas realizaron un doble retorno evolutivo a la tierra: una primera expedición de *tortoises* terrestres volvió al entorno acuático de sus antepasados peces, para convertirse en tortugas marinas, y luego regresaron a la tierra otra vez como una nueva reencarnación de tortugas terrestres, los *Testudinidae*. Eso es lo que sabemos o estamos casi seguros de saber. Pero ahora nos enfrentamos a la sugerencia adicional de que este retorno sucedió *¡dos veces!* No solo para dar lugar a las tortugas terrestres modernas, sino mucho antes, para dar lugar a *Progonachelys* y *Palaeochersis* en el Triásico.

En un libro anterior describí el ADN como el «libro genético de los muertos». Debido a la forma en que trabaja la selección natural, hay una interpretación en la que el ADN de un animal es una descripción textual de los mundos en los que sus antepasados fueron seleccionados naturalmente. Para un pez, el libro genético de los muertos describe mares ancestrales. Para nosotros, y para la mayoría de los mamíferos, los primeros capítulos del libro están escritos en el mar y todos los últimos en la tierra. Para las ballenas, los dugongos, las iguanas marinas, los pingüinos, las focas, los leones marinos y las tortugas, hay una tercera sección del libro que hace un recuento de su épico regreso a la tierra prometida de su pasado remoto: el mar. Pero para las tortugas terrestres, quizá dos veces de forma independiente en dos ocasiones muy separadas en el tiempo, hay una cuarta sección del libro dedicada a un retorno final —¿o quizá no?— a la tierra una vez más. ¿Puede haber otro animal cuyo libro genético de los muertos atestigüe semejantes múltiples giros evolutivos? Como despedida, no puedo evitar preguntarme por esas formas de agua dulce y salobre (galápagos) que son parientes cercanos de las tortugas terrestres. ¿Se trasladaron sus antepasados directamente del mar a la tierra? O ¿es posible que constituyan una nueva vuelta al agua de antepasados que eran tortugas terrestres modernas? ¿Se han trasladado los quelonios en el tiempo evolutivo una y otra vez entre el agua y la tierra? ¿Podría el manuscrito ser reescrito más densamente de lo que hasta ahora he sugerido?

El 19 de mayo de 2009, mientras corregía las pruebas de imprenta de este libro, la revista científica digital *PLOS One* anunció el descubrimiento de un «eslabón perdido» entre los primates del tipo del lémur y los del tipo del mono. Lo llamaron *Darwinius masillae*, y vivió hace 47 millones de años en un bosque húmedo donde ahora está Alemania. Los autores

afirmaban que se trataba del fósil de primate más completo hallado jamás: no solo tenía huesos, también piel, pelo, algunos órganos internos y restos de su última comida. Un descubrimiento tan maravilloso como *Darwinius masillae* también arrastra un despliegue mediático que oscurece el raciocinio. Según afirmaron en *Sky News*, se trata de «la octava maravilla del mundo», que «por fin confirma la teoría de la evolución de Charles Darwin». ¡Dios mío! La más o menos disparatada mística del «eslabón perdido» parece no haber perdido un ápice de su fuerza.

7

¿PERSONAS PERDIDAS? YA NO LO ESTÁN

El tratamiento que dio Darwin a la evolución humana en su libro más famoso, *El origen de las especies*, se resume en doce portentosas palabras: «Se arrojará luz sobre el origen del hombre y de su historia». Estas son las palabras que aparecieron en la primera edición, la que siempre cito, a menos que lo especifique en otro sentido. En la sexta (y última) edición, Darwin se permitió alargar el argumento y la frase se convirtió en «Se arrojará mucha luz sobre el origen del hombre y de su historia». Me gusta pensar en su pluma, posada sobre la quinta edición, mientras el gran hombre ponderaba juiciosamente si perdonarse o no el lujo de añadir «mucha». Incluso haciéndolo, la frase se queda corta de forma calculada.

Deliberadamente, Darwin obvió el tema de la evolución humana para abordarlo en un libro posterior, *El origen del hombre*. Quizá no deba sorprendernos que los dos volúmenes de este trabajo dedicaran más espacio al tema de su subtítulo, *La selección en relación al sexo* (con investigaciones realizadas mayoritariamente en pájaros), que a la evolución humana. Y no nos sorprende porque, en la época en que Darwin escribía, no había fósiles de ningún tipo que nos relacionaran con nuestros parientes más cercanos, los monos. Darwin solo tenía monos vivos a los que observar y los utilizó bien, argumentando de forma correcta (y casi exclusivamente) que nuestros parientes vivos más cercanos eran todos africanos (gorilas y chimpancés —los bonobos no se reconocían como una especie diferente de los chimpancés en aquellos días, pero también son africanos—). Por tanto, predijo que, si se querían encontrar fósiles humanos, África era el lugar indicado para buscar. Darwin lamentó la escasez de fósiles, pero mantuvo su esperanza en hallazgos futuros. Citando a Lyell, su mentor y el gran geólogo de la época, señaló que «en todas las clases de vertebrados el descubrimiento de restos fósiles ha sido

un proceso extremadamente lento y fortuito», y añadió: «No se debe olvidar que todavía no han sido exploradas por los geólogos aquellas regiones más propicias para albergar restos que conecten al hombre con alguna criatura extinta parecida a un mono». Se refería a África, y a esa búsqueda no ayudó el hecho de que sus inmediatos sucesores, ignorando su consejo, buscaran en Asia en lugar de en África.

Realmente fue en Asia donde los «eslabones perdidos» comenzaron a ser menos perdidos. Pero esos primeros fósiles descubiertos eran relativamente recientes, con una edad de menos de un millón de años, y provenían de un tiempo en que los homínidos se parecían mucho a los humanos modernos y habían abandonado África para alcanzar el Lejano Oriente. Recibieron la denominación de Hombre de Java y Hombre de Pekín por el lugar en que fueron descubiertos [37]. El Hombre de Java fue descubierto por el antropólogo holandés Eugene Dubois en 1891. Lo llamó *Pithecanthropus erectus*, nombre que recalcaba su creencia de que había alcanzado el sueño de su vida al encontrar al «eslabón perdido». El desacuerdo llegó desde dos fuentes diferentes que contribuyeron a probar su argumento: algunos dijeron que su fósil era puramente humano, y otros, que era un gibón gigante. Más tarde, a lo largo de su atormentada vida, el irascible Dubois se ofendió por la sugerencia de que los fósiles de Pekín descubiertos más recientemente eran similares a su Hombre de Java. Ferozmente posesivo, por no decir protector, de su fósil, Dubois creyó que solo el Hombre de Java era el eslabón perdido. Para enfatizar la distinción entre los diferentes fósiles, describió los del Hombre de Pekín como mucho más cercanos al hombre moderno, y a su propio hombre de Java de Trinil como un estadio intermedio entre el hombre y el mono.

> El *Pithecanthropus* [El Hombre de Java] no era un hombre, sino un género gigante relacionado con los gibones, aunque superior a ellos por tener un volumen cerebral mucho mayor y también por su facultad de asumir una postura y una forma de caminar erguida. Tenía el doble de cefalización [porcentaje entre tamaño del cerebro y tamaño del cuerpo] que los monos antropoides en general y la mitad que el hombre...
>
> Fue el sorprendente volumen del cerebro —demasiado grande para un mono antropoide y pequeño comparado con la media, aunque no más pequeño que el cerebro humano más pequeño— lo que condujo a la idea ahora casi general de que «el hombre mono» de Trinil, en Java, era realmente un hombre primitivo.

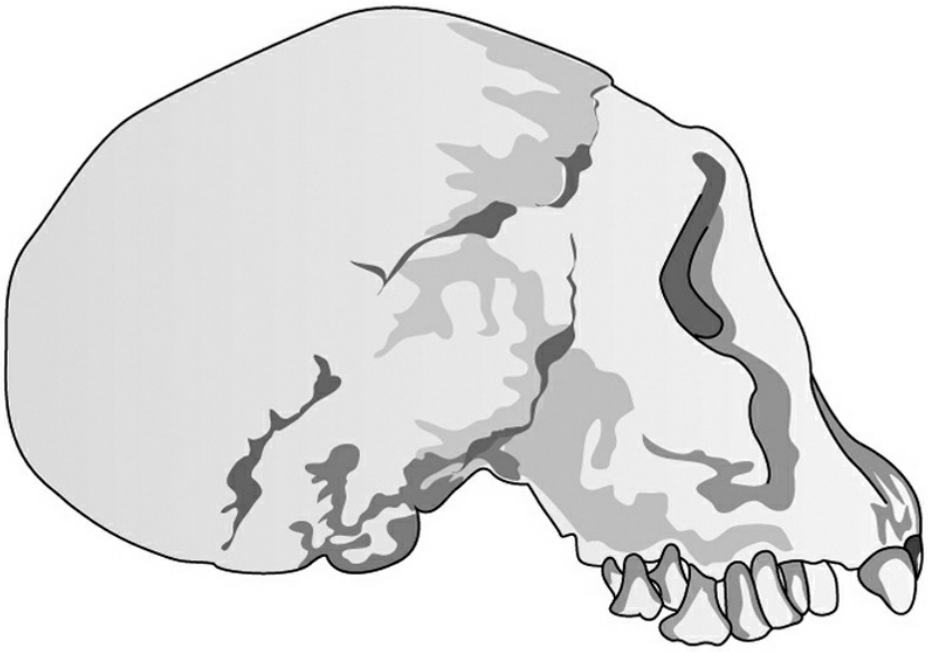
> Morfológicamente, sin embargo, la calvaria [tapa del cráneo] se parece mucho a la de los monos antropoides, especialmente a la del gibón.

Seguro que no mejoró el temperamento de Dubois el hecho de que otros le atribuyeran haber dicho que el *Pithecanthropus* era solo un gibón gigante, no un espécimen intermedio entre ellos y los humanos, e hizo todo lo que pudo para reafirmarse en su anterior posición: «Todavía creo, ahora más firmemente que nunca, que el *Pithecanthropus* de Trinil es el verdadero "eslabón perdido"».

De vez en cuando los creacionistas han utilizado como arma política la acusación de que Dubois se retractó de su afirmación de que el *Pithecanthropus* era un hombre-mono intermedio. Sin embargo, la organización creacionista Respuestas en el Génesis la ha añadido a la lista de argumentos desacreditados que no deben ser utilizados. Al menos tienen el mérito de mantener esa lista. Como dije, ya se ha demostrado que los especímenes de Java y de Pekín del *Pithecanthropus* son más bien jóvenes, con menos de un millón de años. Ahora están clasificados junto con nosotros en el género *Homo,* manteniendo el nombre específico *erectus* que propuso Dubois: *Homo erectus.*

Dubois eligió la parte equivocada del mundo para su obcecada búsqueda del «eslabón perdido». Para un holandés, era normal dirigirse en primer lugar a las Indias Orientales Holandesas, pero un hombre de su dedicación debería haber seguido el consejo de Darwin y haberse dirigido a África, ya que África es el lugar donde evolucionaron nuestros antepasados, como veremos a continuación. Entonces, ¿qué estaban haciendo fuera de África esos especímenes de *Homo erectus?* La frase «salir de África» ha sido utilizada por Karen Blixen [38] para referirse al gran éxodo de nuestros antepasados desde este continente. Pero se produjeron dos éxodos distintos, y es importante no confundirlos. Hace relativamente poco tiempo, quizá menos de cien mil años, bandas errantes de *Homo sapiens* con un aspecto muy similar al nuestro dejaron África y se diversificaron, dando lugar a todas las razas que vemos en el mundo hoy día: inuit, nativos americanos, nativos australianos, chinos y todas las demás. La frase «salir de África» se aplica a este éxodo reciente. Pero hubo un éxodo anterior, y estos *erectus* pioneros dejaron fósiles en Asia y en Europa, incluidos los especímenes de Java y de Pekín. El fósil más antiguo conocido fuera de África se encontró en Georgia, en Asia Central,

y se denominó Hombre de Georgia: una criatura diminuta cuyo cráneo (bastante bien conservado) se ha datado con métodos modernos en 1,8 millones de años de edad. Se le ha llamado *Homo georgicus* (por algunos taxonomistas, aunque otros no reconocen su pertenencia a una especie diferente) para indicar que parece más primitivo que el resto de los primeros refugiados de África, que fueron todos clasificados como *Homo erectus.* En época reciente se han descubierto en Malasia algunas herramientas de piedra ligeramente más antiguas que el Hombre de Georgia, lo que ha disparado una nueva búsqueda de huesos fósiles en esa península. Pero en cualquier caso, todos los primeros fósiles asiáticos están muy cerca de los humanos modernos, y todos se clasifican actualmente en el género *Homo;* para ver a nuestros antepasados más remotos debemos ir a África. Antes, sin embargo, es obligado preguntarse qué cabría esperar de un «eslabón perdido».



Homo georgicus

Imagen 35

Chimpancé

Imagen 36

Supongamos, para seguir el argumento, que nos tomamos seriamente el confuso significado original de la expresión «eslabón perdido» y buscamos un espécimen intermedio entre los chimpancés (en la imagen) y nosotros mismos. Nosotros no descendemos de los chimpancés, pero es razonable suponer que el antepasado común que compartimos con ellos fuera más parecido a un chimpancé que a nosotros. En particular, no debía de tener un gran cerebro como el nuestro, probablemente tampoco andaba erguido como nosotros, puede suponerse que tendría mucho más pelo y seguramente carecería de algunas características avanzadas de los humanos como el lenguaje. Por tanto, aunque debamos mantenernos firmes frente a un malentendido muy común, ya que no descendemos de los chimpancés, no hay peligro en preguntarse qué aspecto tendría un espécimen intermedio entre algo parecido a un chimpancé y nosotros.

Bueno, el pelo y el lenguaje no fosilizan bien, pero podemos conseguir buenas pistas sobre el tamaño del cráneo y sobre la forma de caminar a partir del esqueleto completo (incluido el cráneo, para ver el *foramen magnum*, el agujero para la espina dorsal, que apunta hacia abajo en los bípedos y hacia atrás en los cuadrúpedos).

Los posibles candidatos para el eslabón perdido podrían tener cualquiera de los siguientes atributos:

1. Un tamaño intermedio del cerebro y una forma de andar intermedia: quizá una marcha ligeramente encorvada y arrastrando los pies en lugar del porte erecto y orgulloso que alientan los sargentos y entrenadores deportivos.
2. Un cerebro del tamaño del de un chimpancé y un andar erguido.
3. Un cerebro grande, parecido al humano, y un andar como el del chimpancé, a cuatro patas.

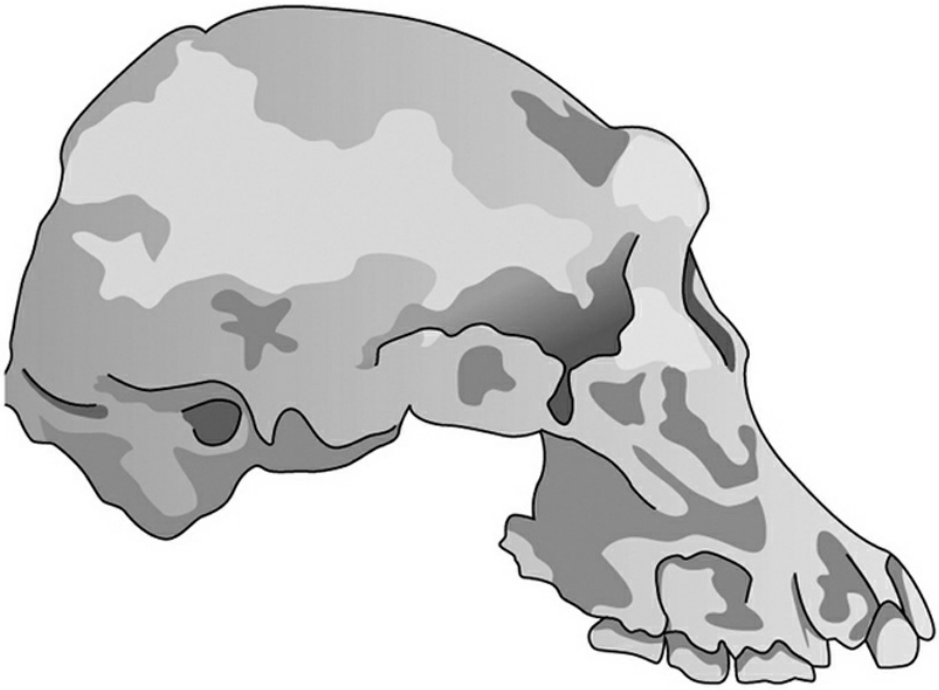
Por tanto, teniendo en mente estas posibilidades, examinemos algunos de los numerosos fósiles africanos que hay disponibles en la actualidad, pero que, desafortunadamente, no lo estaban para Darwin.

TODAVÍA ESPERO MALÉVOLAMENTE...

La evidencia molecular (sobre la que volveré en el capítulo 10) muestra que el antepasado común que compartimos con los chimpancés vivió hace unos seis millones de años o algo menos, por lo que podemos dividir la diferencia y examinar los fósiles de hace tres millones de años. El fósil más famoso de esta cosecha es Lucy, clasificado por su descubridor en Etiopía, Donald Johanson, como *Australopithecus afarensis.* Por desgracia solo tenemos fragmentos del cráneo de Lucy, pero su mandíbula inferior se ha conservado inusualmente bien. Era una hembra pequeña según los estándares actuales, aunque no tan pequeña como el *Homo floresiensis,* la pequeña criatura que los periódicos han apodado hasta la saciedad «el Hobbit» y que murió de forma sugestivamente reciente en la isla de Flores, en Indonesia. El esqueleto de Lucy está suficientemente completo como para sugerir que caminaba erguida sobre sus pies, pero es probable que también encontrara refugio en los árboles, pues era una trepadora muy ágil. Existen bastantes pruebas de que los huesos atribuidos a Lucy provenían realmente de un único individuo. No se puede decir lo mismo de la llamada Primera Familia, una colección de huesos de al menos trece individuos similares a Lucy, y de la misma

época, que, por algún motivo, terminaron enterrados juntos, también en Etiopía. Los fragmentos de Lucy y de la Primera Familia dan una buena idea del aspecto de los *Australopithecus afarensis*, pero es difícil realizar una reconstrucción auténtica a partir de fragmentos de muchos individuos diferentes. Afortunadamente, en 1992 se descubrió un cráneo completo conocido como AL 444-2 (en la imagen) en la misma zona de Etiopía, y esto confirmó los intentos de reconstrucción que se habían hecho antes.

La conclusión que se obtiene a partir de los estudios de Lucy y otros hallazgos parecidos es que tenían cerebros del mismo tamaño que los chimpancés, pero, a diferencia de estos, caminaban erguidos sobre sus patas traseras, como nosotros —el segundo de nuestros tres escenarios hipotéticos—. Las «Lucys» eran, en cierto sentido, como chimpancés que caminaban erguidos. Su bipedismo queda claramente confirmado por un conjunto de huellas patéticamente evocador descubierto por Mary Leakey en ceniza volcánica fosilizada. Dichas trazas se encuentran más hacia el sur, en Laetoli, Tanzania, y son más antiguas que Lucy y que AL 444-2: unos 3,6 millones de años. Se atribuyen normalmente a un par de *Australopithecus afarensis* que caminaban juntos (¿de la mano?), pero lo que importa es que hace 3,6 millones de años un mono erguido caminó por la Tierra sobre dos pies que se parecían mucho a los nuestros, aunque su cerebro fuera del tamaño del de un chimpancé.



AL 444-2

Imagen 37

Parece muy probable que las especies a las que llamamos *Australopithecus afarensis* —las especies de Lucy— incluyeran a nuestros antepasados de hace tres millones de años. Se han clasificado otros fósiles en diferentes especies del mismo género y casi se podría asegurar que nuestros antepasados eran miembros de ese género. El primer *Australopithecine* descubierto, el espécimen tipo del género, fue el llamado Niño de Taung. A la edad de tres años y medio, el Niño de Taung fue devorado por un águila. Las pruebas muestran que las marcas en las cuencas de los ojos del fósil son idénticas a las que dejan las águilas modernas en los monos de hoy día cuando les sacan los ojos. ¡Pobre Niño de Taung, gritando al viento mientras eras arrastrado a las alturas por la furia del águila!; no habrías encontrado consuelo en estar predestinado a la fama, dos millones y medio de años más tarde, como el espécimen tipo del *Australopithecus africanus.* ¡Pobre madre de Taung, llorando en el Plioceno!

El espécimen tipo es el primer individuo de una especie nueva al que se le da un nombre y recibe oficialmente la etiqueta en un museo. En teoría, cuando hay nuevos descubrimientos se comparan con el espécimen tipo para ver si concuerdan. El Niño de Taung fue descubierto en 1924 por el antropólogo sudafricano Raymond Dart, quien le asignó un género nuevo y un nombre de especie.

¿Cuál es la diferencia entre «especie» y «género»? Despejemos esta duda rápidamente antes de proseguir. El género es una división de rango superior. Una especie pertenece a un género y, a menudo, comparte el género con otras especies. El *Homo sapiens* y el *Homo erectus* son dos especies dentro del género *Homo*. El *Australopithecus africanus* y el *Australopithecus afarensis* son dos especies dentro del género *Australopithecus.* El nombre latino de un animal o de una planta siempre incluye un nombre genérico (con la primera letra en mayúscula) seguido de un nombre específico (en minúscula). Ambos nombres se escriben en cursiva. Algunas veces se añade un nombre adicional subespecífico a continuación del nombre específico, como en *Homo sapiens neanderthalensis*. Con frecuencia los taxonomistas discuten por los

nombres. Muchos, por ejemplo, dirían *Homo neanderthalensis,* no *Homo sapiens neanderthalensis,* elevando al hombre de Neanderthal del estatus de subespecie al de especie. A veces los nombres genéricos y específicos también son objeto de disputa, y cambian a menudo con revisiones sucesivas en la literatura científica. Por ejemplo, *Paranthropus boisei* ha sido llamado *Zinjanthropus boisei* y *Australopithecus boisei* [39], y todavía se refieren a él como a un *Australopithecine* robusto —en contraste con las dos especies *gracile* (esbeltas) de *Australopithecus* mencionadas antes—. Uno de los mensajes principales de este capítulo hace referencia a la naturaleza un tanto arbitraria de la clasificación zoológica.

Raymond Dart llamó *Australopithecus* al Niño de Taung, el espécimen tipo del género, y desde entonces nuestro antepasado se ha quedado con este deprimente y poco ingenioso nombre para siempre. Significa simplemente ‘mono del sur’. Nada que ver con Australia, que quiere decir ‘país del sur’. Cabe pensar que Dart podría haber dado con un nombre más imaginativo para un género tan importante. Incluso podría haber adivinado que se encontrarían otros miembros del género al norte del ecuador.

Ligeramente más antiguo que el Niño de Taung, uno de los cráneos mejor conservados que tenemos, aunque carece de mandíbula inferior, es el llamado Señora Ples. La Señora Ples, que en realidad podría haber sido un macho pequeño en lugar de una gran hembra, obtuvo «su» apodo porque fue clasificada originalmente en el género *Plesianthropus.* Esto significa ‘casi humano’, que es un nombre mejor que ‘mono del sur’. Cabría haber pensado en la conveniencia de haber denominado a todos *Plesianthropus,* cuando taxonomistas posteriores decidieron que la Señora Ples y su tipo eran del mismo género que el Niño de Taung. Pero las reglas de la nomenclatura zoológica son estrictas hasta el punto de la pedantería. La prioridad del nombramiento tiene preferencia sobre el sentido y la idoneidad. «Mono del sur» puede ser un nombre pésimo, pero no importa: es anterior al mucho más adecuado *Plesianthropus* y parece que estamos condenados a vivir con él, a menos que... Todavía espero malévolamente que alguien descubra en un polvoriento cajón de un museo de Sudáfrica un fósil largamente olvidado del mismo tipo que la Señora Ples y que el Niño de Taung, pero que lleve colgada una etiqueta garabateada con «espécimen tipo *Hemianthropus,* 1920». De un solo golpe todos los museos del mundo

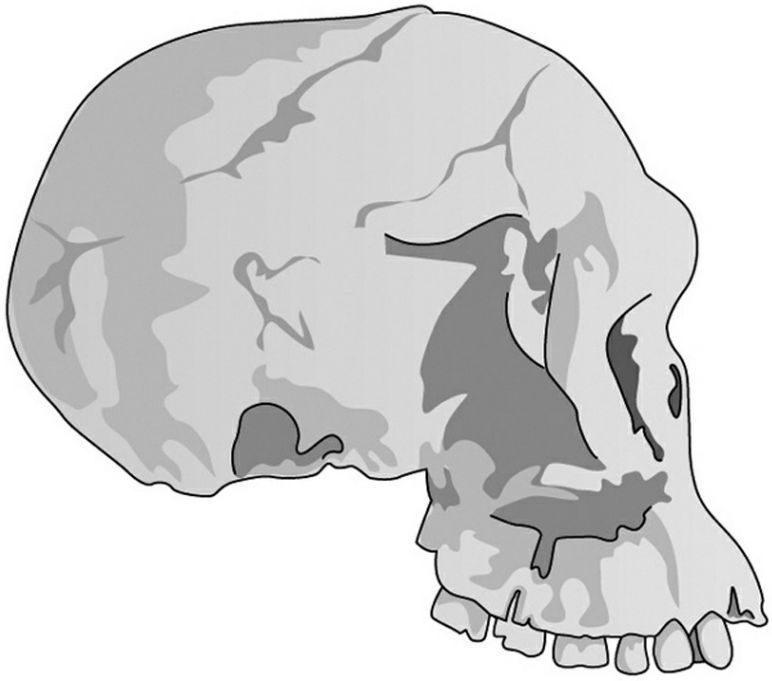
tendrían que reetiquetar inmediatamente sus especímenes de *Australopithecus* y pasar a denominarlos *Hemianthropus.* No se me ocurre otra situación en la que las reglas internacionales sean suficientemente poderosas como para dictaminar un cambio universal y con carácter retroactivo de nomenclatura de un día para otro.

La Señora Ples

Imagen 38

Pasemos ahora a mi siguiente argumento importante sobre los supuestos eslabones perdidos y la arbitrariedad de los nombres. Obviamente, cuando se transformó el nombre de la Señora Ples de *Plesianthropus* a *Australophitecus* no cambió nada en el mundo real. Presumiblemente nadie estaría tentado de pensar otra cosa. Pero consideremos un caso similar en el que un fósil se reexamina y se traslada, por motivos anatómicos, de un género a otro. O cuando su estatus genérico está en discusión entre antropólogos rivales —y esto ocurre con mucha frecuencia—. Después de todo, es esencial para la lógica de la evolución que hayan existido individuos que estuvieran exactamente en la frontera entre dos géneros, digamos *Australopithecus* y *Homo.* Es fácil mirar a la Señora Ples y a un cráneo de *Homo sapiens* moderno y decir «sí, no hay duda de que estos cráneos pertenecen a géneros diferentes». Si asumimos, como aceptan unánimemente los antropólogos actuales, que todos los

miembros del género *Homo* descienden de antepasados que pertenecen al género que denominamos *Australopithecus*, entonces se deduce necesariamente que, en algún lugar a lo largo de la cadena que va de una especie a la otra, debe de haber habido al menos un individuo que estuvo exactamente en la frontera. Este es un argumento importante, por lo que voy a continuar con él un poco más, si me lo permiten.



KNM ER 1813

Imagen 39

KNM ER 1470

Imagen 40

Sin olvidar la forma del cráneo de la Señora Ples como representante del *Australopithecus africanus* de hace dos millones de años, fijémonos en el cráneo llamado KNM ER 1813 (página siguiente). Después contemplemos el contiguo, llamado KNM ER 1470. Ambos están datados en aproximadamente 1,9 millones de años y ambos son considerados del género *Homo* por la mayoría de las autoridades. En la actualidad, ER 1813 se clasifica como *Homo habilis*, pero no siempre fue así. Hasta hace poco ER 1470 pertenecía a la misma especie, pero ahora ha habido un movimiento para reclasificarlo como *Homo rudolfensis*. Una vez más comprobamos lo volubles y transitorios que son nuestros nombres. Pero no importa: parece que ambos se mantienen en el género *Homo*. La diferencia obvia con la Señora Ples y los de su clase es que ella tenía una cara más saliente hacia adelante y una cavidad craneal más pequeña. En ambos aspectos, ER 1813 y ER 1470 parecen más humanos, y la Señora Ples es más «parecida a un mono».

Twiggy

Imagen 41

Fijémonos ahora en el cráneo de la siguiente imagen, llamado Twiggy. Twiggy se suele clasificar actualmente como *Homo habilis*. Pero su hocico, que apunta hacia fuera, lo acerca más a la Señora Ples que a ER 1470 o a ER 1813. No nos sorprendería si nos dijeran que Twiggy ha sido situado por algunos antropólogos en el género *Australopithecus* y por otros en el género *Homo*. De hecho, cada uno de estos fósiles ha sido, en varias ocasiones, clasificado como *Homo habilis* y como *Australopithecus habilis.* Como ya he mencionado, algunas autoridades en ciertos momentos han dado a ER 1470 un nombre diferente, cambiando *habilis* por *rudolfensis*. Y para rematar todo esto, el nombre específico *rudolfensis* se ha vinculado a los dos nombres genéricos, *Australopithecus* y *Homo.* En resumen, estos tres fósiles han sido denominados de formas diferentes por autoridades diferentes en momentos diferentes, con la siguiente lista de nombres:

KNM ER 1813: *Australopithecus habilis, Homo habilis.*

KNM ER 1470: *Australopithecus habilis, Homo habilis, Australopithecus rudolfensis, Homo rudolfensis.*
OH 24 (Twiggy): *Australopithecus habilis, Homo habilis.*

¿Debería esta confusión de nombres reducir nuestra confianza en la ciencia evolutiva? Todo lo contrario. Eso es exactamente lo que cabría esperar, dado que estas criaturas son todas especímenes intermedios, enlaces que antes faltaban pero ya no. Deberíamos estar realmente preocupados si no hubiera especímenes intermedios tan cercanos a los límites y, por tanto, tan difíciles de clasificar. De hecho, desde el punto de vista evolutivo, la asignación de nombres sería imposible si el registro fósil fuera más completo. En cierto sentido, es una suerte que los fósiles sean tan escasos. Si tuviéramos un registro fósil continuo y sin saltos, la asignación de nombres diferentes a especies y géneros se haría imposible, o al menos muy problemática. Una conclusión justa es que la fuente predominante de discordia entre los paleoantropólogos —si este fósil pertenece a este género/especie o a este otro— es, en un sentido profundo e interesante, estéril.

Partamos de la base hipotética de que nosotros, por algún golpe de suerte, hubiéramos sido bendecidos con un registro fósil continuo de todo el cambio evolutivo, sin ningún eslabón perdido. Ahora fijémonos en los cuatro nombres latinos que hemos aplicado a ER 1470. A primera vista, el salto de *habilis* a *rudolfensis* parecería más pequeño que el de *Australopithecus* a *Homo*. Dos especies dentro de un género son más parecidas entre sí que dos géneros. ¿No? ¿No es esta toda la base para la distinción entre el nivel de género (digamos *Homo* o *Pan* como género alternativo de los monos africanos) y el nivel de especie (digamos *troglodytes* o *paniscus* dentro de los chimpancés) en la jerarquía de clasificación? Bien, sí, eso es correcto cuando estamos clasificando animales modernos, que podemos imaginar como las puntas de las ramitas del árbol evolutivo, con todos sus antecesores dentro de la copa del árbol, cómodamente muertos y fuera del camino. Naturalmente, las ramitas que se unen entre sí más atrás (más en el interior de la copa del árbol) tenderán a ser menos parecidas que aquellas cuya confluencia (antepasado común más reciente) está más cerca de las puntas. El sistema funciona siempre y cuando no intentemos clasificar los antecesores muertos. Pero tan pronto como incluyamos nuestro hipotético registro fósil completo, todas las

separaciones claras dejan de funcionar. Se hace, en general, imposible aplicar nombres particulares. Podemos verlo fácilmente si retrocedemos en el tiempo, de forma parecida a como hicimos con los conejos en el capítulo 2.

A medida que seguimos hacia atrás la evolución del *Homo sapiens*, debe de llegar un momento en el que la diferencia con los seres humanos vivos sea suficientemente grande como para merecer un nombre específico, digamos *Homo ergaster*. Aun así, en cada paso del camino recorrido, los individuos serían presumiblemente tan similares a sus padres y a sus hijos como para ser ubicados en la misma especie. Ahora vamos más lejos hacia atrás, siguiendo el rastro del *Homo ergaster*, y llegará un momento en el que encontremos individuos lo suficientemente diferentes de la «corriente principal» *ergaster* como para merecer un nombre específico distinto, digamos *Homo habilis*. Y ahora llegamos al núcleo de este argumento. A medida que nos alejamos aún más, en algún punto debemos empezar a encontrar individuos lo suficientemente diferentes del *Homo sapiens* moderno como para merecer un nombre de género diferente: digamos *Australopithecus.* El problema es que «suficientemente diferente del *Homo sapiens* moderno» es un asunto bien distinto de «suficientemente diferente del primer *Homo»,* que aquí llamamos *Homo habilis*. Pensemos sobre el primer espécimen que nació como *Homo habilis.* Sus padres eran *Australopithecus.* ¿Pertenecía a un género diferente al de sus padres? ¡Esto es una tontería! Sí, sin duda lo es. Pero no es la realidad lo que falla, sino la insistencia humana en asignar todo a una categoría. En realidad, no hay criatura alguna que pueda ser considerada como el primer espécimen de *Homo habilis*. No hubo primeros especímenes de ninguna especie ni de ningún género ni de cualquier orden o clase o filo. Toda criatura nacida en algún momento habría sido clasificada —si hubiera tenido cerca un zoólogo para hacerlo— exactamente en la misma especie que sus padres y sus hijos. Aun así, viéndolo en perspectiva desde la modernidad y con la ventaja —sí, en este sentido paradójico de *ventaja*— de que falta la mayoría de los enlaces, se hace posible la clasificación en distintas especies, géneros, familias, órdenes, clases y filos.

Me gustaría que tuviésemos un registro completo y sin saltos de fósiles, una grabación cinemática de todo el cambio evolutivo tal y como sucedió. Me gustaría, también, porque sería fascinante ver la cara de todos

esos zoólogos y antropólogos que se enzarzan entre sí en eternas peleas por probar si un fósil pertenece a esta especie o a esa otra, a este género o a ese otro. Caballeros —me pregunto por qué nunca son señoras—, están discutiendo sobre palabras, no sobre la realidad. Como el mismo Darwin dijo en *El origen del hombre:* «En una serie de formas que van cambiando gradualmente desde alguna criatura parecida a un mono hasta el hombre que ahora existe, sería imposible fijar un punto definido en el que debiera ser utilizado el término "hombre"».

Homo erectus

Imagen 42

Desplacémonos ahora a través de los fósiles y miremos a algunos eslabones más recientes entre aquellos ya no perdidos pero que faltaban en tiempos de Darwin. ¿Qué especímenes intermedios podemos encontrar entre nosotros y las criaturas como ER 1470 y Twiggy, que a veces se llaman *Homo* y a veces *Australopithecus?* Ya nos hemos encontrado con algunos de ellos, como el Hombre de Java y el Hombre de Pekín, que normalmente se clasifican como *Homo erectus*. Pero estos vivieron en

Asia, y hay bastantes evidencias de que la mayor parte de nuestra evolución humana tuvo lugar en África. En el continente africano, sus equivalentes se suelen clasificar hoy como *Homo ergaster,* aunque durante muchos años fueron llamados *Homo erectus* —otra demostración de la volubilidad de nuestros procedimientos de asignación terminológica—. El espécimen más famoso de *Homo ergaster* y uno de los fósiles prehumanos más completos jamás encontrados es el Niño de Turkana, o Niño de Nariokotome, descubierto por Kamoya Kimeu, la estrella de los buscadores de fósiles del equipo de paleontólogos de Richard Lankey.

El Niño de Turkana vivió aproximadamente hace 1,6 millones de años y debió de morir con once años de edad. Otras indagaciones apuntan a que habría crecido hasta alcanzar una altura de 180 cm y que habría llegado a vivir hasta la edad adulta. El volumen proyectado de su cerebro de adulto sería de unos 900 cm3. Eso era lo habitual en los cerebros de los *Homo ergaster/erectus,* que oscilaban en torno a los 1.000 cm3. Es significativamente menor que el de los cerebros humanos modernos, que tienen alrededor de 1.300 o 1.400 cm3, pero mayor que el del *Homo habilis* (alrededor de 600 cm3), que, a su vez, supera al del *Australopithecus* (alrededor de 400 cm3) y al de los chimpancés (aproximadamente lo mismo). Hay que recordar que habíamos llegado a la conclusión de que nuestro antepasado de hace tres millones de años tenía el cerebro de un chimpancé, pero caminaba sobre sus patas traseras. A partir de todo ello podríamos suponer que la segunda mitad de la historia evolutiva humana, desde hace tres millones de años hasta el presente, sería un relato sobre el incremento del tamaño del cerebro. Y realmente así es.

El *Homo ergaster/erectus,* del que tenemos muchos especímenes fósiles, es un eslabón intermedio muy convincente, ya no perdido, entre el *Homo sapiens* de hoy y el *Homo habilis* de hace dos millones de años, que a su vez sería un eslabón maravilloso con el *Australopithecus* de hace tres millones de años, que, como hemos visto, podría muy bien describirse como un chimpancé que caminaba erguido. ¿Cuántos eslabones necesitamos para aceptar que ya no están «perdidos»? Y, ¿podemos cerrar también el salto entre el *Homo ergaster* y el *Homo sapiens* moderno? Sí: tenemos una gran cantidad de fósiles que cubren los últimos cientos de miles de años y que se sitúan entre ambos. A algunos se les ha dado nombre de especie, como al *Homo heidelbergensis,* al *Homo rhodesiensis* y al *Homo neanderthalensis.* A otros (que algunas veces son los mismos)

se les denomina *Homo sapiens* «arcaicos». Pero, sigo insistiendo, los nombres no importan. Lo que importa es que ya no hay eslabones perdidos. Abundan los especímenes intermedios.

SIMPLEMENTE VE Y MIRA

Por tanto, tenemos una documentación fósil adecuada del cambio gradual desde Lucy, la «chimpancé que camina erguida», de hace tres millones de años, hasta nosotros mismos hoy día. ¿Cómo afrontan los negadores de la historia esta evidencia? Algunos por negación literal. Me encontré con ello en 2008 en una entrevista que hice para un documental de la televisión británica Channel Four titulado *El genio de Charles Darwin*. Estaba entrevistando a Wendy Wright, presidenta de Mujeres Preocupadas por América. Su opinión de que «la píldora del día después es la mejor amiga de un pedófilo» proporciona una idea de su capacidad de razonamiento, y realmente superó todas las expectativas durante la entrevista. En el documental televisivo solo se utilizó una pequeña parte de la entrevista. A continuación reproducimos una transcripción bastante completa, pero como es lógico, y por el interés de este capítulo, me he limitado a seleccionar los momentos en que discutíamos sobre el registro fósil de los ancestros humanos:

> WENDY: A lo que me remito es a que los evolucionistas todavía carecen de la ciencia que los respalde. En lugar de eso, se censura la ciencia que no les respalda. Por ejemplo, el que no haya pruebas de que la evolución lleve de una especie a otra. Si fuera cierto, si la evolución hubiera ocurrido, entonces tendría que haber alguna prueba, bien desde los pájaros hasta los mamíferos o, incluso, más allá de eso debería haber al menos una prueba.
>
> RICHARD: Hay una enorme cantidad de pruebas. Lo siento, pero ustedes siguen repitiendo eso como un mantra, porque solo se escuchan los unos a los otros. Me encantaría que abrieran los ojos y miraran a las pruebas.
>
> WENDY: Muéstremelas, muéstreme todo, muéstreme los huesos, muéstreme los caparazones, muéstreme la evidencia de los estadios intermedios que llevan de una especie a otra.
>
> RICHARD: Cada vez que se descubre un fósil que está entre dos especies,

ustedes dicen: «Ah, ahora tenemos dos saltos donde antes solo había uno». Quiero decir que casi cada fósil que se encuentra es algo intermedio entre una cosa y otra.

WENDY *[riéndose]*: Si eso fuera así, el Museo Smithsoniano de Historia Natural estaría lleno de estos ejemplos, pero no lo está.

RICHARD: Lo está, lo está... en el caso de los humanos, desde la época de Darwin hay una enorme cantidad de pruebas sobre los especímenes intermedios en forma de fósiles humanos y, por ejemplo, hay varias especies de *Australopithecus* y... luego tenemos el *Homo habilis*. Estos son especímenes intermedios entre el *Australopithecus*, que era una especie más antigua, y el *Homo sapien*s, que es más moderna. Quiero decir que, ¿por qué no los ven como especímenes intermedios?

WENDY: ... si la evolución hubiera tenido esas pruebas reales, se mostrarían en los museos, no solo en ilustraciones.

RICHARD: Le acabo de decir que el *Australopithecus*, el *Homo habilis*, el *Homo erectus*, el *Homo sapiens* —primero el *Homo sapiens* arcaico y luego el *Homo sapiens* moderno— constituyen una maravillosa serie de especímenes intermedios.

WENDY: Todavía no tienen las pruebas materiales, así que...

RICHARD: Las pruebas materiales están ahí. Vaya al museo y véalas... No las tengo aquí, obviamente, pero puede ir a cualquier museo y puede ver al *Australopithecus*, puede ver al *Homo habilis*, puede ver al *Homo erectus*, puede ver al *Homo sapiens* arcaico y al moderno. Una maravillosa serie de especímenes intermedios. ¿Cómo puede seguir diciendo «Muéstreme las pruebas», cuando ya lo he hecho? Vaya al museo y véalas.

WENDY: Lo he hecho. He ido a los museos y todavía hay tantos de nosotros que no estamos convencidos...

RICHARD: ¿Lo ha visto, ha visto el *Homo erectus*?

WENDY: Y creo que existe ese esfuerzo, ese esfuerzo agresivo para intentar convencernos y censurarnos. Parece que proviene de la frustración de que haya tanta gente que todavía no cree en la evolución. Si los evolucionistas estuvieran tan convencidos de sus creencias, no existiría ese interés por censurar información. Eso demuestra que la evolución todavía no está probada y es cuestionable.

RICHARD: Estoy... confieso que estoy frustrado. No es un problema de represión, sino del hecho de que le he hablado de cuatro o cinco fósiles... *[Wendy se ríe]* ... y usted parece simplemente ignorar lo que estoy diciendo... ¿Por qué no

va y mira esos fósiles?

WENDY: ... si estuvieran en los museos en los que he estado muchas veces, entonces los miraría objetivamente, pero a lo que me remito es a...

RICHARD: Están en el museo.

WENDY: A lo que me remito es a que la filosofía de la evolución puede conducir a ideologías que han sido muy destructivas para la raza humana...

RICHARD: Sí, pero no sería mala idea que, en lugar de señalar las interpretaciones equivocadas del darwinismo, que de forma tan horrorosa han sido utilizadas políticamente, tratara de entender el darwinismo y ocupar así una posición adecuada para contrarrestar esos horribles malentendidos.

WENDY: Bien, la verdad es que muy a menudo nos vemos presionados por la agresividad de aquellos que están a favor de la evolución. No es que nos escondamos de esa información que usted insiste en presentar. No es que sea desconocida para nosotros, porque no podemos alejarnos de ella. Se nos muestra todo el tiempo. Pero pienso que su frustración viene del hecho de que muchos de nosotros hemos visto su información y aun así no creemos en esa ideología.

RICHARD: ¿Ha visto el *Homo erectus*? ¿Ha visto el *Homo habilis*? ¿Ha visto el *Australopithecus*? Le he hecho esa pregunta.

WENDY: Lo que he visto es que en los museos y en los libros de texto cada vez que dicen mostrar las diferencias evolutivas entre una especie y otra, se basan en ilustraciones y dibujos... no en una evidencia material.

RICHARD: Bien, tendría que ir al Museo de Nairobi para ver los fósiles originales, pero puede ver moldes de los fósiles —copias exactas de estos fósiles — en cualquier museo importante en el que quisiera entrar.

WENDY: Bien, déjeme preguntarle, ¿por qué es tan agresivo? ¿Por qué es tan importante para usted que todo el mundo crea lo que usted cree?

RICHARD: No estoy hablando sobre creencias, estoy hablando sobre hechos. Le he hablado de ciertos fósiles y cada vez que le pregunto sobre ellos evade la cuestión y se pasa a otra cosa.

WENDY: ... debería haber cantidades enormes de pruebas materiales y no solo una cosa aislada, pero una vez más, no hay pruebas.

RICHARD: He elegido fósiles de homínidos porque pensé que estaría más interesada en ellos, pero puede encontrar fósiles similares de cualquier grupo de vertebrados que me nombre.

WENDY: Pero creo que prefiero volver a preguntarle por qué es tan importante para usted que todo el mundo crea en la evolución...

RICHARD: No me gusta la palabra creencia. Prefiero pedir a la gente que mire las pruebas, y le estoy pidiendo a usted que mire las pruebas... Quiero que vaya a los museos y mire los hechos, y no crea lo que le han dicho acerca de que no hay pruebas. Simplemente vaya y mire las pruebas.

WENDY *[riéndose]*: Sí, y lo que diría...

RICHARD: No es gracioso. Quiero decir que vaya, que vaya de verdad. Le he hablado sobre los fósiles de homínidos y puede ir y ver la evolución de un caballo, puede ir a ver la evolución de los primeros mamíferos, puede ir y mirar la evolución de un pez, puede ir y mirar la transición de un pez a los anfibios terrestres y los reptiles. Encontrará cualquiera de esas cosas en cualquier buen museo. Simplemente abra los ojos y mire los hechos.

WENDY: Y yo diría, abra los ojos y mire las comunidades que han sido construidas por aquellos que creen en un Dios que nos ha creado a cada uno de nosotros...

Podría parecer, en esta discusión, que yo estaba siendo innecesariamente obstinado en dejar clara la petición de que debería ir a un museo y mirar, pero realmente lo decía en serio. Esa gente está entrenada para decir «No hay fósiles, muéstreme las pruebas, muéstreme un solo fósil...», y lo dicen tan a menudo que llegan a creérselo. Así que mencioné tres o cuatro fósiles a esta mujer e intenté no dejar que cambiara de tema simplemente ignorándolos. Los resultados son deprimentes, y un buen ejemplo de la táctica más común utilizada por los negadores de la historia cuando se enfrentan a las pruebas: sencillamente ignóralo y repite el mantra: «Muéstreme los fósiles. ¿Dónde están los fósiles? No hay fósiles. Solo muéstreme un fósil intermedio, eso es todo lo que pido...».

Otros se confunden con los nombres y con la inevitable tendencia que tienen los nombres a crear divisiones falsas donde no las hay. Cada fósil que pudiera ser potencialmente un espécimen intermedio se clasifica siempre como *Homo* o como *Australopithecus.* Ninguno se clasifica como intermedio. Por tanto, no hay especímenes intermedios. Pero, como he explicado antes, es una consecuencia inevitable de las convenciones de la nomenclatura zoológica, no es un hecho vinculado al mundo real. *Incluso* el espécimen intermedio más perfecto que se pudiera imaginar sería metido con calzador en el género *Homo* o *Australopithecus.* De hecho, es probable que fuera llamado *Homo* por la mitad de los paleontólogos y *Australopithecus* por la otra mitad. Y desafortunadamente, en lugar de

estar unidos y afirmar que los fósiles ambiguos intermedios son exactamente lo que deberíamos *esperar* de la teoría de la evolución, los paleontólogos, probablemente, darían una impresión completamente falsa y casi llegarían a las manos por su desacuerdo terminológico.

Es similar a lo que ocurre con la distinción legal entre un adulto y un menor. Por motivos legales, y para decidir si una persona joven es suficientemente adulta como para votar o alistarse en el Ejército, es necesario hacer una distinción absoluta. En 1969, la edad legal para votar en Gran Bretaña fue rebajada de los veintiuno a los dieciocho años (en 1971 se hizo lo mismo en Estados Unidos). Ahora hay un debate sobre rebajarla a dieciséis. Pero, sea cual sea la edad legal para votar, nadie piensa seriamente que el paso de la medianoche de los dieciocho (o de los veintiuno, o de los dieciséis) te convierte en una persona diferente. Nadie piensa seriamente que hay dos tipos de personas, niños y adultos, sin niveles «intermedios». Es obvio que cualquiera entiende que todo el periodo de crecimiento es un largo ejercicio «en lo intermedio». Podría decirse que algunos de nosotros realmente nunca hemos crecido. De forma similar, la evolución humana, desde, por ejemplo, el *Australopithecus afarensis* hasta el *Homo sapiens*, ha consistido en una serie ininterrumpida de padres de los que nacen niños que con seguridad habrían sido situados por un taxonomista contemporáneo en la misma especie que sus progenitores. En retrospectiva, y por razones que no están lejos del legalismo, los taxónomos modernos insisten en adjuntar a cada fósil una etiqueta que debe decir algo como *Australopithecus* u *Homo*. Las etiquetas de los museos no *pueden* decir algo como «a medio camino entre *Australopithecus africanus* y *Homo habilis*». Los negadores de la historia se aprovechan de esta convención terminológica para sostener que hay *evidencia* de una falta de especímenes intermedios en el mundo real. También podríamos decir que no existe algo así como un adolescente, porque cada persona a la que miramos resulta ser o un adulto que puede votar (dieciocho años o más) o un niño que no vota (menos de dieciocho). Sería tanto como afirmar que la necesidad legal de un umbral para establecer la edad a partir de la cual se puede votar prueba que los adolescentes no existen.

Volvamos de nuevo a los fósiles. Si los apologistas del creacionismo tienen razón, el *Australopithecus* es «solo un mono», por lo que sus predecesores son irrelevantes para la búsqueda de los «eslabones

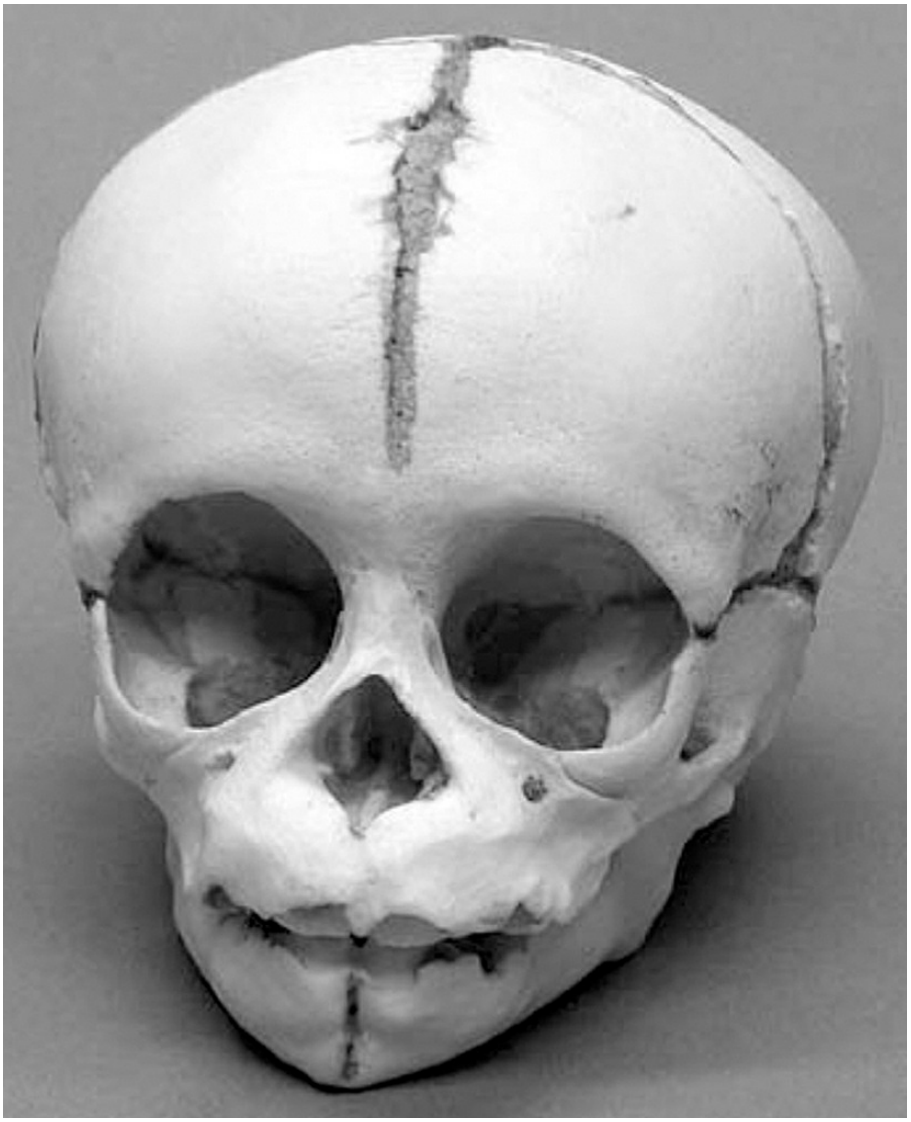
perdidos» de la evolución humana. Sin embargo, también podríamos buscarlos. Hay algunas trazas, aunque fragmentarias. El *Ardipithecus*, que vivió hace entre cuatro y cinco millones de años, es conocido principalmente por sus dientes, pero se han encontrado suficientes huesos de los pies y del cráneo como para sugerir, al menos para la mayoría de los anatomistas que los han estudiado, que caminaba erguido. A la misma conclusión han llegado los descubridores de otros dos fósiles todavía más antiguos, *Orrorin* (el Hombre del Milenio) y *Sahelanthropus* (Toumai, en la imagen). El *Sahelanthropus* es sorprendente por su antigüedad (seis millones de años, cercano a la edad de nuestro antepasado común con los chimpancés) y por haber sido encontrado en el valle del Rift (en el Chad, donde su apodo, Toumai, significa ‘esperanza de vida’). Otros paleontólogos son escépticos acerca de las afirmaciones de bipedismo que se han hecho sobre *Orrorin* y *Sahelanthropus* por parte de sus descubridores. Y, como podría sugerir un cínico ante cada fósil problemático, ¡muchos de los que dudan son descubridores de otros fósiles!

Sahelanthropus

Imagen 43

La paleoantropología, más que cualquier otro campo de la ciencia, está sembrada —¿o debería decir animada?— de rivalidades. Tenemos que admitir que el registro fósil que conecta al mono que camina erguido, el *Australopithecus,* con el antepasado (supuestamente) cuadrúpedo que compartimos con los chimpancés, es aún muy pobre. No sabemos cómo se irguieron sobre sus patas traseras nuestros antepasados. Necesitamos más fósiles. Pero por lo menos regocijémonos con el buen registro fósil del que podemos disfrutar —a diferencia de Darwin— y que nos muestra la transición evolutiva desde el *Australopithecus,* con su cerebro del tamaño de un chimpancé, hasta el *Homo sapiens* moderno, con nuestro cráneo en forma de globo y nuestro gran cerebro.

A lo largo de esta sección he mostrado algunas imágenes de cráneos y he animado a que se comparen. Quizá se hayan fijado, por ejemplo, en la protrusión de la boca o del arco supraciliar en algunos fósiles. Algunas veces las diferencias son muy sutiles, lo que contribuye a afianzar la apreciación de las transiciones graduales de un fósil a otro posterior. Pero ahora quiero introducir un nuevo aspecto que aumenta la complejidad y se convertirá en un elemento interesante por sí mismo. Los cambios que tienen lugar dentro del tiempo de vida de un individuo, cuando crece, son, en cualquier caso, mucho más dramáticos que los que vemos cuando comparamos adultos de generaciones sucesivas.

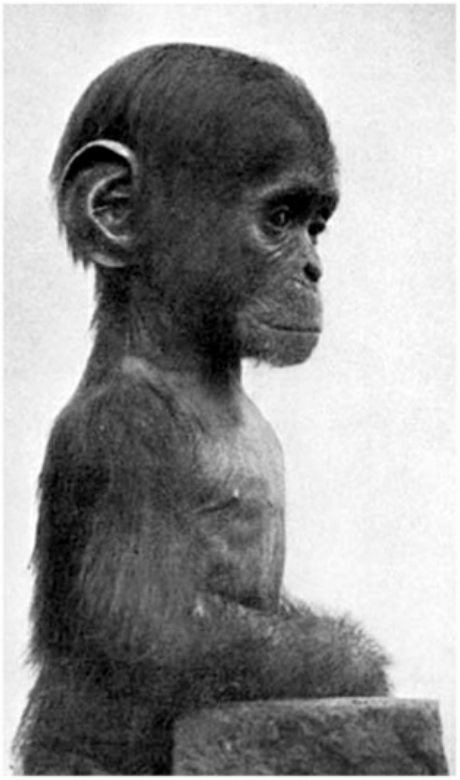


Cráneo de chimpancé poco antes de nacer

Imagen 44

El cráneo de la imagen de la página anterior pertenece a un chimpancé poco antes del nacimiento. Es, obviamente, muy diferente del cráneo de chimpancé adulto que aparece al comienzo del capítulo (página 174), y mucho más aún del de un humano (de un humano adulto y también de un bebé). Hay una fotografía (página siguiente) que se ha publicado con frecuencia en la que aparecen un chimpancé joven y un chimpancé adulto, y que se utiliza a menudo para ilustrar la interesante idea de que, en la evolución humana, las características juveniles se retienen durante la madurez (o de que —lo que no tiene por qué ser la misma cosa— llegamos a ser sexualmente maduros cuando nuestros cuerpos todavía son

juveniles). Pensaba que la fotografía era demasiado buena como para ser cierta, y la envié a mi colega Desmond Morris para que me diera su opinión de experto. Le pregunte si podría ser un montaje y si había visto alguna vez un chimpancé joven que se pareciera tanto a un humano. El doctor Morris se mostró escéptico sobre la espalda y los hombros, pero estuvo de acuerdo con la cabeza. «Los chimpancés tienen una encorvadura característica en su postura, y este tiene un maravilloso y erguido cuello humano. Pero si tomamos solo la cabeza, la fotografía sería fiable». Sheila Lee, la responsable de ilustraciones de la editorial de este libro, buscó la fuente original de esta famosa fotografía, que resultó ser una expedición al Congo realizada entre 1909 y 1915, organizada por el Museo Americano de Historia Natural. Los animales estaban muertos cuando fueron fotografiados, y ella señala que el fotógrafo, Herbert Lang, era también taxidermista. Sería tentador conjeturar que la rara postura humana del bebé chimpancé se debe a una mala disección —si no fuera por el hecho de que, según el museo, Lang fotografió a sus especímenes *antes* de disecarlos—. Sin embargo, la postura de un chimpancé muerto se puede ajustar de una forma que sería imposible con un chimpancé vivo. La conclusión de Desmond Morris parece sostenerse. La postura humana de los hombros del bebé chimpancé puede ser sospechosa, pero la cabeza es fiable.



Fotografías de Lang de un chimpancé bebé y de un adulto

Imagen 45

Si damos credibilidad a la cabeza, incluso aunque la postura de los hombros pueda no ser auténtica, vemos inmediatamente que una comparación entre cráneos de adultos fósiles podría confundirnos. O, por decirlo de forma más constructiva, la espectacular diferencia entre la cabeza juvenil y la adulta nos muestra lo fácil que es que una característica como la protrusión de la boca pueda cambiar en la dirección apropiada para hacerse más —o de hecho, menos— humana. La embriología del chimpancé «sabe» cómo hacer una cabeza parecida a la humana, porque lo hace para cada chimpancé en los años de infancia. Parece muy plausible que, como el *Australopithecus* evolucionó a través de varios especímenes intermedios hasta el *Homo sapiens*, acortándose el hocico durante todo el camino, lo hizo por la ruta obvia de retener características juveniles en la madurez (el proceso llamado «neotenia», mencionado en el capítulo 2). En cualquier caso, una gran cantidad de cambios evolutivos tienen que ver con la velocidad a la que crecen ciertas partes con relación a otras. Esto se llama «crecimiento heterocrónico» (‘con tiempos diferentes’). Supongo que lo que quiero decir es que el cambio evolutivo es como un garabato, una vez que se aceptan los hechos observados del cambio embriológico. Los embriones toman forma por el crecimiento diferencial —diferentes partes crecen a diferentes velocidades—. El cráneo de un bebé chimpancé cambia a un cráneo adulto mediante el crecimiento relativamente rápido de los huesos de las mandíbulas y del hocico, en comparación con el de los otros huesos del cráneo. Repito, cada animal de cada especie cambia durante su propio desarrollo embriológico mucho más espectacularmente de como lo hace la forma típica de adulto de generación en generación, a medida que transcurre el tiempo geológico. Y esta es mi pista para seguir con un capítulo sobre embriología y su relevancia en la evolución.

8

USTED MISMA LO HIZO EN NUEVE MESES

El irascible genio de J. B. S. Haldane, entre cuyos logros se cuenta haber sido uno de los tres arquitectos del neodarwinismo, fue desafiado en una ocasión por una señora después de una conferencia pública. Es una anécdota transmitida de boca en boca, y John Maynard Smith, lamentablemente, no está para confirmar las palabras exactas, pero el intercambio ocurrió más o menos así:

ESCÉPTICA DE LA EVOLUCIÓN: Profesor Haldane, incluso con los miles de millones de años de los que usted dice ha dispuesto la evolución, simplemente no puedo creer que sea posible ir desde una simple célula hasta un complicado cuerpo humano, con sus miles de millones de células organizadas en huesos y músculos y nervios, un corazón que bombea sin cesar durante décadas, miles y miles de vasos sanguíneos y túbulos renales, y un cerebro capaz de pensar y hablar y sentir.

J.B.S.: Pero señora, si usted misma lo hizo. Y solo tardó nueve meses.

La señora que hacía la pregunta quedó momentáneamente fuera de juego por el giro inesperado de la respuesta de Haldane. No sería exagerado decir que le había bajado los humos. Pero quizá, en cierto sentido, la respuesta de Haldane la pudo dejar insatisfecha. No sé si hizo una pregunta suplementaria, pero si la hizo, podría haber sido más o menos así:

ESCÉPTICA DE LA EVOLUCIÓN: Ah, sí, pero el desarrollo del embrión sigue instrucciones genéticas. Y son estas *instrucciones* sobre cómo construir un cuerpo complicado las que usted, profesor Haldane, afirma que evolucionaron por selección natural. Y a mí todavía me cuesta creerlo, aun dándole a la evolución

mil millones de años.

Quizá ella tuviera algo de razón. Incluso si se demuestra que una inteligencia divina es la responsable final del diseño de la complejidad de la vida, es definitivamente falso que ella *diseñara* a los seres vivos de forma remotamente parecida a como lo hacen los alfareros que trabajan con arcilla, por ejemplo, o los carpinteros, los caldereros, los sastres o los fabricantes de coches. Podemos haber sido «desarrollados maravillosamente», pero no hemos sido *«creados* maravillosamente». Cuando los niños cantan «Él creó sus brillantes colores / Él creó sus pequeñas alas» [40], están recitando una canción infantil que es obviamente falsa. Lo que sea que Dios haga, no es *crear* colores brillantes y pequeñas alas. Si hizo algo fue supervisar el desarrollo embrionario de las cosas, por ejemplo, uniendo secuencias de genes que dirigen un proceso de desarrollo automático. Las alas no se crean, crecen —progresivamente— a partir de primordios de miembros dentro de un huevo.

Insistiendo en este punto tan importante, que debería ser obvio pero que no lo es, Dios nunca creó una pequeña ala en su eterna vida. Si creó algo (no lo hizo desde mi punto de vista, pero dejémoslo pasar porque no estoy hablando aquí sobre eso), lo que creó fue una *receta* embriológica o algo parecido a un programa de ordenador para controlar el desarrollo embriológico de una pequeña ala (junto con muchas otras cosas también). Por supuesto, Dios podría afirmar que es igual de inteligente, un derroche de habilidad igual de sobrecogedor, diseñar una receta o un programa para un ala que crear un ala. Pero, por el momento, quiero desarrollar la distinción entre *crear* algo como un ala y lo que realmente ocurre en embriología.

SIN COREÓGRAFO

Los comienzos de la embriología contemplaron la disputa entre dos doctrinas opuestas, llamadas «preformacionismo» y «epigénesis». La diferencia entre ellas no siempre ha sido bien entendida, por lo que dedicaré algo de tiempo a explicar estos dos términos. Los

preformacionistas creían que el óvulo (o el esperma, ya que los preformacionistas estaban subdivididos en «ovistas» y «espermistas») contenía un bebé en miniatura u «homúnculo». Todas las partes del bebé estarían en su sitio, conectadas correctamente entre sí y esperando solo a ser infladas como un globo dividido en compartimentos. Esto suscitaba varios problemas. El primero, al menos en su forma ingenua, que requería lo que todo el mundo sabe que es falso: que heredáramos solo de uno de los padres —la madre para los ovistas, el padre para los espermistas—. Además, los preformacionistas de esta clase tenían que hacer frente a la regresión infinita de tipo muñeca rusa que fuerza a que haya un homúnculo dentro del homúnculo —o si no infinita, al menos suficientemente larga como para conducirnos hasta Eva (Adán para los espermistas)—. La única salida de esta regresión sería construir un homúnculo nuevo cada generación, escaneando cuidadosamente el cuerpo adulto de la generación anterior. Esta «herencia de las características adquiridas» no ocurre —de lo contrario, los chicos judíos nacerían sin prepucio y los culturistas (pero no sus gemelos teleadictos) tendrían bebés con abdominales muy marcados, pectorales y glúteos musculosos—.

Para ser justos con los preformacionistas, hay que decir que se enfrentaron, directa e imparcialmente, a la necesidad lógica de la regresión, por muy absurda que pudiera parecer. Al menos algunos de ellos realmente creían que la primera mujer (u hombre) contenía embriones miniaturizados de todos sus descendientes, anidados unos dentro de otros como las muñecas rusas. Y hay un sentido en el que tienen que creerlo: un sentido que merece la pena mencionar porque prefigura la esencia de este capítulo. La creencia en que Adán fue «creado» en lugar de nacer, implica que Adán no tenía genes —o al menos no los necesitaba para desarrollarse—. Adán no tenía embriología, simplemente comenzó a existir. Una deducción similar condujo al escritor victoriano Philip Gosse (el padre en la obra de Edmund Gosse *Padre e hijo: estudio de dos temperamentos)* a escribir un libro llamado *Omphalos* (‘ombligo’ en griego), argumentando que Adán tuvo que tener ombligo a pesar de no haber nacido nunca. Una consecuencia más sofisticada del razonamiento «omphalógico» sería que las estrellas que están a una distancia de nosotros mayor de unos pocos miles de años luz deben de haber sido creadas con rayos de luz prefabricados, que abarcasen casi todo el recorrido hasta nosotros —¡de otra forma no habríamos sido capaces de verlas hasta el

futuro lejano!—. Burlarse de la «omphalogía» parece frívolo, pero hay un aspecto serio sobre la embriología que es el objeto de este capítulo. Es una cuestión difícil de entender —de hecho, yo estoy tratando de entenderlo— y me aproximo a ella desde varias direcciones.

Por las razones dadas, el preformacionismo, al menos en su versión original tipo «muñeca rusa», nunca llegó a cuajar. ¿Existe otra modalidad de esta creencia que pudiera ser revivida sensatamente en la era del ADN? Bueno, quizá, pero lo dudo. Los libros de texto de biología repiten una y otra vez que el ADN es un «plano» para construir un cuerpo. Pero no lo es. Un plano verdadero de, por ejemplo, un coche o una casa, incluye una relación uno a uno entre el papel y el producto acabado. De esto se deduce que un plano es reversible. Es igual de sencillo ir desde la casa al plano que al contrario, precisamente porque es una relación uno a uno. En realidad lo primero es aún más fácil, porque uno tiene que *construir* la casa, pero solo hace falta tomar medidas para *dibujar* el plano. Si se toma el cuerpo de un animal, no importa cuántas medidas detalladas se hagan, no se puede reconstruir su ADN. Esto convierte en falsa la afirmación de que el ADN es un plano.

Es teóricamente posible imaginar —quizá es la forma en que funcionan las cosas en algún planeta alienígena— que el ADN podría haber sido una descripción codificada de un cuerpo: un tipo de mapa tridimensional proyectado sobre el código lineal de las «letras» del ADN. Esto sí sería reversible. No es una idea totalmente ridícula escanear todo el cuerpo para construir un mapa. Si esta fuera la forma en la que funcionara el ADN, podríamos representarlo como un tipo de neopreformacionismo. No volvería a traer el espectro de las muñecas rusas. No me queda claro si traería en su lugar el espectro de la herencia de un solo padre. El ADN tiene una forma sorprendentemente precisa de intercalar cada mitad de la información paterna con la mitad exacta de la información de la madre, pero ¿cómo se podría intercalar la mitad de la lectura del escáner del cuerpo del padre con la mitad de la lectura del escáner del cuerpo de la madre? Dejemos esto: queda muy lejos de la realidad.

Por tanto, el ADN no es, con toda seguridad, un plano. A diferencia de Adán, que fue creado directamente en su forma de adulto, todos los cuerpos reales se desarrollan y crecen a partir de una única célula, a través de los estadios intermedios de embrión, feto, bebé, niño y adolescente. Quizá en algún mundo alienígena las criaturas vivas se ensamblan a sí

mismas de los pies a la cabeza como un conjunto ordenado de biopíxeles tridimensionales obtenidos de la lectura codificada de un escáner. Pero no es así como funcionan las cosas en nuestro planeta y, de hecho, creo que hay tres razones —que ya he mencionado en otro sitio y en las que no voy a entrar aquí— por las que nunca podría haber sucedido en este planeta [41].

La alternativa histórica al preformacionismo es la epigénesis. Si el preformacionismo se basa en planos, la epigénesis se basa en algo más parecido a una receta o a un programa de ordenador. La definición que aparece en el *Shorter Oxford English Dictionary* es más bien moderna, y no creo que Aristóteles, que acuñó la palabra, pudiera reconocerla:

> **epigénesis**: Una teoría del desarrollo de un organismo por la diferenciación progresiva de un todo inicialmente no diferenciado [42].

En el libro *Principles of Development* [Principios de desarrollo], escrito por Lewis Wolpert y algunos colegas, se describe la epigénesis como la idea de que las nuevas estructuras aparecen progresivamente. Hay un sentido en el que la epigénesis es cierta de forma autoevidente, pero los detalles son importantes y no debemos tentar al diablo. ¿Cómo se desarrolla progresivamente el organismo? ¿Cómo «sabe» un todo inicialmente no diferenciado de qué forma diferenciarse progresivamente, si no es siguiendo un plano? La distinción que quiero hacer en este capítulo, que se corresponde en gran medida con la existente entre preformacionismo y epigénesis, es la distinción entre la arquitectura planificada y el *autoensamblado*. El significado de la arquitectura planificada es claro, porque la vemos por todas partes a nuestro alrededor, en nuestros edificios y diversos artefactos. El autoensamblado es menos familiar y requerirá algo más de atención por mi parte. En el campo del desarrollo, el autoensamblado ocupa una posición análoga a la selección natural en la evolución, aunque es definitivamente un proceso diferente. Ambos logran por medios automáticos, no deliberados ni planificados, resultados que parecen, bajo una mirada superficial, haber sido meticulosamente planificados.

J. B. S. Haldane le dijo la verdad a su escéptica interrogadora, pero no habría negado que hay un misterio, lindando con lo milagroso (pero sin llegar a serlo), en el hecho de que una única célula dé lugar a un cuerpo

humano en toda su complejidad. Y el misterio se mitiga parcialmente porque la hazaña se logra con la ayuda de instrucciones de ADN. La razón por la que el misterio persiste es que encontramos difícil de imaginar, incluso en principio, cómo podríamos escribir las instrucciones para construir un cuerpo de la forma en que el cuerpo se construye realmente, es decir, mediante lo que he llamado «autoensamblado», que está relacionado con lo que los programadores de ordenadores llaman procedimiento «ascendente», frente a procedimiento «descendente».

Un arquitecto diseña una gran catedral. Después, mediante una cadena jerárquica de órdenes, el procedimiento de construcción se separa en diferentes secciones que, a su vez, se dividen en subsecciones, y así hasta que las instrucciones llegan finalmente a los albañiles, carpinteros y cristaleros, quienes van a trabajar hasta que la catedral se termina y acaba pareciéndose a los dibujos originales del arquitecto. Esto es diseño descendente.

El diseño ascendente funciona de forma completamente distinta. Nunca lo creí, pero había una tradición que afirmaba que algunas de las mejores catedrales medievales de Europa nunca tuvieron un arquitecto. Nadie diseñó la catedral. Cada albañil y carpintero habría empezado a trabajar a su manera, en su propia esquina del edificio y sin prestar atención a lo que los otros estaban haciendo ni a ningún plano general. De alguna forma habría emergido una catedral de esta anarquía. Si eso hubiera ocurrido realmente, habría sido arquitectura ascendente. A pesar del mito, es seguro que eso no ocurrió así en las catedrales [43]. Pero eso es esencialmente lo que ocurre en la construcción de un montículo de termitas o de un nido de hormigas —y en el desarrollo de un embrión—. Es lo que hace a la embriología tan diferente de cualquier otra cosa con la que los humanos estamos familiarizados en los campos de la construcción o la fabricación.

El mismo principio funciona en cierto tipo de programas de ordenador, en cierto tipo de comportamiento animal y —uniendo ambas cosas— en los programas de ordenador diseñados para simular el comportamiento animal. Supongamos que queremos entender el comportamiento de las bandadas de estorninos. Existen algunas películas impactantes en YouTube de las cuales se han sacado las instantáneas que se reproducen en la página de color 16. Estas maniobras de ballet fueron fotografiadas en Otmoor, cerca de Oxford, por Dylan Winter. Lo que

resulta sorprendente del comportamiento de los estorninos es que, a pesar de lo que podría parecer, no hay un coreógrafo, ni, por lo que sabemos, un líder. Cada pájaro está siguiendo reglas locales.

El número de pájaros en estas bandadas puede llegar a ser de millares y casi nunca chocan. Esto resulta fundamental porque, dada la velocidad a la que vuelan, cualquier impacto les causaría graves heridas. A menudo toda la bandada parece comportarse como un individuo, girando y revoloteando simultáneamente. En la fotografía, por ejemplo, hay tres bandadas: una pequeña y densa a la derecha, moviéndose deprisa de izquierda a derecha; una grande, más difusa, con forma de cúpula sobre el suelo, en el centro izquierda de la fotografía, moviéndose despacio de derecha a izquierda y luego volviendo; y una bandada similar, grande, difusa, como una cúpula apoyada sobre uno de sus lados, en la parte de arriba de la fotografía, moviéndose a una velocidad media de derecha a izquierda. En esta parte de la película, como suele ocurrir, parece que las bandadas se mueven unas hacia otras en direcciones opuestas, manteniendo intacta su coherencia como bandadas independientes. Esto las hace parecer casi milagrosas, pero las bandadas están a distancias diferentes de la cámara y no se mueven en rumbo de colisión. La precisa definición de los bordes de la bandada contribuye al placer estético. No se diluyen gradualmente, sino que determinan una frontera abrupta. La densidad de pájaros en la frontera no es inferior a la que hay en el interior de la bandada, mientras que es cero fuera de ella. En cuanto empezamos a pensar en ello de esta forma, ¿no es maravillosamente sorprendente?

El espectáculo completo valdría como un salvapantallas más que elegante para su ordenador. Pero no nos gustaría tener una grabación real de estorninos porque el salvapantallas repetiría los mismos movimientos de ballet una y otra vez y, por tanto, no se activarían todos los píxeles por igual. Lo que querríamos es una *simulación* de una bandada de estorninos; y como le diría cualquier programador, hay una forma correcta y otra incorrecta de hacerla. No intente coreografiar el ballet completo —sería un tipo de programación terrible para una tarea de estas características—. Necesito hablar sobre la forma correcta de hacerlo, porque muy probablemente es la misma en la que están programados los cerebros de los propios pájaros. Incluso yendo más allá, es una estupenda analogía del funcionamiento de la embriología.

Veamos cómo programar el comportamiento de la bandada de estorninos. Dediquemos todo el esfuerzo a programar el comportamiento de un único individuo. Determinemos en el interior de los estorninos-robots las reglas detalladas de cómo volar y de cómo reaccionar a la presencia de los estorninos vecinos, dependiendo de su distancia y posición relativas. Introduzcamos las reglas que cuantifican el peso del comportamiento de los vecinos y de la iniciativa individual al cambiar de dirección. Estas reglas del modelo serían definidas mediante medidas tomadas cuidadosamente de pájaros reales en acción. Proporcionemos a nuestro ciberpájaro una cierta tendencia a variar las reglas aleatoriamente. Después de escribir un complicado programa para especificar las reglas de comportamiento de un único estornino, llega ahora el paso definitivo que estoy enfatizando en este capítulo. *No* intente programar el comportamiento de una bandada completa, como habrían intentado programadores de una generación anterior. En lugar de eso, clone el estornino ya programado. Haga miles de copias de su pájaro-robot, quizá todas iguales o quizá con alguna ligera variación aleatoria en sus reglas. Ahora «libere» miles de modelos de estornino en su ordenador para que interaccionen con los otros, obedeciendo todos las mismas reglas.

Si consigue establecer las reglas de comportamiento correctas para un único estornino, miles de ellos, cada uno como un punto en la pantalla, se comportarán como estorninos reales volando en bandada en invierno. Si el comportamiento no está bien definido, puede volver atrás y ajustar el programa del estornino inicial, quizá a la luz de nuevas medidas del comportamiento de estorninos reales. Ahora clone la nueva versión mil veces reemplazando los mil que no funcionaron. Siga iterando su reprogramación del estornino inicial hasta que el comportamiento de la bandada formada por miles de ellos en la superficie de un salvapantallas sea realista. Craig Reynolds escribió un programa siguiendo estas directrices en 1986 (no específicamente para estorninos) y lo llamó «Boids».

El punto esencial aquí es que no hay ni un coreógrafo ni un líder. Orden, organización, estructura —todo ello *emerge* como efecto lateral de las reglas, que se obedecen *localmente* repetidas veces, pero no globalmente—. Y así es como funciona la embriología. Todo se hace con reglas locales a varios niveles, pero sobre todo al nivel de una única célula.

Sin coreógrafo. Sin director de orquesta. Sin planificación central. Sin arquitecto. En el campo del desarrollo o en el de la fabricación, el equivalente a este tipo de programación es el *autoensamblado*.

El cuerpo de un humano, de un águila, de un topo, de un delfín, de un leopardo, de una rana leopardo, de una golondrina: todos están ensamblados de una forma tan bella que parece imposible creer que los genes que programan su desarrollo no actúan como un plano, como un diseño, como un plan maestro. Pero no: como con los estorninos del ordenador, todo se hace mediante células que obedecen reglas locales. El cuerpo maravillosamente «diseñado» *emerge* como una consecuencia de que las células obedecen las reglas *localmente,* sin referencia a nada que pudiera ser llamado un plan global. Las células de un embrión en desarrollo revolotean y bailan unas alrededor de las otras como estorninos en bandadas gigantescas. Pero hay diferencias, y son importantes. Frente a los estorninos, las células están físicamente unidas entre sí en capas y bloques: sus «bandadas» se llaman «tejidos». Cuando revolotean y bailan como estorninos en miniatura, la consecuencia es que se forman estructuras tridimensionales, resultado de la invaginación de los tejidos en respuesta a los movimientos de las células [44]; o se hinchan o encogen debido a los patrones locales de crecimiento y muerte de la célula. La analogía que más me gusta para esto es la del arte del plegado de papel, el origami, sugerida por el distinguido embriólogo Lewis Wolpert en su libro *The Triumph of the Embrio* [El triunfo de la embriología]; pero antes de llegar a eso necesito quitar de en medio algunas analogías alternativas que se nos podrían ocurrir —analogías obtenidas de los aparatos humanos y de los procesos de fabricación—.

ANALOGÍAS PARA EL DESARROLLO

Es sorprendentemente difícil encontrar una buena analogía para el desarrollo de tejido vivo, pero se pueden hallar similitudes parciales con aspectos particulares del proceso. Una receta encierra parte de verdad y es una analogía que utilizo algunas veces para explicar por qué un «mapa» no es apropiado. A diferencia de un mapa, una receta es irreversible. Si se sigue la receta de un pastel paso a paso, se obtendrá un pastel. Pero no se

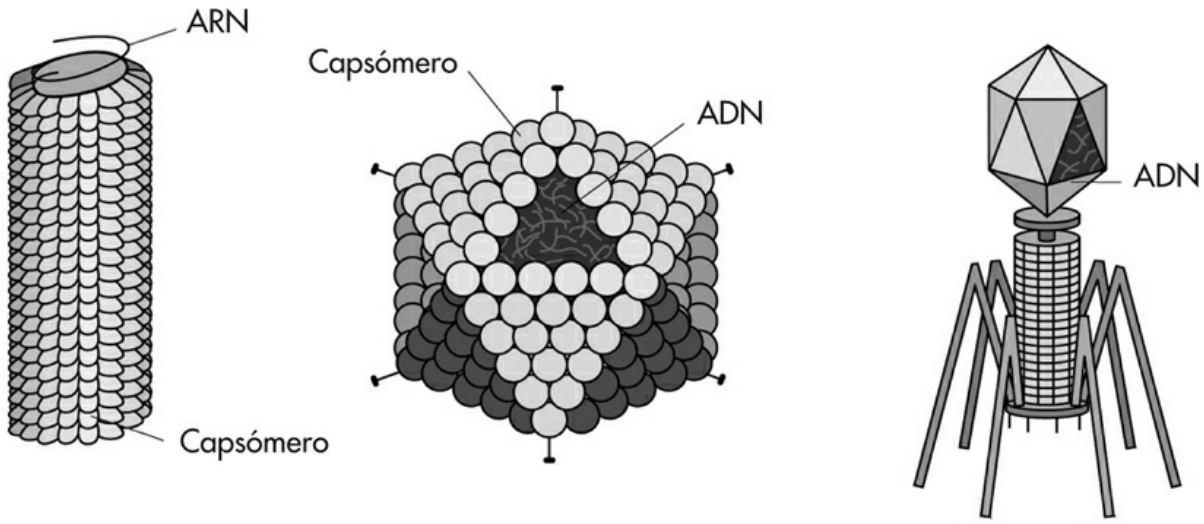
puede coger un pastel y reconstruir la receta —con certeza no las palabras exactas de la receta—, mientras que, como hemos visto, se puede coger una casa y reconstruir algo parecido al plano original. Esto se debe a la relación uno a uno entre los «trocitos» de una casa y los «trocitos» de un plano. Con excepciones llamativas, como la cereza que corona el pastel, no hay una relación uno a uno entre los trocitos del pastel y las palabras o las frases de la receta.

¿Qué otras analogías podría haber con los procesos de fabricación de los seres humanos? La escultura está muy lejos de ser una posibilidad. Un escultor comienza con un pedazo de piedra o de madera y lo moldea por sustracción, eliminando material hasta que solo queda la forma deseada. Decididamente hay un claro parecido con un proceso en particular de la embriología llamado «apoptosis». La apoptosis es la muerte celular programada, y está relacionada, por ejemplo, con el desarrollo de los dedos de las manos y de los pies. En el embrión humano, los dedos de manos y pies están todos unidos. En el útero, todos tenemos pies y manos palmeados. Las membranas desaparecen (en la mayoría de la gente: hay excepciones ocasionales) mediante la muerte programada. Recuerda un poco al modo en que un escultor talla su obra, pero no resulta lo suficientemente frecuente o relevante como para expresar el funcionamiento normal de la embriología. Puede que los embriólogos piensen brevemente en el «cincel del escultor», pero no dejan que ese pensamiento dure mucho tiempo.

Algunos escultores trabajan no moldeando de forma sustractiva, sino cogiendo un pedazo de arcilla o de cera blanda y amasándola hasta darle forma (para hacer después un vaciado en bronce, por ejemplo). Esta tampoco es una buena analogía para la embriología. Tampoco lo es la del oficio del sastre o la fabricación de vestidos. La tela preexistente se corta en formas determinadas según un plan preconcebido y luego se cose junto con otras piezas cortadas. A menudo se les da la vuelta para ocultar las costuras, y esta parte, al menos, sí constituye una acertada analogía con ciertas fases de la embriología. Pero en general la embriología no se parece más a la fabricación de prendas de vestir que a la creación de esculturas. Tejer podría ser mejor ejemplo, y es que toda la forma del jersey se establece a partir de muchas partes individuales, como las células. Pero hay analogías mejores, tal como veremos a continuación.

Pensemos en el ensamblado de un coche o de otra maquinaria complicada en una línea de montaje de una fábrica: ¿es una buena analogía? Como la escultura y la sastrería, el ensamblado de partes prefabricadas es una forma eficiente de crear algo. En una fábrica de coches las partes están prefabricadas, a menudo mediante la fundición de piezas en moldes (y no hay, creo, nada remotamente parecido a la *fundición* en la embriología). Después, las partes prefabricadas se unen en una línea de ensamblado y se atornillan, remachan, sueldan o pegan juntas, paso a paso, de acuerdo con un plano dibujado con precisión. Una vez más, la embriología no tiene nada que se parezca a un plano trazado previamente. Pero hay semejanzas en la unión ordenada de partes preensambladas, como cuando en una planta de montaje de coches se unen y ensamblan en la posición adecuada los carburadores previamente fabricados, los distribuidores de encendido, las correas de ventilador y las culatas.

En la imagen hay tres tipos de virus. A la izquierda está el virus mosaico del tabaco (TMV), que parasita las plantas de tabaco y de otros miembros de la familia *Solanaceae*, como los tomates. En el centro hay un adenovirus, que infecta el sistema respiratorio de muchos animales, incluidos nosotros. A la derecha está el bacteriófago T4, que parasita bacterias. Parece una cápsula lunar y se comporta como tal, «aterrizando» sobre la superficie de una bacteria (que es mucho más grande) y después descolgándose él mismo gracias a sus «patas» de araña para insertar una sonda en el medio, a través de la pared de la célula, e inyectar el ADN dentro. El ADN viral secuestra la maquinaria que fabrica las proteínas de la bacteria, que se ve obligada a fabricar nuevos virus. Los otros dos virus de la imagen hacen algo similar, aunque no se parecen ni se comportan como cápsulas lunares. En todos los casos su material genético secuestra el aparato de fabricación de proteínas de la célula anfitriona y desvía su línea de producción molecular para crear virus en gran cantidad, en lugar de sus productos normales.



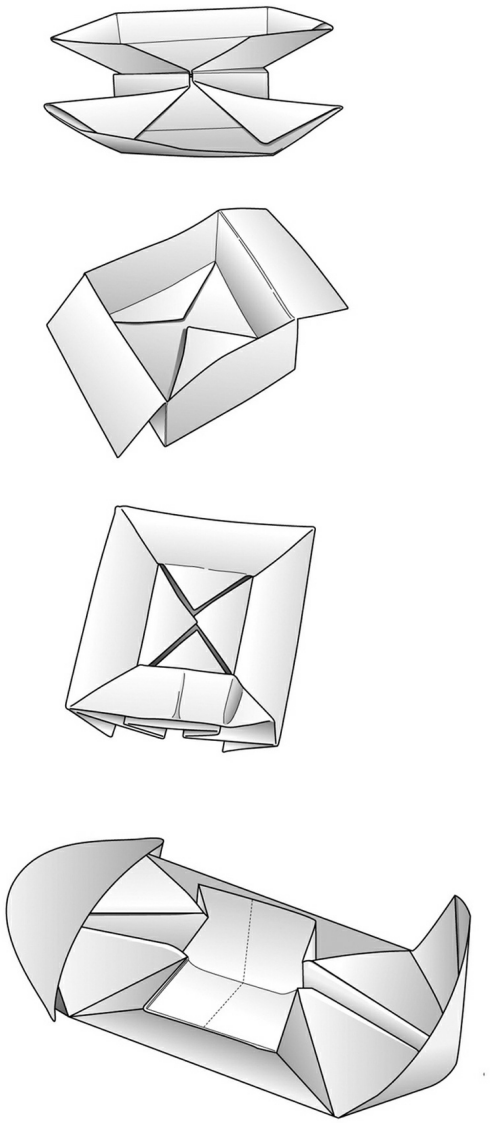
Tres tipos de virus

Imagen 46 (Ilusraciones en el texto) Imagen 46 (Créditos Individuales)

La mayor parte de lo que se ve en las imágenes es el contenedor de proteína del material genético y, en el caso del T4 («cápsula lunar»), la maquinaria para infectar al anfitrión. Lo que es interesante es la forma en que se ensambla este aparato de hacer proteínas. Realmente se autoensambla. Cada virus es ensamblado a partir de varias moléculas de proteínas previamente fabricadas. Cada molécula de proteína, de una forma que veremos ahora, se ha autoensamblado en una «estructura terciaria» característica según las leyes de la química, dada una secuencia particular de aminoácidos. Y después, en el virus, las moléculas de proteína se unen entre sí para formar la llamada «estructura cuaternaria», de nuevo siguiendo reglas locales. No hay un plan global ni un plano.

Las subunidades de las proteínas, que se unen como las piezas de Lego para formar la estructura cuaternaria, se llaman «capsómeros». Observe lo geométricamente perfectas que son estas construcciones. El adenovirus del centro tiene exactamente 252 capsómeros, dibujados como pequeñas bolas y organizados en un icosaedro. El icosaedro es el sólido platónico perfecto que tiene veinte caras triangulares. Los capsómeros se organizan en un icosaedro no de acuerdo a un plan maestro o a un plano, sino simplemente porque cada uno de ellos sigue las leyes de la atracción química localmente cuando choca con otros como él. Así es como se forman los cristales y, de hecho, el adenovirus puede describirse como un cristal hueco muy pequeño. La «cristalización» de los virus es un ejemplo

especialmente bello de autoensamblado, que estoy tratando de presentar como un principio importante por el cual las criaturas se construyen a sí mismas. El fago T4 («cápsula lunar») también tiene un icosaedro como principal receptáculo de ADN, pero su estructura cuaternaria autoensamblada es más compleja; incorpora unidades adicionales de proteínas ensambladas de acuerdo a reglas locales diferentes en el aparato de inyección y en las «patas» que están unidas al icosaedro.



Junco chino de origami (abajo), con tres «estados larvales»: «catamarán», «armario con dos puertas» y «fotografía en un marco»

Imagen 47

Volviendo de los virus a la embriología de criaturas más grandes, llegamos a mi analogía favorita entre las técnicas de construcción humana: el origami. El origami es el arte de plegar papel de forma constructiva, desarrollado hasta su nivel más avanzado en Japón. La única construcción origami que sé hacer es el junco chino. Me lo enseñó mi padre, que lo aprendió cuando se puso de moda en su internado durante la década de 1920 [45]. Una característica biológicamente realista es que la «embriología» del junco chino pasa a través de varios estadios «larvales» intermedios que son, en sí mismos, construcciones muy bonitas, de la misma forma que una oruga es una etapa intermedia maravillosa en el camino hacia la mariposa, a la que no se parece mucho. Comenzando con un simple trozo de papel cuadrado que se dobla —nunca cortándolo ni pegándolo, y nunca añadiendo trozos nuevos—, el procedimiento nos lleva a través de tres «estados larvales» reconocibles: un «catamarán» (en la imagen superior), un «armario con dos puertas» (en el centro) y una «fotografía en un marco» (abajo), antes de culminar en el junco chino «adulto».

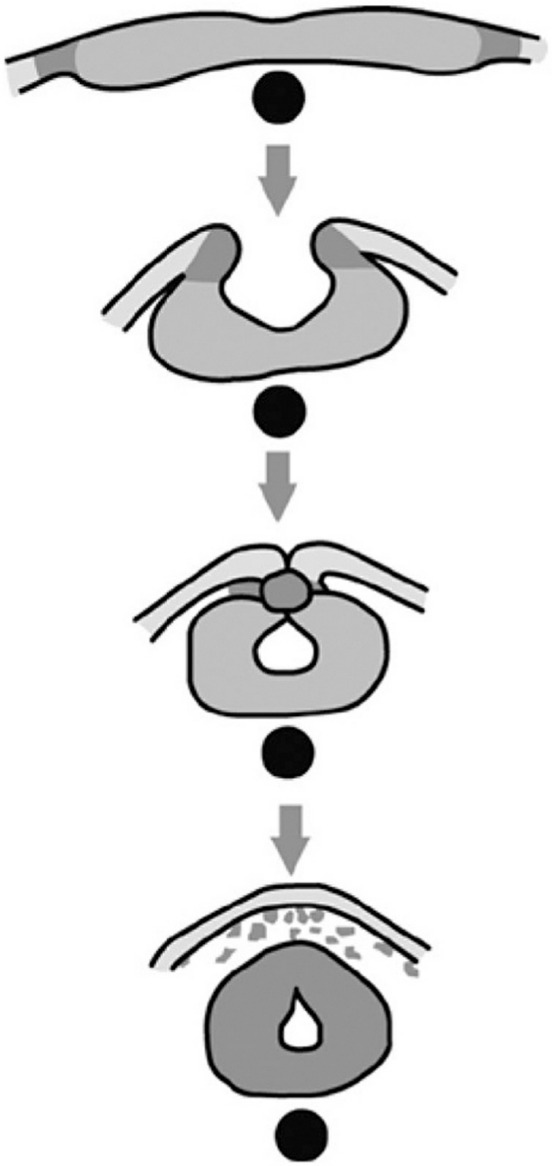
En favor de la analogía del origami cabe decir que, al principio, cuando te enseñan a hacer un junco chino —y no solo el junco, sino también los tres estadios «larvales»: catamarán, armario y marco de fotos —, este aparece como una sorpresa. Las manos pueden realizar el plegado, pero claramente no se está siguiendo un plano del junco chino ni de ninguno de sus estadios larvales. Se está siguiendo un conjunto de reglas de plegado que parecen no tener conexión con el producto final, hasta que este emerge como una mariposa de su crisálida. De esta forma, el origami captura parte de la importancia de las «reglas locales», en contraste con un plan global.

Profundizando en la analogía del origami, el plegado, la invaginación y la posibilidad de darse la vuelta son algunos de los trucos favoritos utilizados por los tejidos embrionarios cuando construyen un cuerpo. La analogía funciona especialmente bien para los estadios embrionarios tempranos. Pero tiene sus limitaciones, y aquí hay dos obvias. Primero, se necesitan las manos humanas para hacer el plegado. Segundo, el «papel embrión» en desarrollo no crece. Termina pesando exactamente lo mismo que al empezar. Para acentuar la diferencia, a menudo me refiero a la embriología biológica como «origami creciente» en lugar de solo «origami».

En realidad, estas dos limitaciones se anulan entre sí. Las capas de tejido que se pliegan, se invaginan y se dan la vuelta en un embrión en desarrollo, de hecho, crecen, y es ese mismo crecimiento lo que proporciona parte de la fuerza motora que en el origami otorga la mano humana. Si queremos hacer un modelo de origami con una capa de tejido vivo en lugar de con papel muerto, hay al menos una posibilidad de que, si la capa crece de la forma adecuada, no de forma uniforme sino más rápidamente en algunas partes que en otras, esto pueda provocar de modo automático que asuma una forma concreta —e incluso que se pliegue o invagine, o se dé la vuelta de cierta manera— sin la necesidad de que las manos hagan el estiramiento y el plegado, y sin que sea preciso un plan global, solo con reglas locales. Y de hecho es más que una simple posibilidad, porque en realidad ocurre. Llamémoslo «autoorigami». ¿Cómo funciona el autoorigami en la práctica, en la embriología? Funciona porque lo que ocurre en el embrión real, cuando una capa de tejido crece, es que la célula se divide. Y las células consiguen un crecimiento desigual de las distintas partes de la capa de tejido, y en cada parte de la capa crecen siguiendo porcentajes determinados por reglas locales. De esta forma, por un camino indirecto, volvemos a la importancia fundamental de las reglas locales ascendentes frente a las reglas globales descendentes. Lo que en realidad sucede en los primeros estadios del desarrollo embrionario es una serie completa (mucho más complicada) de versiones de este simple principio.

Veamos cómo funciona el origami en los estadios tempranos del desarrollo de los vertebrados. El único óvulo fertilizado se divide para crear dos células. Después las dos se dividen en cuatro. Y así sucesivamente, con el número de células duplicándose y cuadruplicándose con rapidez. En esta etapa no hay crecimiento, no hay inflación. El volumen original del óvulo fertilizado se divide literalmente, como al partir un pastel, y se termina con una bola esférica de células que tiene el mismo tamaño que el óvulo. No es una bola sólida, sino hueca, y se denomina «blástula». La siguiente etapa, la gastrulación, es el sujeto de un famoso aforismo de Lewis Wolpert: «El momento más importante de la vida de una persona no es el nacimiento, ni el matrimonio, ni la muerte, sino la gastrulación».

La gastrulación es un tipo de terremoto microcósmico que barre la superficie de la blástula y revoluciona toda su forma. Los tejidos del embrión se reorganizan masivamente. La gastrulación implica, típicamente, una mella en la bola hueca que es la blástula, de tal forma que pasa a tener dos capas con una abertura al mundo externo (véase la simulación por ordenador en la página 211). La capa exterior de esta «gástrula» se llama ectodermo; la capa interior, endodermo, y también hay algunas células en el espacio situado entre el ectodermo y el endodermo, que se denomina mesodermo. Cada una de estas capas primordiales está destinada a construir las partes principales del cuerpo. Por ejemplo, la piel externa y el sistema nervioso provienen del ectodermo; los intestinos y otros órganos internos provienen del endodermo, y el mesodermo pasa a ser músculo y hueso.



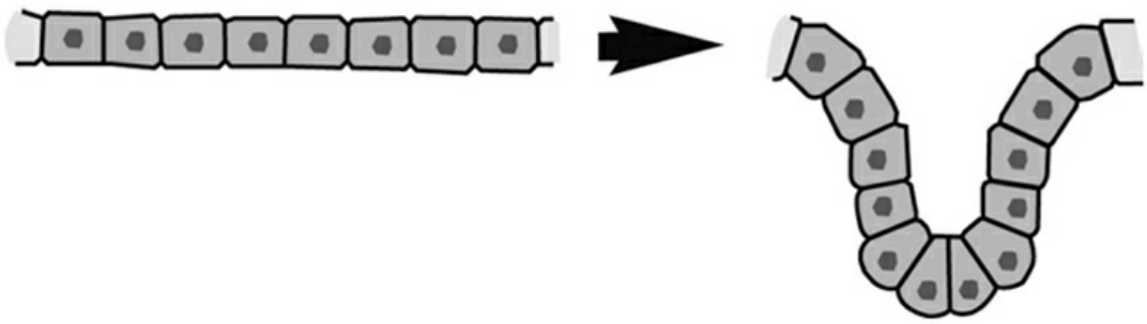
Neurulación

Imagen 48 (Ilusraciones en el texto) Imagen 48 (Créditos Individuales)

El siguiente paso en el origami del embrión se llama neurulación. El diagrama adjunto muestra una sección transversal a través de la parte media de la espalda de un embrión de un anfibio que está en neurulación (podría ser una rana o una salamandra). El círculo negro es el notocordio, una vara en proceso de endurecimiento que actúa como precursora de la espina dorsal. El notocordio es característico del filo *Cordata*, al cual pertenecemos nosotros y todos los vertebrados (aunque nosotros, como la mayoría de los vertebrados modernos, solo lo tenemos cuando somos embriones). En la neurulación, como en la gastrulación, la invaginación es

muy evidente. Recuérdese que dije que el sistema nervioso proviene del ectodermo. Bien, veamos cómo. Una sección del ectodermo se invagina (hacia atrás progresivamente a lo largo del cuerpo, como una cremallera), se enrolla a sí misma en un tubo y queda pinzada donde la superficie del tubo se une con la cremallera, de tal forma que termina recorriendo la longitud del cuerpo entre la capa externa y el notocordio. El tubo está destinado a convertirse en la médula espinal, el tronco nervioso principal del cuerpo. La parte frontal se hincha y se convierte en el cerebro. Y todo el resto de los nervios se deriva mediante divisiones celulares posteriores a partir de este tubo principal [46].

No quiero entrar en los detalles de la gastrulación o la neurulación, salvo para decir que son maravillosas y que la metáfora del origami se mantiene muy bien para ambas. Me preocupan los principios generales por los que los embriones se hacen más complicados a lo largo del origami creciente. En la imagen de la página siguiente se muestra uno de los movimientos propios de las capas de células durante el curso del desarrollo embrionario, por ejemplo, durante la gastrulación. Se puede ver fácilmente cómo esta invaginación podría ser un movimiento útil en el origami creciente, y desempeña, desde luego, un papel importante en la gastrulación y la neurulación.



Invaginación en una capa de células

Imagen 49

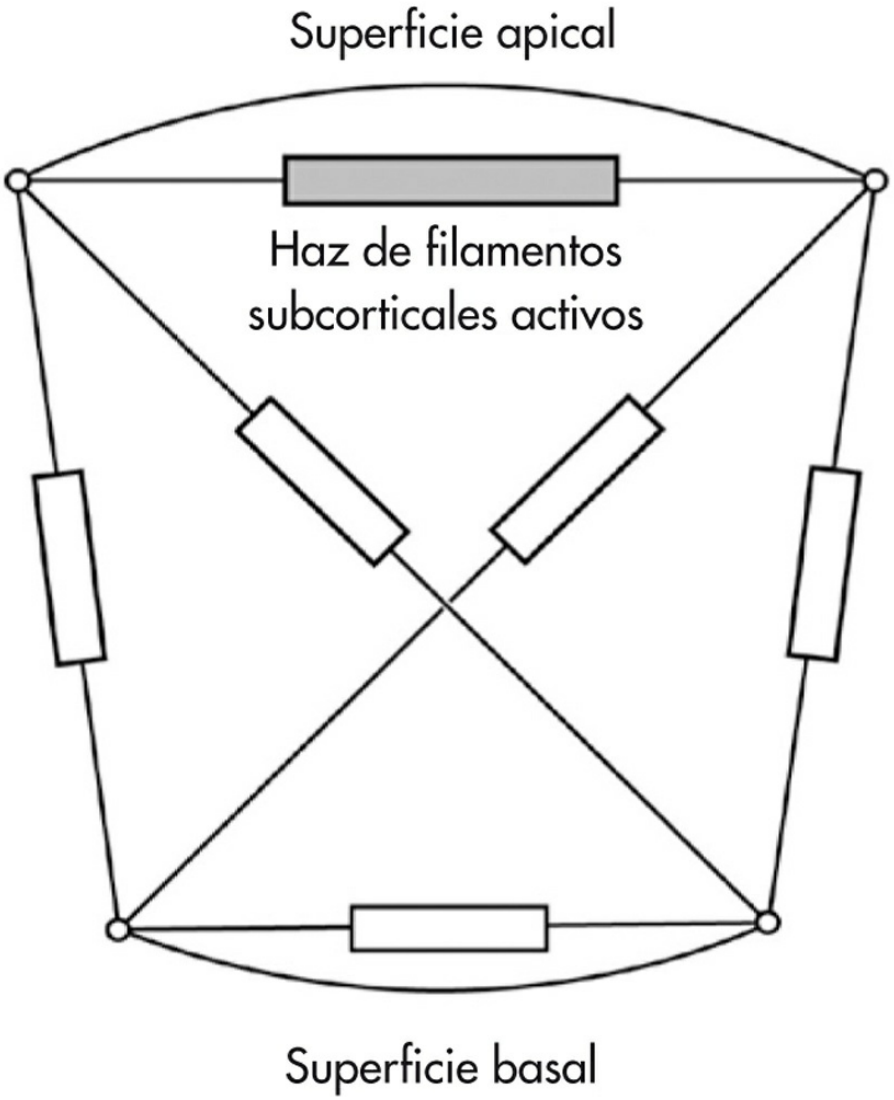
La gastrulación y la neurulación se llevan a cabo pronto en el desarrollo y afectan a la forma completa del embrión. La invaginación y otras maniobras de «origami creciente» llevan a cabo estas etapas de embriología temprana, y esos y otros trucos similares están implicados más tarde en el desarrollo, cuando se construyen los órganos

especializados, como los ojos y el corazón. Pero, dado que no hay manos para hacer el plegado, ¿mediante qué procesos mecánicos se logran estos movimientos dinámicos? Parcialmente, como ya dije, mediante la simple expansión propia. Las células se multiplican sobre una capa de tejido. Su área, por tanto, aumenta y, no teniendo otro sitio adonde ir, no les queda otra opción más que torcerse o invaginarse. Pero el proceso está realmente más controlado y ha sido descifrado por un grupo de científicos en colaboración con el brillante biólogo matemático George Oster, de la Universidad de California, en Berkeley.

Modelando células como estorninos

Oster y sus colegas siguieron la misma estrategia que planteamos al principio del capítulo para una simulación de estorninos en bandada. En lugar de programar el comportamiento de toda una blástula, programaron el comportamiento de una única célula. Después «clonaron» muchas células, todas iguales, y observaron lo que pasaba cuando esas células se juntaban en el ordenador. Cuando digo que programaron el comportamiento de una única célula, sería mejor decir que programaron un modelo matemático de una única célula, incorporando en él ciertos hechos conocidos sobre la célula, pero de forma simplificada. Específicamente se sabe que el interior de las células está entrecruzado por microfilamentos: un tipo de bandas elásticas en miniatura, pero con la propiedad adicional de que son capaces de realizar una contracción activa, como fibras musculares de contracción rápida. De hecho, estos microfilamentos utilizan el mismo principio de contracción que las fibras musculares [47]. El modelo de Oster simplificó la célula a dos dimensiones para dibujarla en la pantalla del ordenador, y con solo media docena de filamentos estratégicamente situados, como puede verse en el diagrama. En el modelo de ordenador, todos los microfilamentos tenían ciertas propiedades cuantitativas con nombres que significan algo para los físicos: un «coeficiente de amortiguamiento viscoso» y un «coeficiente de elasticidad del muelle». No importa qué significa exactamente: son la clase de cosas que a los físicos les gusta medir de un muelle. Aunque es probable que en una célula real se puedan contraer muchos filamentos, Oster y sus colegas

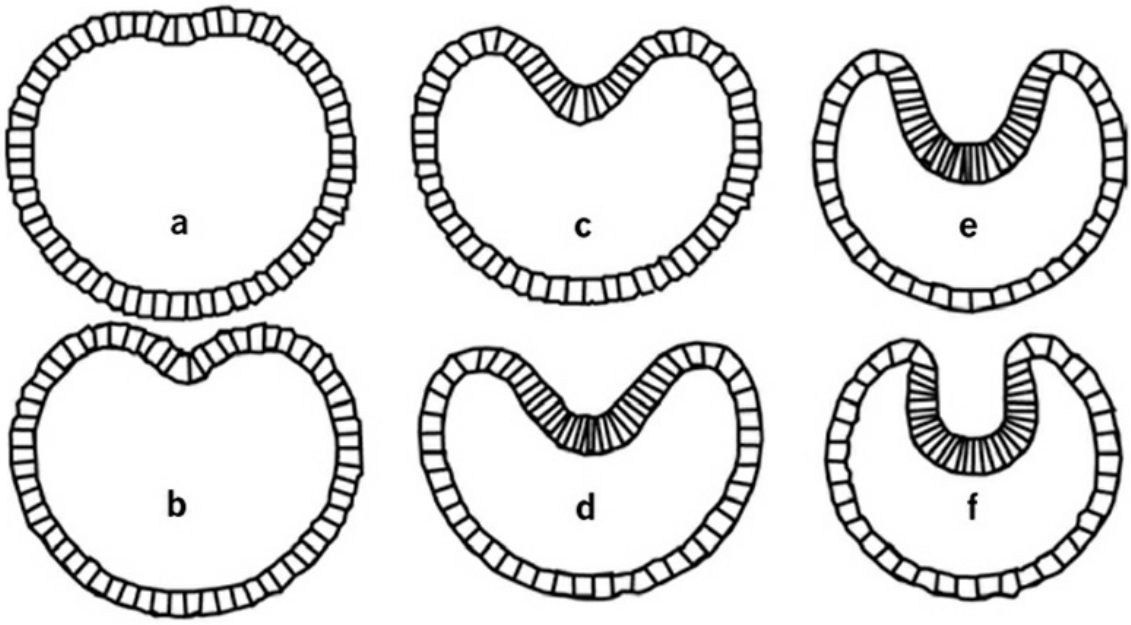
simplificaron el asunto dotando a solo uno de los seis filamentos de esa capacidad. Si pudieron obtener resultados realistas incluso después de descartar algunas de las propiedades conocidas de la célula, debería ser posible —presumiblemente— conseguir resultados al menos tan buenos con un modelo más complejo que mantuviera esas propiedades. En lugar de permitir que el filamento contráctil de su modelo se contrajera a su antojo, introdujeron una propiedad que es común en ciertos tipos de fibras musculares: cuando se estiran más allá de una longitud crítica, la fibra responde contrayéndose a una distancia mucho más corta que la longitud de equilibrio normal.



Microfilamentos dentro del modelo celular de Oster

Imagen 50

Ahora tenemos un modelo de una única célula: un modelo muy simplificado que consiste en un contorno bidimensional con seis muelles elásticos insertados, uno de los cuales tiene la propiedad especial de responder a un estiramiento impuesto externamente con una contracción activa. Este es el estadio uno del proceso de modelado. En el estadio dos, Oster y sus colegas clonaron hasta doce células de su modelo y las situaron en un círculo, como una blástula (bidimensional). Entonces cogieron una célula y manipularon su filamento contráctil para provocar su contracción. Lo que ocurrió después es demasiado maravilloso como para no contarlo. ¡La blástula modelo entró en gastrulación! En la imagen pueden verse seis pantallazos que muestran lo que ocurrió (de la *a* a la *f)*. Una onda de contracción se propagó lateralmente a partir de la célula que la había provocado y la bola de células se invaginó espontáneamente.

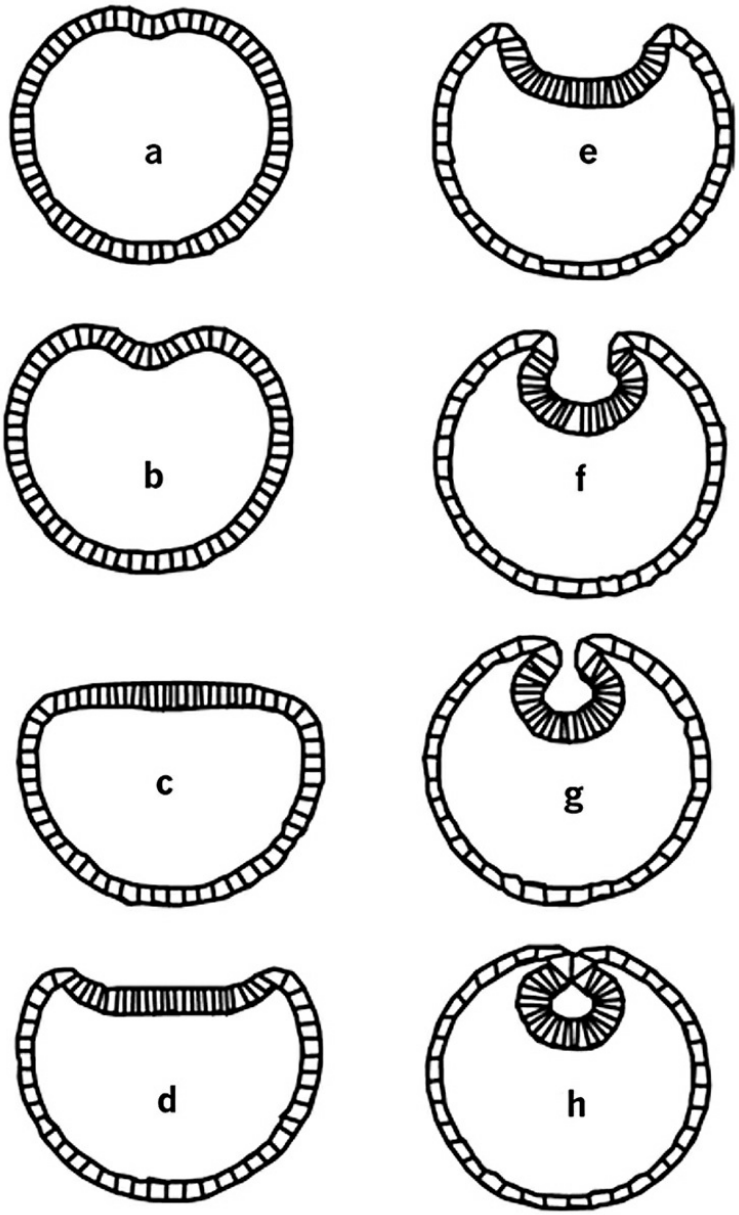


Blástula del modelo de Oster gastrulando

Imagen 51

El asunto se pone aún más interesante. Oster y sus colegas bajaron el «umbral de disparo» de los elementos contráctiles en su modelo de ordenador. El resultado fue una onda de invaginación que fue todavía más allá y que llegó a pinzar un «tubo neuronal» (pantallazos de la *a* a la *h).*

Es importante entender lo que realmente es un modelo como este. No es una representación precisa de la neurulación. Aparte del hecho de que es bidimensional y que está simplificado de muchas otras formas, la bola de células que entró en «neurulación» (pantallazo *a)* no era una «gástrula» de dos capas como debería haber sido. Era el mismo punto de partida «tipo blástula» que teníamos para el modelo de gastrulación anterior. No importa: se supone que los modelos no tienen que ser completamente precisos en cada detalle. El modelo muestra lo fácil que resulta emular varios aspectos del comportamiento de las células en un embrión temprano. El hecho de que una «bola» bidimensional de células respondiera espontáneamente al estímulo, aun cuando el modelo sea más sencillo que la situación real, lo convierte en una evidencia más fuerte. Nos asegura que la evolución de los diferentes procedimientos del desarrollo embrionario temprano no tiene por qué haber sido tan difícil. No olvidemos que es el modelo el que es sencillo, no el fenómeno que demuestra. Este es el objetivo de un buen modelo científico.



Formación de un «tubo neuronal» en el modelo de Oster

Imagen 52

Mi propósito al exponer los modelos de Oster ha sido mostrar el *tipo* general de principio por el cual las células aisladas pueden interaccionar entre sí para construir un cuerpo sin ningún mapa que represente el cuerpo completo. Los pliegues de tipo origami, la invaginación de tipo Oster y el pinzamiento son algunos de los trucos más sencillos para construir embriones. Otros más elaborados entran en juego más adelante en el desarrollo embrionario. Por ejemplo, experimentos ingeniosos han

mostrado que las células nerviosas, cuando crecen a partir de la médula espinal, o a partir del cerebro, encuentran su camino hasta su órgano final, no siguiendo ningún tipo de plan general, sino por atracción química, de forma parecida a como un perro olfatea alrededor para encontrar a una hembra en celo. Un antiguo experimento clásico realizado por el embriólogo y premio nobel Roger Sperry ilustra este principio perfectamente. Sperry y un colega tomaron un renacuajo y le extirparon un pequeño cuadrado de piel de la espalda. Luego extrajeron otro cuadrado del mismo tamaño de la barriga. Después reimplantaron los dos cuadrados, pero cada uno en el lugar del otro: la piel de la barriga fue implantada en la espalda y la piel de la espalda en la barriga. Cuando el renacuajo se convirtió en rana, el resultado fue muy bonito, como suelen ser los resultados en embriología: era claramente visible un «sello de correos» —la piel blanca de la barriga— en medio de la espalda y otro —la piel negra y moteada de la espalda— en medio de la barriga blanca. Y ahora el tema central de la historia. Normalmente, si se toca la espalda de una rana con un pelo de cerda, la rana se frotará el lugar con una pata, como si se tratara de una mosca molesta. Pero cuando Sperry tocó a su rana experimental en el «sello de correos» blanco de su espalda, ¡esta se frotó su barriga! Y cuando Sperry la tocó en el sello oscuro de su barriga, ¡la rana se frotó la espalda!

Lo que ocurre en el desarrollo embrionario normal, de acuerdo con la interpretación de Sperry, es que los axones («cables» largos que son una extensión tubular y estrecha de una única célula nerviosa) crecen alejándose de la médula espinal olisqueando como un perro la piel de la barriga. Otros axones crecen alejándose de la médula espinal olfateando la piel de la espalda. Y normalmente esto proporciona el resultado adecuado: los contactos en la espalda se sienten como si estuvieran en la espalda, mientras que los contactos en la barriga se sienten como si estuvieran en la barriga. Pero en la rana experimental de Sperry, algunas de las células nerviosas que buscaban la piel de la barriga se encontraron con el sello de piel de barriga injertado en la espalda, probablemente porque lo olfatearon bien. Y viceversa. La gente que cree en algún tipo de teoría de *tabula rasa* —por la que todos hemos nacido con una hoja en blanco por mente que se llena con la experiencia— debe de estar sorprendida por el resultado de Sperry. Esperarían que las ranas aprendieran de la experiencia a sentir su propio cuerpo a través de la piel, asociando las sensaciones correctas con

los lugares apropiados de la piel. En lugar de eso, parece que cada célula nerviosa de la médula espinal está etiquetada —digamos, una célula nerviosa de la barriga o una célula nerviosa de la espalda— aun antes de hacer contacto con la piel apropiada. Más tarde encontrará su trozo de piel designado, donde quiera que esté. Si una mosca recorriera la longitud de su espalda, la rana de Sperry experimentaría presumiblemente la ilusión de que la mosca de repente salta desde la espalda hasta la barriga, continúa andando un poco más y luego, instantáneamente, vuelve a saltar a la espalda de nuevo.

Experimentos como este llevaron a Sperry a formular su hipótesis de «quimioafinidad», según la cual el sistema nervioso se cablea a sí mismo no de acuerdo con un plano general, sino haciendo que cada axón busque órganos objetivos con los que tiene una afinidad química particular. Una vez más, tenemos unidades pequeñas locales que siguen reglas locales. En general, las células están cubiertas de «etiquetas», marcas químicas que les permiten encontrar a sus «socios». Y volvemos a la analogía del origami para encontrar otro lugar en que el principio de etiquetado es útil. El origami de papel humano no utiliza pegamento, pero podría hacerlo. Y el origami del embrión, por el cual los cuerpos de los animales se construyen a sí mismos, utiliza, de hecho, un equivalente al pegamento. A los pegamentos, mejor dicho, porque hay muchos tipos, y aquí es donde el etiquetado entra triunfalmente en escena. Las células tienen en su superficie un complicado repertorio de «moléculas de adhesión», con las que se adhieren a otras células. Este pegamento celular desempeña un papel importante en el desarrollo embrionario en todas las partes del cuerpo. Hay, sin embargo, una diferencia significativa con respecto a los pegamentos con los que estamos familiarizados. Para nosotros, el pegamento es el pegamento. Algunos pegamentos son más fuertes que otros, los hay más o menos rápidos, más apropiados para la madera, por ejemplo, o mejores para los metales o los plásticos. Y eso es todo en cuanto a variedades de pegamentos.

Las moléculas de adhesión de las células son mucho más ingeniosas que todo eso. Más exigentes, podríamos decir. A diferencia de los pegamentos artificiales, que se adhieren a la mayoría de las superficies, las moléculas de adhesión se pegan solo a un tipo de moléculas específicas. Hay unos ochenta tipos conocidos de cadherinas, una clase de moléculas de adhesión en los vertebrados. Con algunas excepciones, cada una de

estas ochenta cadherinas se unirá solo a las de su mismo tipo. Olvidemos el pegamento durante un minuto: una analogía mejor podría ser el juego de las fiestas infantiles en el que cada niño es identificado con un animal y todos tienen que moverse por la habitación haciendo ruidos como los del animal asignado. Cada niño sabe que solo otro niño ha sido identificado con el mismo animal que él, y tiene que encontrar su pareja escuchando a través de la cacofonía de imitaciones de animales de granja. Las cadherinas funcionan así. Quizá, como yo, usted puede imaginarse cómo el dopaje de las superficies celulares con cadherinas particulares en lugares estratégicos podría refinar y complicar los principios de autoensamblado del origami del embrión. Observemos que esto no implica ningún tipo de plan general, sino una colección poco sistemática de reglas locales.

Enzimas

Después de ver cómo capas enteras de células juegan al origami para darle forma al embrión, adentrémonos ahora en una célula aislada, donde encontraremos el mismo principio de autoplegado y autoarrugado, pero a una escala mucho menor: la escala de una única molécula de proteína. Las proteínas son enormemente importantes por razones que me llevará tiempo explicar, empezando con una especulación burlona para celebrar su importancia singular. Me encanta especular sobre lo diferente que podemos esperar que sea la vida en otra parte del Universo, pero sospecho que una o dos cosas son universales donde quiera que haya vida. Todo tipo de vida habrá evolucionado mediante un proceso semejante a la selección natural darwiniana de los genes. Y dependerá fuertemente de las proteínas —o de moléculas que, como las proteínas, sean capaces de plegarse sobre sí mismas dando lugar a una enorme variedad de formas—. Las moléculas de proteínas son virtuosas de las artes autoorigámicas a una escala mucho menor que la de las capas de células con las que hemos tratado hasta ahora. Las moléculas de proteínas son escaparates deslumbrantes de lo que se puede conseguir cuando se obedecen reglas locales a una escala local.

Las proteínas son cadenas de moléculas más pequeñas llamadas aminoácidos, y estas cadenas, como las capas de células de las que hemos hablado, también se pliegan sobre ellas mismas de formas muy específicas,

aunque a una escala mucho menor. En proteínas que se dan de forma natural (este es un hecho que será posiblemente diferente en los mundos alienígenas) solo hay veinte tipos de aminoácidos, y todas las proteínas son cadenas ensambladas a partir del repertorio formado por esos veinte, seleccionados de un conjunto mucho mayor de posibles aminoácidos. Ahora veamos el autoorigami. Las moléculas de proteínas, siguiendo simplemente las leyes de la química y de la termodinámica, se pliegan sobre sí mismas de modo espontáneo y automático, dando lugar a configuraciones tridimensionales específicas —casi digo «nudos», pero a diferencia de las lampreas (si puedo transmitir un hecho gratuitamente inconsecuente pero atractivo), las proteínas no se atan ellas mismas formando nudos—. La estructura tridimensional en la que una proteína se pliega y retuerce es la «estructura terciaria» que encontramos brevemente cuando hablábamos del autoensamblado de los virus. Cualquier secuencia dada de aminoácidos implica un patrón de plegamiento determinado. La secuencia de aminoácidos, ella misma determinada por la secuencia de letras en el código genético, determina la forma del patrón terciario [48]. La forma de la estructura terciaria tiene, a su vez, enormes consecuencias químicas.

El autoorigami por el que se pliegan y enrollan sobre sí mismas las cadenas de proteínas está gobernado por las leyes de la atracción química y por las leyes que determinan los ángulos a los que los átomos se unen entre sí. Imagine un collar de imanes con formas curiosas. El collar no colgaría formando una bonita catenaria alrededor de un cuello bonito. Tomaría otra forma, a medida que los imanes se fueran ensamblando unos con otros y encajando en los recovecos y salientes de los demás en varios lugares a lo largo de la longitud de la cadena. A diferencia del caso de la cadena de proteínas, la forma exacta de esta maraña no sería predecible porque cualquier imán puede atraer a todos los otros. Pero eso sugiere cómo las cadenas de aminoácidos pueden formar espontáneamente una estructura complicada parecida a un nudo, que puede no parecerse a una cadena o a un collar.

Los detalles de cómo las leyes de la química determinan la estructura terciaria de una proteína no se conocen del todo: los químicos todavía no pueden deducir, en todos los casos, cómo terminará enrollándose una secuencia dada de aminoácidos. Sin embargo, hay una evidencia razonable de que la estructura terciaria es *en principio* deducible a partir de la

secuencia de aminoácidos. No hay nada misterioso en la frase «en principio». Nadie puede predecir cómo caerá un dado, pero todos creemos que está completamente determinado por los detalles precisos de cómo es lanzado, junto a algunos hechos adicionales sobre la resistencia al aire y cosas parecidas. Es un hecho demostrado que una secuencia particular de aminoácidos siempre se enrolla tomando una forma determinada, o una de un conjunto discreto de formas alternativas (véase la extensa nota al pie de la página anterior). Y —el argumento importante para la evolución— la secuencia de aminoácidos está en sí misma completamente determinada, mediante la implementación de las reglas del código genético, por la secuencia de (tripletes de) «letras» en un gen. Aun cuando no es fácil para los químicos predecir cuál será el cambio en la forma de una proteína debido a una mutación genética en particular, es un hecho que una vez que la mutación ha ocurrido, el cambio resultante en la forma de la proteína será en principio predecible. El mismo gen mutante producirá de nuevo la misma forma alterada de la proteína (o menú de formas alternativas). Y eso es lo que importa para la selección natural. La selección natural no necesita entender por qué un cambio genético tiene una cierta consecuencia. Es suficiente con que la tenga. Si esa consecuencia influye de alguna manera en la supervivencia, el gen modificado se mantendrá o será eliminado en la competición por dominar el acervo genético, entendamos o no la ruta exacta por la cual el gen afecta a la proteína.

Dado que la forma de la proteína es inmensamente versátil, y dado que está determinada por los genes, ¿por qué es esto tan sumamente importante? En parte porque algunas proteínas tienen que desempeñar un papel estructural directo en el cuerpo. Las proteínas fibrosas, como el colágeno, se unen formando cuerdas resistentes que llamamos ligamentos y tendones. Pero la mayoría de las proteínas no son fibrosas. En lugar de eso, se pliegan sobre sí mismas tomando su propia forma globular característica, completada con sutiles hendiduras, y esta forma determina el papel característico de la proteína como una *enzima*, que es un *catalizador*.

Un catalizador es una sustancia química que acelera, tanto como hasta mil millones o incluso un billón de veces, una reacción química entre dos sustancias, mientras que el catalizador mismo emerge del proceso indemne y libre para catalizar de nuevo. Las enzimas, que son proteínas catalizadoras, son las campeonas entre los catalizadores por su

especificidad: son muy selectivas respecto al tipo preciso de reacciones químicas que aceleran. O quizá podríamos decir: las reacciones químicas en las células vivas son muy selectivas respecto a las enzimas que las aceleran. Muchas reacciones en la química celular son tan lentas que, a efectos prácticos, sin la enzima apropiada no llegarían a darse. Pero con la enzima adecuada se dan muy deprisa y pueden crear otros productos en cantidades enormes.

Así es como me gusta plantearlo. Un laboratorio de química tiene cientos de botellas y frascos en las estanterías, cada uno contiene una sustancia pura diferente: compuestos y elementos, soluciones y polvos. Un químico que quiera desencadenar una cierta reacción química selecciona dos o tres botellas, toma una muestra de ellas, las mezcla en un tubo de ensayo, quizá aplica calor, y la reacción se lleva a cabo. Otras reacciones químicas que podrían tener lugar en el laboratorio no ocurren porque las paredes de cristal de las botellas y los frascos evitan que los ingredientes se encuentren. Si se quiere producir una reacción química distinta, se mezclan ingredientes diferentes en un matraz diferente. Por todos lados hay barreras de cristal que preservan las sustancias puras separadas entre sí en botellas o jarras, y que mantienen las que pudieran reaccionar combinadas separadas entre sí en tubos de ensayo o matraces o vasos de precipitados.

La célula viva es también un gran laboratorio de química y dispone de un gran almacén de productos químicos. Pero estos no se guardan en botellas separadas o jarras o estanterías. Todos están mezclados. Es como si un vándalo, un magnate del desorden, hubiera entrado en el laboratorio, cogido todas las botellas de todas las estanterías y las hubiera vaciado con despreocupación anárquica dentro de un gran caldero. ¿Un acto terrible? Bien, lo sería si todas reaccionaran entre sí, de todas las formas posibles. Pero no lo hacen. O si lo hacen, el ritmo al que esto sucede es tan lento que a efectos prácticos podríamos decir que no lo hacen. *Excepto* —y este es el punto central— si hay una enzima presente. No hay necesidad de botellas de cristal y de frascos para mantener las sustancias separadas porque, se haga lo que se haga, no van a reaccionar entre ellas *a menos* que haya una enzima presente. El equivalente a guardar los productos químicos en botellas apiladas hasta que queramos mezclar dos de ellos en particular, digamos A y B, es mezclar cientos de sustancias en una gran pócima de bruja y suministrar solo la enzima apropiada para catalizar la reacción

entre A y B, y ninguna otra combinación. Realmente, la metáfora del gran caldero anárquico de productos químicos va demasiado lejos. La estructura de las células incluye membranas, entre las cuales, y dentro de las cuales, se producen las reacciones químicas. Hasta cierto punto estas membranas juegan el papel del cristal en los matraces y los tubos de ensayo.

La cuestión principal de esta sección del capítulo es que en gran medida «la enzima adecuada» debe su «efectividad» a su forma física (y eso es importante porque la forma física está determinada por los genes, genes cuyas variaciones son favorecidas o no, en última instancia, por la selección natural). Las moléculas están moviéndose y retorciéndose y girando por la sopa que baña el interior de la célula. Una molécula de una sustancia A podría reaccionar felizmente con una molécula de una sustancia B, pero solo si llegan a colisionar cuando están orientadas exactamente en la dirección apropiada relativa entre ellas. Es muy interesante comprobar que eso apenas ocurre —*a menos* que intervenga la enzima apropiada—. La forma específica de la enzima, la forma en que se plegó a sí misma como un collar magnético, determina cavidades y hendiduras, cada una con una forma precisa. Cada enzima tiene lo que se llama un «sitio activo», que normalmente es una hendidura o un recoveco en particular cuya forma y propiedades químicas le confieren su especificidad. La palabra «hendidura» no recoge adecuadamente la especificidad, la precisión de este mecanismo. Quizá una comparación mejor sería un enchufe eléctrico. En lo que mi amigo el zoólogo John Krebs llama «la gran conspiración de los enchufes», diversos países han adoptado diferentes convenciones arbitrarias para los enchufes y las tomas de corriente por todo el mundo. Los enchufes británicos no encajan en las tomas norteamericanas o en las francesas, ni en las de muchos otros lugares. Los sitios activos en la superficie de las moléculas de proteína son tomas de corriente dentro de las cuales solo algunas moléculas encajan. Pero mientras la «gran conspiración de los enchufes» ha establecido solo media docena de formas diferentes en todo el mundo (suficientes para constituir una molestia continua para el viajero), los diferentes tipos de tomas de corriente que muestran las enzimas son mucho más numerosos.

Pensemos en una enzima en particular, que cataliza la combinación química de dos moléculas, P y Q, para fabricar el compuesto PQ. Una mitad de la «toma de corriente» del sitio activo es justo adecuada para que la molécula de tipo P encaje, como una pieza de un puzle. La otra mitad de

la misma toma tiene una forma igual de precisa para que encaje una molécula de tipo Q —alineándose exactamente para combinarse químicamente con la molécula P que ya está ahí—. Al compartir una hendidura y estar firmemente sujetas con el ángulo preciso la una a la otra por la enzima «casamentera» de moléculas, P y Q se unen. El nuevo compuesto PQ se libera ahora a la sopa dejando la hendidura activa en la molécula enzima libre para juntar a otra P y a otra Q. Una célula puede estar llena de enjambres de moléculas enzima idénticas, todas trabajando como robots en una fábrica de automóviles, produciendo PQ en el equivalente celular de las cantidades industriales. Si ponemos una enzima diferente en la misma célula, generará un producto diferente, quizá PR, o QS o YZ. El producto final es distinto, aun cuando las materias primas disponibles son las mismas. Otros tipos de enzimas están relacionados no con la construcción de nuevos compuestos, sino con la degradación de compuestos viejos. Algunas de estas enzimas están implicadas en la digestión de la comida y se utilizan también como detergente de lavado «biológico». Pero ya que este capítulo trata sobre la construcción de embriones, estamos más interesados en las enzimas constructivas que median en la síntesis de nuevos compuestos químicos.

Se le puede haber ocurrido un problema. Está muy bien hablar de hendiduras y tomas de corriente a modo de piezas de un rompecabezas, sitios activos muy específicos capaces de acelerar una reacción química concreta un billón de veces, pero, ¿no suena esto demasiado bien como para ser cierto? ¿Cómo evolucionan las moléculas enzima para tener exactamente la forma adecuada a partir de unos comienzos menos perfectos? ¿Cuál es la probabilidad de que una toma de corriente moldeada al azar tenga la forma adecuada y las propiedades químicas correctas para concertar un matrimonio entre dos moléculas, P y Q, afinando su encuentro para que tengan exactamente el mismo ángulo? No muy alta si pensamos en un «rompecabezas acabado» —o, de hecho, si pensamos en la «gran conspiración de los enchufes»—. En lugar de eso tenemos que pensar en un «gradiente suave de mejora». Como ocurre a menudo cuando nos enfrentamos al dilema de cómo de complejas e improbables pueden ser las cosas que surgen de la evolución, es una falacia asumir que la perfección final que vemos hoy siempre ha sido así. Las moléculas enzima completamente formadas y evolucionadas consiguen aumentos de velocidad de un billón de veces en las reacciones que catalizan, y lo

consiguen por haber sido maravillosamente moldeadas con la forma exactamente adecuada. Pero no se necesita un aumento de velocidad de un billón de veces para ser favorecido por la selección natural. ¡Con un millón de veces funcionará bien! Y también con mil. E incluso un aumento de diez veces o de dos veces debería ser suficiente para que la selección natural tuviera con qué empezar a trabajar. Hay un gradiente suave de mejora en el rendimiento de una enzima, que va desde que no haya ninguna hendidura, pasando por una hendidura muy burda, hasta un receptor con la forma adecuada y la firma química correcta. «Gradiente» significa que cada paso es una mejora apreciable, aunque leve, sobre la anterior. Y «visible» para la selección natural puede significar una mejora más pequeña que el mínimo que nosotros requeriríamos para darnos cuenta.

Por tanto, ya vemos cómo funciona. ¡Es elegante! Una célula es una fábrica química versátil capaz de escupir cantidades enormes de una gran variedad de sustancias, y la elección se hace cuando está presente la enzima. Y ¿cómo se hace *esa* elección? Por el gen que está *activo*. De la misma forma que la célula es un tanque lleno de multitud de sustancias químicas y solo una pequeña fracción de ellas reaccionan entre sí, cada núcleo celular contiene el genoma completo, pero con una fracción pequeña de genes activos. Cuando un gen se activa en, por ejemplo, una célula del páncreas, su secuencia de letras de código determina directamente la secuencia de aminoácidos en una proteína; y la secuencia de aminoácidos determina (recordemos la imagen del collar magnético) la forma en que la proteína se pliega sobre ella misma; y la forma en que la proteína se pliega sobre sí misma determina la forma precisa de las «tomas de corriente» que emparejan las sustancias que flotan alrededor por la célula. Cada célula, con muy pocas excepciones, como los glóbulos rojos de la sangre, que carecen de núcleo, contiene los genes para fabricar todas las enzimas. Pero en cualquier célula solo unos pocos genes están activos al mismo tiempo. Por ejemplo, en las células tiroideas están activos los genes que hacen las enzimas apropiadas para catalizar la fabricación de las hormonas tiroideas. Y lo mismo ocurre en los restantes tipos de células. Finalmente, las reacciones químicas que se producen en una célula determinan la forma que tendrá la célula y su modo de comportarse, y la manera en que participa en interacciones de tipo origami con otras células. Por tanto, el proceso completo del desarrollo embrionario está controlado,

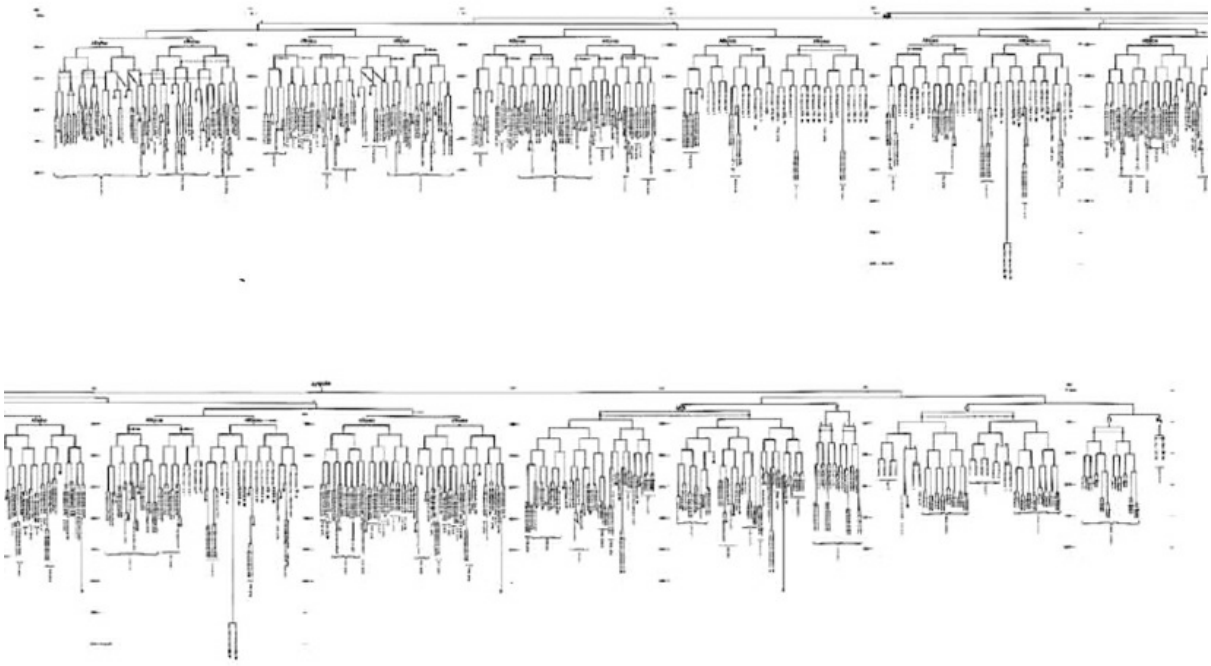
a través de una intrincada secuencia de eventos, por los genes. Son los genes los que determinan secuencias de aminoácidos, que determinan las estructuras terciarias de las proteínas, que determinan las formas que encajarán en los sitios activos, que determinan la química celular, que determina el comportamiento «tipo estornino» en el desarrollo embrionario. Así, las diferencias en los genes pueden, en el extremo en el que se originan estas complejas cadenas de eventos, causar diferencias en la forma en que se desarrollan los embriones y, por tanto, diferencias en la forma y el comportamiento de los adultos. La supervivencia y el éxito reproductivo de estos adultos se realimentan a través de la supervivencia en el acervo genético de los genes que marcaron la diferencia entre el éxito y el fracaso. Y eso es la selección natural.

La embriología parece complicada —es complicada—, pero es fácil entender la cuestión básica, que es que estamos tratando con procesos de autoensamblado durante todo el camino. Una pregunta diferente, dado que (casi) todas las células contienen todos los genes, es ¿cómo se decide qué genes se activan en cada tipo diferente de célula? Entraré en esto brevemente ahora.

DESPUÉS DEBEN INTENTARLO LOS GUSANOS

Si un gen está o no activo en una célula en un momento dado es algo que viene determinado, a menudo a través de una cascada de otros genes llamados genes interruptores o genes controladores, por el entorno químico de la célula. Las células tiroideas son muy diferentes de las células musculares, y así sucesivamente, aunque sus genes son los mismos. Esto está muy bien, podríamos decir, una vez que el desarrollo del embrión está en marcha y los diferentes tipos de tejidos, como el tiroideo y el muscular, ya existen. Pero cada embrión comienza a partir de una única célula. Las células tiroideas y las musculares, las células del hígado y las de los huesos, las células del páncreas y las de la piel, todas descienden de un único óvulo fertilizado a través de las ramificaciones de un árbol genealógico. Este es un árbol celular que no va más allá del momento de la concepción, nada que ver con el árbol evolutivo que abarca millones de años en el pasado, que surge una y otra vez en los diferentes capítulos.

Voy a mostrar, por ejemplo, el árbol genealógico completo de las 558 células de una larva recién eclosionada de un gusano nematodo, *Caenorhabditis elegans* (por favor, preste mucha atención a todos los detalles del diagrama inferior). Por cierto, no sé qué hizo este pequeño gusano para ganarse como nombre de especie *elegans*, pero puedo pensar en una buena razón por la que lo habría merecido retrospectivamente. Sé que no a todos mis lectores les gustan mis divagaciones, pero la investigación llevada a cabo con el *Caenorhabditis elegans* es un triunfo tan sonado de la ciencia que no van a detenerme.



Árbol genealógico celular del Caenorhabditis elegans

Imagen 53

El *Caenorhabditis elegans* fue elegido en la década de 1960 como un animal ideal de experimentación por el brillante biólogo sudafricano Sydney Brenner. Hacía poco que había terminado su trabajo en Cambridge, con Francis Crick y otros, sobre la estructura del código genético y buscaba abordar algún otro gran problema. Su inspirada elección, y su propia investigación pionera en genética y en neuroanatomía, ha conducido a la creación de una comunidad mundial de investigadores del *Caenorhabditis* que agrupa a miles de individuos. ¡Solo

es una pequeña exageración decir que ahora sabemos *todo* sobre el *Caenorhabditis elegans!* Conocemos su genoma completo. Sabemos exactamente dónde están en el cuerpo cada una de sus 558 células (en la larva; 959 en la forma hermafrodita adulta, sin contar las células reproductivas) y conocemos la «historia familiar» exacta de cada una de esas células a lo largo del desarrollo embrionario. Conocemos un gran número de genes mutantes que producen formas anormales y conocemos exactamente dónde actúan las mutaciones en el cuerpo y la historia celular exacta de cómo se desarrolla la anormalidad. Este pequeño animal es conocido de principio a fin, desde el interior al exterior, desde la cabeza a la cola a través de todas sus partes intermedias, es conocido a lo largo y a lo ancho *(¡O frabjous day!)* [49]. Brenner fue reconocido tardíamente con el Premio Nobel de Fisiología de 2002, y se puso su nombre a una especie relacionada, *Caenorhabditis brenneri.* Su columna habitual en la revista *Current Biology,* que firma con el nombre de Uncle Sid, es un modelo de juicio científico inteligente e irreverente —tan interesante como el esfuerzo de investigación mundial con el *Caenorhabditis elegans* que él inspiró—. Pero desearía que los biólogos moleculares hablasen con algunos zoólogos (como el mismo Brenner) y aprendieran a no referirse al *Caenorhabditis* como «el» nematodo, o incluso «el» gusano, como si no hubiera otros.

Por supuesto que no se pueden leer los nombres de los tipos de células al final del diagrama (requeriría siete páginas imprimir todo el diagrama de forma legible), pero dicen cosas como «faringe», «músculo intestinal», «músculo corporal», «músculo del esfínter», «ganglio anular», «ganglio lumbar». Todos estos tipos de células son literalmente primas entre sí: primas en virtud de su ascendencia durante la vida del gusano. Por ejemplo, estoy buscando una célula de músculo corporal en particular, llamada MSpappppa, que es hermana de otra célula de músculo corporal, prima hermana de dos células más de músculo corporal, tía segunda de dos células más de músculo corporal, prima segunda de seis células faríngeas, prima tercera de diecisiete células faríngeas..., y así sucesivamente. ¿No es sorprendente que podamos realmente utilizar expresiones como «tía tercera» con la máxima precisión y certeza para referirnos a células con nombres e identificables repetidamente en el cuerpo de un animal? El número de «generaciones» de células que separan los tejidos del óvulo original no es tan grande. Después de todo solo hay 558 células en el

cuerpo, y se pueden crear teóricamente 1.024 (210) en diez generaciones de división celular. El número de generaciones para las células humanas sería mucho mayor. Aun así se podría, teóricamente, hacer un árbol genealógico similar para cada una de sus billones de células (a diferencia de las 558 células de una larva hembra de *Caenorhabditis elegans)*, siguiendo la pista de cada una hasta el óvulo fertilizado. En los mamíferos, sin embargo, no es posible identificar células específicas y nombrarlas de forma repetible. En los humanos es más una cuestión de poblaciones estadísticas de células cuyos detalles son diferentes en gente diferente.

Espero que mi digresión eufórica sobre la importancia de la investigación en el *Caenorhabditis* no le haya distraído del comentario que estaba haciendo sobre cómo los tipos de células cambian su forma y carácter a medida que se separan unas de otras en el árbol genealógico embrionario. En el punto de bifurcación entre un clon destinado a convertirse en una célula faríngea y un clon «primo» que está destinado a convertirse en una célula del ganglio anular tiene que haber algo que los distinga, de otro modo ¿cómo sabrían ellos activar genes diferentes? La respuesta es que, antes de que el antepasado más reciente de los dos clones se dividiera, las dos mitades de la célula eran diferentes. Por tanto, cuando la célula se dividió, las dos células hijas, aunque idénticas en sus genes (cada hija recibe un complemento completo de genes), no eran idénticas en cuanto a las sustancias químicas que las rodeaban. Y esto significa que no se activaron los mismos genes —lo que cambió el destino de sus descendientes—. El mismo principio se aplica en toda la embriología desde el origen. La clave para la diferenciación, en todos los animales, es la división asimétrica celular [50].

Sir John Sulston y sus colegas siguieron la pista de cada una de las células del cuerpo del gusano hacia atrás hasta una y solo una de las seis células fundadoras —podríamos llamarlas células «matriarcas»— llamadas AB, MS, E, D, C y P4 [51]. Al dar nombre a las células utilizaron una hábil anotación que resumía la historia de cada una.

El nombre de cada célula empieza con el nombre de una de las seis células fundadoras, aquella de la que desciende. A continuación, su nombre es una cadena de letras, las iniciales de la dirección de la división celular de la que procede: anterior, posterior, dorsal, ventral, izquierda, derecha. Por ejemplo, Ca y Cp son las dos hijas de la matriarca C, la hija anterior y posterior, respectivamente. Obsérvese que ninguna célula tiene

más de dos hijas (de las cuales una puede morir). Estoy ahora mirando una célula de músculo corporal concreta, cuyo nombre, Cappppv, desvela sucintamente su historia: C tuvo una hija anterior, que tuvo una hija posterior, que tuvo una hija posterior, que tuvo una hija posterior, que tuvo una hija posterior que tuvo una hija ventral, que es la célula de músculo corporal en cuestión. Cada célula del cuerpo se etiqueta con una cadena similar de letras encabezada por una de las seis células fundadoras. ABprpapppap, por poner otro ejemplo, es una célula nerviosa situada en el cordón nervioso ventral que recorre toda la longitud del gusano. Una vez más, es innecesario entrar en los detalles. Lo bonito es que cada célula del cuerpo tiene un nombre que describe la totalidad de su historia durante la embriología. Cada una de las diez divisiones que dieron lugar a ABprpapppap y a todas las demás células fue una división asimétrica con el potencial de que diferentes genes fuesen activados en cada una de las dos células hijas. Y en todos los animales este es el principio por el cual se diferencian los tejidos, aun cuando todas las células contienen los mismos genes. La mayoría de los animales, por supuesto, tienen muchas más células que las 558 de *Caenorhabditis*, y su desarrollo embrionario está en la mayoría de los casos determinado con menor rigidez. En particular, como sir John Sulston amablemente me recuerda, y como he mencionado ya brevemente, en un mamífero los «árboles genealógicos» de las células son diferentes para cada individuo, mientras que en el *Caenorhabditis* son casi idénticos (excepto en individuos mutantes). Sin embargo, el principio se mantiene igual. En cualquier animal, las células son diferentes entre sí en diferentes partes del cuerpo, aun cuando sean genéticamente idénticas, debido a su historia de división celular asimétrica durante el corto recorrido del desarrollo embrionario.

Escuchemos ahora la conclusión de todo este asunto. No hay un plan general de desarrollo, no hay planes, no hay planos de arquitecto, no hay arquitecto. El desarrollo del embrión y, en última instancia, del adulto, se alcanza mediante reglas locales que las células ejecutan, interaccionando con otras células en un marco local. Lo que ocurre dentro de las células, de forma similar, está gobernado por reglas locales que se aplican a las moléculas, especialmente a las moléculas de proteínas, dentro de las células y en las membranas celulares, interaccionando con otras moléculas similares. De nuevo, las reglas son locales, locales, locales. Nadie, leyendo la secuencia de letras en el ADN del óvulo fertilizado, podría predecir la

forma del animal en el que se va a convertir. La única forma de descubrirlo es dejar crecer el óvulo de forma natural y observar en qué se convertirá. Ningún ordenador puede averiguarlo a menos que esté programado para simular el propio proceso biológico natural, en cuyo caso podríamos también prescindir de la versión electrónica y utilizar el embrión en desarrollo como sustituto del ordenador. Esta forma de generar estructuras grandes y complejas solo mediante la ejecución de reglas locales difiere por completo del procedimiento consistente en hacer cosas utilizando planos. Si el ADN fuera algún tipo de plano lineal, sería relativamente trivial programar un ordenador para que leyera las letras y dibujara al animal. Pero, en primer lugar, no sería nada fácil —de hecho, podría ser imposible— que el animal hubiera evolucionado.

Y ahora, y para que este capítulo sobre los embriones no termine como una mera divagación en un libro sobre la evolución, debo volver al sincero dilema de la persona que preguntó a Haldane. Dado que los genes controlan los procesos de desarrollo embrionario más que la forma del adulto, dado que la selección natural —al igual que Dios— no construye pequeñas alas pero la embriología sí, ¿cómo se las arregla la selección natural para moldear los cuerpos de los animales y su comportamiento? ¿Cómo trabaja la selección natural en los embriones, en otras palabras, para reorganizarlos y hacerlos más eficientes en la construcción de cuerpos que tengan éxito, con alas, aletas, hojas o armaduras blindadas, aguijones o tentáculos o cualquier cosa que necesiten para sobrevivir?

La selección natural es la supervivencia diferencial de los genes con éxito frente a genes con menos éxito en acervos genéticos. La selección natural no elige los genes directamente. En lugar de eso escoge a sus representantes, los cuerpos; y esos individuos se eligen —obvia y automáticamente y sin intervención deliberada— en función de si sobreviven para reproducir copias de esos mismos genes. La supervivencia de un gen está internamente ligada a la supervivencia de los cuerpos que ayuda a construir, porque viaja dentro de esos cuerpos y muere con ellos. Cualquier gen puede esperar encontrarse, en forma de copias de sí mismo, viajando dentro de un gran número de cuerpos en una población de coetáneos y, simultáneamente, a lo largo del tiempo a medida que una generación da lugar a la siguiente. Desde el punto de vista estadístico, por tanto, un gen que tienda, en promedio, a tener un buen efecto en las posibilidades de supervivencia de los cuerpos en los que se encuentra,

tenderá a aumentar su frecuencia en el acervo genético. Así pues, los genes que encontramos en un acervo genético tenderán a ser esos genes que son buenos construyendo cuerpos. Este capítulo ha tratado sobre los procedimientos mediante los cuales los genes construyen cuerpos.

La interlocutora de Haldane encontró poco plausible que la selección natural pudiera crear en, digamos, mil millones de años, una receta genética para construirla a ella. Yo lo encuentro plausible, aunque por supuesto ni yo ni nadie puede contar los detalles de cómo ocurrió. La razón por la que es plausible es que todo se hace con reglas locales. En cualquier acto de selección natural, la mutación que se selecciona ha tenido —en muchas células y en muchos individuos en paralelo— un efecto muy *simple* sobre la forma en la que una cadena de proteínas se enrolla espontáneamente. Esto, a su vez, mediante la acción catalítica, acelera, por ejemplo, una reacción química particular en todas las células en las que el gen está activo. Esto cambia, quizá, el ritmo de crecimiento del primordio embrionario de la mandíbula. Y es así como tiene efectos consecuentes sobre la forma de toda la cara; por ejemplo, puede acortar el hocico y proporcionar un perfil más humano y menos parecido al del mono. A partir de ahí, las presiones de la selección natural a favor o en contra del gen pueden ser tan complicadas como queramos. Es posible que impliquen selección sexual, quizá una preferencia estética en las potenciales parejas sexuales. O el cambio en la mandíbula podría tener un efecto sutil en la habilidad del animal para abrir nueces, o en su capacidad para luchar con rivales. Alguna combinación enormemente elaborada de presiones selectivas, en conflicto y en compromiso entre sí, de formas enormemente complejas, puede dar lugar al éxito estadístico de ese gen en particular, según se propaga a través del acervo genético. Pero el gen no sabe nada de esto. Todo lo que está haciendo, dentro de los diferentes cuerpos y en generaciones sucesivas, es retocar una hendidura cuidadosamente esculpida en una molécula de proteína. El resto de la historia continúa automáticamente, en cascadas ramificadas de consecuencias locales de las cuales, de vez en cuando, emerge un cuerpo completo.

Aún más complicada que el conjunto de presiones de selección en los entornos ecológicos, sexuales y sociales de los animales es la red fantasmagórica de influencias que van dentro y entre las células en desarrollo: las influencias de los genes en las proteínas, de los genes en los

genes, de las proteínas en la expresión de los genes, de las proteínas en las proteínas; las membranas, los gradientes químicos, pautas estrictas que la física y la química imponen en los embriones, hormonas y otros mediadores de la acción a distancia, células etiquetadas buscando a otras con la misma etiqueta o una complementaria. Nadie entiende todo el cuadro y nadie necesita entenderlo para aceptar la verosimilitud de la selección natural. La selección natural favorece la supervivencia en el acervo genético de mutaciones responsables de provocar cambios cruciales en los embriones. Todo el cuadro emerge como consecuencia de cientos de miles de interacciones locales pequeñas, cada una comprensible en principio (aunque puede ser muy difícil o llevar mucho tiempo desentrañarla en la práctica) para cualquiera con la suficiente paciencia como para examinarla. El todo puede ser sobrecogedor y misterioso en la práctica, pero no hay misterio en principio, ni siquiera en la propia embriología o en la historia evolutiva por la que los genes que controlan llegan a ser importantes en el acervo genético. Las complicaciones se acumulan gradualmente en el tiempo evolutivo: cada paso era solo ligeramente diferente del anterior y cada paso se alcanzó mediante un cambio pequeño, sutil, en una regla local existente. Cuando se tiene un número suficiente de pequeñas entidades —células, moléculas de proteínas, membranas—, cada una siguiendo reglas locales e influenciando a otras en su propio nivel, entonces la consecuencia final es espectacular. Sobrevivan o no los genes como consecuencia de su influencia en esas entidades locales y su comportamiento, la selección natural de los genes con éxito se producirá inevitablemente —así como la emergencia de sus productos de éxito—. La persona que preguntó a Haldane estaba equivocada. En principio, no es difícil hacer algo como ella.

Y, como dijo Haldane, solo requiere nueve meses.

9

EL ARCA DE LOS CONTINENTES

Imagine un mundo sin islas.

Los biólogos suelen usar la palabra «isla» para definir algo más que un trozo de tierra rodeado de agua. Desde el punto de vista del pez de agua dulce, un lago es una isla: una isla habitable rodeada por tierra inhóspita. Desde el punto de vista de un escarabajo alpino incapaz de prosperar por debajo de cierta altitud, cada montaña es una isla, con valles casi infranqueables entre unas y otras. Hay unos gusanos nematodos (emparentados con el elegante *Caenorhabditis)* que viven dentro de las hojas (tantos como diez mil en una sola hoja infestada) introduciéndose en ellas a través de los estomas, que son los agujeros microscópicos por los que aquellas toman el dióxido de carbono y expelen oxígeno. Para un gusano nematodo que vive en las hojas, como el *Aphelencoides,* una sola dedalera es una isla. Para un piojo, una cabeza o una entrepierna humana podrían ser islas. Debe de haber muchos animales y plantas que consideran un oasis del desierto como una isla verde y habitable rodeada por un mar de arena hostil. Y mientras redefinimos las palabras desde el punto de vista animal, ya que un archipiélago es una cadena o grupo de islas, supongo que un pez de agua dulce lo definiría como una cadena o grupo de lagos, como los lagos que hay a lo largo del gran valle del Rift, en África. Una marmota alpina podría definir una cadena montañosa separada por valles como un archipiélago. Los insectos que comen hojas podrían considerar una avenida de árboles como un archipiélago. Un tábano podría considerar un rebaño de vacas como un archipiélago en movimiento.

Una vez que hemos redefinido la palabra «isla» (el *sabbat* fue hecho para el hombre, no el hombre para el *sabbat),* déjeme volver a mi introducción. Imagine un mundo sin islas.

Había comprado un gran mapa que representaba el mar.
Sin ningún vestigio de tierra:
Y la tripulación se mostró muy agradecida cuando descubrió que era
Un mapa que podía entender.

No iremos ten lejos como Bellman, pero imaginemos que toda la tierra estuviera unida en un gran continente en medio de un mar continuo. Sin islas, ni lagos o montañas en la tierra: nada que rompa la monótona y suave uniformidad. En este mundo, un animal podría fácilmente ir desde cualquier sitio a otro lugar, limitado solo por la mera distancia, sin ser molestado por inhóspitas fronteras. Este no sería un mundo deseable para la evolución. La vida en la Tierra sería extremadamente aburrida si no hubiera islas, y quiero comenzar este capítulo explicando por qué.

¿CÓMO NACEN LAS NUEVAS ESPECIES?

Cada especie es pariente de otra. Dos especies cualesquiera son descendientes de una especie anterior, la cual se dividió en dos. Por ejemplo, el antepasado común del hombre y de los periquitos vivió hace unos 310 millones de años. La especie original se dividió en dos y las dos ramas siguieron sus caminos separados desde entonces. He elegido a los humanos y a los periquitos para hacerlo más atractivo, pero la misma especie ancestral es compartida por todos los mamíferos de un lado de esta división, y por todos los reptiles (desde el punto de vista de la zoología, las aves son reptiles, como vimos en el capítulo 6) del otro lado. En el caso poco probable de que se encontrara un fósil de esta especie ancestral, necesitaría un nombre. Llamémosle *Protamnio darwinii*. No sabríamos ningún detalle sobre él, aunque los detalles no importan en absoluto para el argumento, pero no nos equivocaríamos mucho si lo imagináramos como una criatura alargada, semejante a un lagarto, correteando a la caza de insectos. Ahora vayamos a la cuestión. Cuando *Protamnio darwinii* se dividió en dos poblaciones, estas debieron de ser iguales entre sí, y hubieran podido aparearse felizmente entre ellas; pero un grupo estaba destinado a dar lugar a los mamíferos y el otro estaba destinado a dar lugar a los pájaros (y a los dinosaurios y serpientes y cocodrilos). Y no hubieran

podido divergir si hubieran seguido apareándose entre sí. Los dos acervos genéticos se hubieran inundado continuamente con sus genes mutuos. Por lo que cualquier tendencia a divergir habría sido cortada de raíz antes de poder seguir su camino, inundada por el flujo de genes de la otra población.

Desconocemos lo que ocurrió en esta separación épica de caminos. Sucedió hace mucho tiempo y nadie sabe dónde. Pero la teoría moderna de la evolución reconstruiría confidencialmente algo parecido a la siguiente historia. Las dos subpoblaciones de *Protamnio darwinii* quedaron aisladas la una de la otra de alguna manera, probablemente por una frontera geográfica como una franja de mar que separara dos islas o una isla del continente. Podría haber sido una cadena montañosa que separara dos valles o un río que separara dos bosques: dos «islas» en el sentido general que definí antes. Lo más importante es que las dos poblaciones permanecieron aisladas la una de la otra lo suficiente como para descubrir que, cuando el tiempo y el azar las volvieron a reunir, habían divergido tanto que ya no podían aparearse entre sí. ¿Cuánto tiempo se necesita? Bien, si estuvieran sujetas a presiones selectivas fuertes y diferenciadas, podrían ser solo unos pocos siglos o incluso menos. Por ejemplo, una isla podría carecer de depredadores voraces que merodearan por su territorio. O la población de la isla podría haber cambiado de una dieta insectívora a una vegetariana, como los lagartos del Adriático del capítulo 5. Una vez más, no podemos saber los detalles de cómo se dividió el *Protamnio darwinni*, y tampoco los necesitamos. La evidencia derivada de los animales modernos nos da razones para pensar que algo como la historia que acabo de contar ocurrió en el pasado, en cada una de las divergencias entre los ancestros de un animal y cualquier otro.

Incluso si las condiciones a cada lado de la barrera son idénticas, dos acervos genéticos separados geográficamente acabarán distanciándose uno del otro, hasta el punto que las poblaciones ya no podrán procrear entre sí cuando el aislamiento geográfico desaparezca. Los cambios aleatorios en los dos acervos genéticos se irán construyendo gradualmente, y llegará un momento en que, si un macho y una hembra de ambos lados se juntan, sus genomas serán demasiado diferentes como para combinarlos y originar una descendencia fértil. Con independencia de que intervenga solo la deriva aleatoria o se cuente con la ayuda de la selección natural diferencial, una vez que los dos acervos genéticos han alcanzado el punto

en donde ya no necesitan el aislamiento geográfico para mantenerse genéticamente separados, entonces decimos que corresponden a especies diferentes. En nuestro caso hipotético, quizá la población de la isla cambió más que la del continente, debido a la falta de depredadores y a la transformación hacia una dieta preponderantemente vegetariana. Siendo así, un zoólogo habría reconocido que la población isleña se había convertido en una nueva especie y le daría un nombre, digamos *Protamnio saurops*, mientras que el antiguo nombre, *Protamnio darwinii*, podría haber seguido sirviendo para la población del continente. En nuestro escenario, quizá la población de la isla estaba destinada a dar lugar a reptiles saurópsidos (lo que llamamos «reptiles» y «aves»), mientras que la población continental evolucionaría hacia los mamíferos.

Una vez más debo insistir en que los *detalles* de mi pequeña historia son pura ficción. También podría haber sido la población de la isla la que diera lugar a los mamíferos. La «isla» podría haber sido un oasis rodeado por el desierto en lugar de tierra rodeada de agua y, por supuesto, no tenemos ni la menor idea de en qué parte de la superficie terrestre tuvo lugar la división —de hecho, el mapa del mundo hubiera tenido un aspecto tan diferente que la pregunta realmente no significa nada—. Lo que no es ficción es la lección principal: la mayoría, si no la totalidad, de los millones de divergencias evolutivas que han poblado la Tierra con tan exuberante diversidad comenzó con la separación al azar de dos subpoblaciones de especies, frecuentemente, aunque no siempre, a ambos lados de una barrera geográfica como el mar, un río, una cadena de montañas o un valle desértico. Los biólogos usan la palabra «especiación» para la separación de especies en dos especies-hijas. La mayoría de ellos dirá que el aislamiento geográfico es el preludio normal de la especiación, aunque algunos, sobre todo los entomólogos, podrían quejarse alegando que la «especiación simpátrica» puede también ser importante. La especiación simpátrica también requiere alguna clase de separación accidental inicial para que comience el juego, y es algo más que la simple separación geográfica. Podría ser un cambio local en el microclima. No voy a entrar en los detalles, pero comentaré que la especiación simpátrica parece ser especialmente importante para los insectos. De todas formas, en aras de la simplicidad, en el resto del capítulo asumiré que la separación inicial que precede a la especiación es normalmente geográfica.

Recuérdese que, en el tratamiento de la cría selectiva del perro doméstico del capítulo 2, relacioné el efecto de las reglas impuestas por criadores de pedigrí con la creación de «islas virtuales».

«A ALGUIEN LE PODRÍA GUSTAR...»

¿Cómo, entonces, puede ocurrir que dos poblaciones de una especie se encuentren en lados opuestos de una barrera geográfica? Algunas veces la novedad es la barrera en sí misma. Un terremoto abre una brecha infranqueable o cambia el curso de un río, y una especie que había sido una población única a efectos de apareamiento se encuentra separada en dos. Con más frecuencia, la barrera se encontraba allí previamente y los propios animales la cruzaron coincidiendo con algún evento raro. Tiene que ser raro, de otra forma no procede el nombre de «barrera». Antes del 4 de octubre del 1995 no había ningún miembro de la especie *Iguana iguana* en la isla caribeña de Anguila. En esa fecha, una población de estos grandes lagartos apareció de repente en la zona este de la isla. Se les vio llegar de modo fortuito. Estaban agarrados a una maraña de madera y árboles arrancados de raíz, algunos de más de diez metros de longitud, que había vagado a la deriva desde una isla vecina, probablemente la isla de Guadalupe, a doscientos cincuenta kilómetros de distancia. El mes anterior, dos huracanes, Luis —los días 4 y 5 de septiembre— y Marilyn —dos semanas después—, habían arrasado la zona y, desde luego, bien podrían haber descepado los árboles. La nueva población de Anguila seguía fortaleciéndose en 1998, y la doctora Ellen Censky, que dirigió el estudio original, me comenta que sigue prosperando desde ese día, incluso más que otras especies de iguanas que vivían allí antes de que los invasores llegaran.

La cuestión sobre estos eventos raros de dispersión es que deben ser suficientemente comunes como para permitir la especiación, pero no demasiado comunes. Si fueran demasiado comunes, si las iguanas vagaran a la deriva de Guadalupe a Anguila cada año, la incipiente especiación de la población de Anguila sería continuamente inundada por el flujo de genes entrante y, por tanto, no podría divergir de la población de Guadalupe. Por cierto, háganme el favor de no dejarse confundir por el uso

de la frase «deben ser suficientemente comunes». Podría ser mal interpretada en el sentido de que se toman medidas de algún tipo para asegurar que ¡la isla permanezca a la distancia adecuada para facilitar la especiación! Naturalmente, eso es poner la silla antes que el caballo. Es como si, dondequiera que haya islas (islas en el amplio sentido de la palabra, como siempre) separadas por una distancia apropiada para facilitar la especiación, esta debiera producirse. Y la distancia apropiada dependerá de lo que suponga para los animales en cuestión hacer el viaje. Los doscientos cincuenta kilómetros que separan Guadalupe de Anguila podrían ser un juego de niños para un ave robusta como el petrel. Pero cruzar por mar unos cuantos cientos de metros quizá resultara demasiado difícil como para que una especie nueva de, por ejemplo, ranas o insectos sin alas fuera capaz de lograrlo.

El archipiélago de las Galápagos está separado del continente de América del Sur por unos mil kilómetros de mar abierto, casi cuatro veces la distancia que aquellas iguanas navegaron sobre sus troncos hasta Anguila. Las islas son todas volcánicas y jóvenes según los estándares geológicos. Ninguna de ellas ha estado nunca unida al continente. Toda su fauna y su flora ha viajado hasta allí, presumiblemente desde el continente sudamericano. Aunque los pájaros pequeños pueden volar, mil kilómetros son suficientes como para que el éxito de la travesía de un pinzón sea un acontecimiento raro. Pero no tan raro como para que no pueda ocurrir nunca, y hay pinzones en las Galápagos cuyos antepasados debieron de ser arrastrados en algún momento por una tormenta atípica. Estos pinzones son todos de un tipo sudamericano reconocible, aunque la especie en sí misma es única de las islas Galápagos. Obsérvese el mapa de Darwin, que he adoptado por razones sentimentales y porque él utilizó la nomenclatura inglesa para las islas, que suena evocadoramente naval, en lugar de los modernos nombres españoles. Hay que fijarse en que la escala de cien kilómetros (sesenta millas, *60 Miles* en la imagen) es aproximadamente una décima parte de la distancia que un animal tendría que viajar para llegar al archipiélago desde el continente. Las islas solo están separadas entre sí por unas pocas decenas de millas, pero a cientos de millas del continente. Qué maravillosa receta para la evolución de las especies. Sería demasiado sencillo decir que la posibilidad de ser accidentalmente arrastrado por el viento o el agua hasta una isla es inversamente proporcional a la anchura de la barrera que separa dicha isla del

continente. Sin embargo, está claro que hay cierta correlación inversa entre la distancia y la posibilidad de cruzar. La diferencia entre la distancia media entre islas, unas decenas de millas, y los mil kilómetros de distancia al continente es tan grande que cabría suponer que el archipiélago fuera un hervidero de especiación. Y así es, tal y como Darwin comprendió, aunque no hasta que hubo dejado las islas para no regresar jamás.

Mapa de Darwin de las islas Galápagos, con nombres ingleses que ahora apenas se utilizan

Imagen 54

Esta disparidad, entre las decenas de kilómetros de distancia que separan las islas dentro del archipiélago y los cientos de kilómetros de distancia con el continente, lleva al evolucionista a pensar que las diferentes islas pueden albergar especies muy similares entre sí, pero distintas a sus homólogas del continente. Y esto es precisamente lo que

encontramos. Darwin lo explicó bien, acercándose de manera sorprendente al lenguaje evolucionista, incluso antes de haber formulado adecuadamente sus ideas. He marcado la oración clave en cursiva y la repetiré a lo largo de este capítulo en diferentes contextos.

> Viendo esta gradación y diversidad de estructuras en un grupo de pájaros pequeño e íntimamente relacionado, *cabría imaginar que, a partir de un pequeño número de pájaros en este archipiélago, una de las especies hubiera sido escogida y modificada con fines diferentes*. De la misma manera, cabría imaginar que un pájaro, originariamente un halcón, hubiera sido traído aquí para llevar a cabo el trabajo del Polybori, que se alimenta de carroña en el continente americano.

La última frase es una referencia al gavilán de las Galápagos, *Buteo galapagoensis*, otra especie que se encuentra solo en estas islas, pero que comparte ciertos rasgos con especies del continente, sobre todo con el *Buteo swainsoni*, que anualmente migra entre Norteamérica y Sudamérica y que podría haber sido arrastrado fuera de su rumbo en una o dos situaciones excepcionales. Hoy día, debemos referirnos al gavilán y al cormorán de las Galápagos como «endémicos» de las islas, lo que quiere decir que es el único lugar en el que habitan. El mismo Darwin, que aún no había aceptado completamente la evolución, utilizó la expresión «creaciones aborígenes», por aquel entonces común, lo que significaba que Dios las había creado allí y en ningún otro sitio más. Empleó la misma expresión para las tortugas gigantes, que por aquel entonces abundaban en todas las islas, y también para los dos tipos de iguana, la iguana terrestre de las Galápagos y la iguana marina de las Galápagos. Las iguanas marinas son criaturas especialmente sorprendentes, bastante distintas a cualquier otra criatura del resto del mundo. Se sumergen en el mar y comen algas, que parecen ser su único alimento. Son elegantes nadadoras, aunque, según la franca opinión de Darwin, no muy bellas:

> Es una criatura de aspecto espantoso, de color negro sucio, estúpida [52] y torpe en sus movimientos. La longitud habitual de un adulto es de algo menos de un metro, aunque algunos llegan a medir ciento veinte centímetros [...] sus colas están aplastadas por los lados y los cuatro pies parcialmente palmeados [...]. Cuando está en el agua, este lagarto nada con perfecta facilidad y rapidez,

mediante un movimiento serpenteante de su cuerpo y de su cola aplastada —mientras sus patas permanecen inmóviles y muy pegadas a sus flancos—.

Dado que las iguanas marinas son tan buenas nadadoras, se podría suponer que fueron ellas, y no las iguanas terrestres, las que llevaron a cabo la larga travesía desde el continente, y posteriormente evolucionaron en el archipiélago para dar lugar a la iguana terrestre. Sin embargo, este no parece ser el caso. La iguana terrestre de las Galápagos no es muy distinta de las iguanas que aún viven en el continente, mientras que las iguanas marinas son exclusivas del archipiélago. No se ha encontrado ningún lagarto con los mismos hábitos marinos en otro lugar del mundo. Hoy día estamos bastante seguros de que fue la iguana terrestre la que llegó originariamente desde el continente sudamericano, quizá sobre madera a la deriva, como aquellas que fueron arrastradas desde Guadalupe hasta Anguila. En las Galápagos evolucionaron después hasta dar lugar a las iguanas marinas. Y es casi seguro que fue el aislamiento geográfico facilitado por el patrón de distancias entre las islas lo que hizo posible la separación entre las iguanas ancestrales y las recién evolucionadas iguanas marinas. Presumiblemente, algunas iguanas terrestres fueron arrastradas de modo accidental hasta una de las islas no habitadas por otras iguanas, y allí adoptaron costumbres marinas, libres de la contaminación de los genes de las iguanas terrestres de la isla original. Mucho más tarde se esparcieron por las otras islas hasta regresar finalmente a la isla a la que habían llegado sus ancestros originales. En ese momento ya no podían cruzarse con las iguanas terrestres, y sus hábitos marinos genéticamente heredados estaban a salvo de cualquier contaminación por parte de los genes de las iguanas ancestrales.

Ejemplo tras ejemplo, Darwin se dio cuenta de lo mismo. Los animales y las plantas de cada isla de las Galápagos eran básicamente endémicos del archipiélago («creaciones aborígenes»), pero eran también en gran medida únicos, en detalle, de una isla a otra. En este sentido estaba especialmente impresionado con las plantas:

Por tanto, tenemos el hecho verdaderamente maravilloso de que en James Island [Santiago], de las treinta y ocho plantas propias de las Galápagos, que no se encuentran en ninguna otra parte del mundo, treinta son exclusivas de esta isla; y en la isla Albemarle [Isabela], de las veintiséis plantas propias de las Galápagos,

> veintidós están confinadas a esta isla, lo que implica que solo cuatro se dan en las otras islas, y así con todas... con las plantas de las islas de Chatham [San Cristóbal] y Charles [Floreana].

Observó lo mismo con la distribución de los mímidos a lo largo de las islas:

> Lo primero que llamó mi atención al comparar los numerosos especímenes de mímidos que yo y otros a bordo habíamos capturado fue descubrir con asombro que todos aquellos que provenían de la isla Charles pertenecían a una especie (*Mimus trifasciatus*); todos los que provenían de la isla Albemarle pertenecían a la especie *M. parvulus*; y todos los que provenían de las islas James y Chatham (entre las que hay otras dos islas que actúan como puente) pertenecían a la especie *M. melanotis.*

Así es, por todo el mundo. La fauna y la flora de una región en particular son precisamente lo que esperaríamos si, citando a Darwin sobre los pinzones que ahora llevan su nombre, «una de las especies hubiera sido escogida y modificada con fines diferentes».

El vicegobernador de las islas Galápagos, míster Lawson, intrigó a Darwin al informarle de que:

> ... las tortugas diferían de una isla a otra y que él mismo podía con seguridad decir de qué isla era cualquier espécimen que le trajese. Durante un tiempo no presté demasiada atención a este hecho, y ya había mezclado parcialmente las colecciones de dos de las islas. Nunca soñé que unas islas, separadas entre sí ochenta o cien kilómetros, y la mayoría a la vista las unas de las otras, formadas de la misma roca, ubicadas bajo un clima bastante similar y prácticamente a la misma altura, pudieran tener inquilinos tan diferentes.

Todas las tortugas gigantes de las Galápagos son similares a una especie particular de tortuga terrestre del continente, *Geochelone chilensis*, más pequeña que cualquiera de ellas. En algún momento durante los pocos millones de años de existencia de estas islas, una o unas pocas de estas tortugas continentales cayeron al mar y cruzaron flotando. ¿Cómo pudieron haber sobrevivido a la larga y, sin duda, ardua travesía?

Seguramente muchas no lo consiguieron. Pero solo hacía falta una hembra para que obrase el milagro. Y las tortugas están sorprendentemente bien equipadas para sobrevivir a una travesía así.

Los primeros balleneros se llevaron miles de tortugas gigantes de las Galápagos a sus barcos como alimento. Para conservar la carne fresca, las tortugas eran mantenidas vivas hasta que llegaba su hora, pero no se las alimentaba ni se les daba agua mientras esperaban a ser descuartizadas. Sencillamente las colocaban boca arriba y, en muchos casos, eran apiladas unas encima de otras para que no pudieran caminar. Cuento la historia no para provocar (aunque he de decir que semejante crueldad sí me horroriza), sino para constatar algo. Las tortugas pueden sobrevivir durante semanas sin comida ni agua dulce, lo suficiente como para flotar en la corriente de Humboldt desde América del Sur hasta el archipiélago de las Galápagos. Y las tortugas flotan.

Tras alcanzar la primera isla de las Galápagos para, posteriormente, multiplicarse en ella, las tortugas habrían —al azar, una vez más, y en este caso más fácilmente— superado las pequeñas distancias entre una isla y otra de la misma forma. E hicieron lo que muchos animales hacen cuando llegan a una isla: evolucionaron hasta crecer. Es el conocido fenómeno de gigantismo insular (para facilitar la confusión, también hay un célebre fenómeno de enanismo insular) [53]. Si las tortugas hubieran seguido el patrón de los famosos pinzones de Darwin, habrían evolucionado a diferentes especies en cada una de las islas. Después, tras varios cambios accidentales de isla, habrían sido incapaces de procrear entre sí (recuérdese que esa es la definición de especies diferentes) y habrían sido libres de evolucionar en cualquier dirección sin ningún tipo de contaminación genética.

Se podría decir que los hábitos de apareamiento incompatibles y otras preferencias de las diferentes especies constituyen un tipo de sustitutivo genético para el aislamiento geográfico de islas separadas. Aunque se superponen geográficamente, están así aisladas en «islas» de exclusividad reproductiva, por lo que se pueden separar aún más. Los albatros terrestres grande, mediano y pequeño se separaron originariamente en islas distintas; las tres especies coexisten ahora en la mayoría de las islas Galápagos sin procrear nunca las unas con las otras, y cada una está especializada en una dieta de semillas diferente.

Las tortugas hicieron algo similar al desarrollar formas de concha características en las diferentes islas. Las especies de las islas más grandes tienen cúpulas altas, mientras que las de las más pequeñas tienen conchas en forma de silla de montar, con una ventana frontal para la cabeza. Parece ser que la razón que lo justifica es que las islas más grandes son lo suficientemente húmedas como para tener hierba, y las tortugas allí comen pasto. En las más pequeñas, en su mayoría demasiado secas para tener hierba, las tortugas recurren a los cactus para alimentarse. La ventana de su concha permite a su cuello alcanzar los cactus, que, por su parte, son cada vez más altos en una carrera armamentista evolutiva contra las tortugas.

La historia de la tortuga añade al modelo del pinzón una complicación más, que es que para las tortugas los volcanes son islas dentro de islas. Los volcanes ofrecen oasis verdes altos y refrescantes, rodeados a menor altitud por campos de lava seca que constituyen desiertos hostiles para una tortuga gigante que come hierba. Cada una de las islas más pequeñas tiene un único gran volcán, y su propio tipo de especies (o subespecies) de tortugas gigantes (excepto las pocas islas que carecen de cualquier tipo). La gran isla de Isabela (Albemarle, para Darwin) está formada por una serie de cinco grandes volcanes, y cada volcán tiene sus propias especies (o subespecies) de tortugas. Realmente, Isabela es un archipiélago dentro de un archipiélago: un sistema de islas dentro de una isla. Y el principio de las islas en el sentido geográfico literal, preparando el escenario para la evolución de las islas en el sentido genético de las especies, nunca ha sido demostrado con mayor elegancia que aquí, en el archipiélago de la bendita juventud de Darwin [54].

Hay pocas islas más aisladas que Santa Elena, un simple volcán en el Atlántico Sur a unos mil ochocientos kilómetros de la costa de África. Tiene aproximadamente unas cien plantas endémicas (el joven Darwin las habría llamado «creaciones aborígenes» y el viejo Darwin habría dicho que habían evolucionado allí). Entre estas se encuentran (o se encontraban, porque algunos están hoy extinguidos) árboles que pertenecen a la familia de las margaritas.

Estos árboles se asemejan a árboles del África continental con los que no tienen relación cercana. Las plantas continentales con las que *están* relacionados son hierbas o pequeños arbustos. Lo que debió de ocurrir es que unas pocas semillas de estas hierbas pequeñas o arbustos cruzaron a través del espacio de mil ochocientos kilómetros desde África, se

asentaron en Santa Elena y, debido a que el nicho de árboles estaba incompleto, al evolucionar crecieron y adquirieron troncos leñosos, hasta que se convirtieron en árboles de verdad. Árboles similares, parecidos a margaritas, han evolucionado independientemente en el archipiélago de las Galápagos. Es el mismo patrón en islas de todo el mundo.

Cada uno de los grandes lagos africanos tiene su propia fauna única de peces, dominada por el grupo de los llamados cíclidos. Las colonias de cíclidos del lago Victoria, del lago Tanganica y del lago Malawi, cada una de ellas con cientos de especies, son completamente diferentes las unas de las otras. Evidentemente han evolucionado por separado en los tres lagos, lo que hace aún más fascinante el hecho de que en los tres hayan convergido en la misma línea de «cambio». Se diría que, en cada lago, una o dos especies fundadoras, de alguna manera, encontraron un modo de acceso, quizá desde los ríos, y en cada uno de estos lagos los fundadores evolucionaron y evolucionaron hasta poblar el lago con los cientos de especies que vemos hoy. ¿Cómo, dentro de los confines del lago, consiguieron especies amistosas entre sí el aislamiento geográfico inicial que les permitió separarse?

Árboles del bosque de Santa Elena

Imagen 55

Al introducir el asunto de las islas, expliqué que, desde el punto de vista de un pez, un lago rodeado por tierra es una isla. Menos obviamente, incluso una isla, en el sentido convencional de tierra rodeada por agua, puede ser una «isla» para un pez, especialmente un pez que solo vive en aguas poco profundas. Podemos imaginar un pez de un arrecife de coral que nunca se adentra en las profundas aguas del mar. Desde su punto de

vista, el saliente poco profundo de una isla de coral es una isla, y el Gran Arrecife de Coral es un archipiélago. Algo similar puede ocurrir incluso en un lago. Dentro de un lago, especialmente en uno muy grande, un afloramiento rocoso puede ser una isla para un pez cuyos hábitos lo confinan en aguas poco profundas. Es muy probable que fuese así como al menos algunos de los cíclidos de los grandes lagos africanos consiguieron su aislamiento inicial. La mayoría de los individuos se vieron confinados en aguas poco profundas alrededor de islas, o en bahías y ensenadas. Esto permitió un aislamiento parcial de otras zonas de aguas poco profundas, unidas entre ellas por ocasionales travesías de aguas más profundas, para formar el equivalente acuático a un «archipiélago» como el de las Galápagos.

Hay bastantes evidencias (por ejemplo, de muestras de núcleos de sedimentos) de que el nivel del lago Malawi (conocido como lago Nyasa cuando pasé mis primeras vacaciones de cubo y pala en sus playas arenosas) sube y baja dramáticamente a lo largo de los siglos, y alcanzó su punto más bajo en el siglo XVIII, más de cien metros por debajo del nivel actual. Muchas de sus islas no lo eran en aquella época, sino que eran colinas en la tierra alrededor del, entonces, pequeño lago. Cuando el nivel del lago subió, en los siglos XIX y XX, las colinas se convirtieron en islas, sucesiones de islas pasaron a ser archipiélagos y el proceso de evolución de las especies despegó entre los cíclidos que viven en las aguas poco profundas y son conocidos localmente como *mbuna*. «Casi todos los afloramientos rocosos e islas tienen su propia fauna de *mbuna,* con infinidad de formas, colores y especies. Teniendo en cuenta que muchas de estas islas y afloramientos eran tierra firme en los últimos doscientos o trescientos años, el establecimiento de esta fauna ha tenido lugar durante ese periodo».

Una evolución tan rápida de las especies es algo en lo que los peces cíclidos son extraordinariamente buenos. Los lagos Malawi y Tanganica son viejos, pero el lago Victoria es muy joven. La cuenca del lago se formó hace solo cuatrocientos mil años, y se ha secado varias veces desde entonces, la más reciente hace alrededor de diecisiete mil años. Esto parece significar que su fauna endémica, integrada por unas cuatrocientas cincuenta especies de peces cíclidos, ha evolucionado toda dentro de un espacio de tiempo de siglos, no de los millones de años que habitualmente asociamos con las divergencias evolutivas a mayor escala. Los cíclidos de

los lagos de África nos impresionan al mostrar lo que la evolución puede hacer en un pequeño espacio de tiempo. Casi habrían hecho méritos para su inclusión en el capítulo titulado «Justo delante de nuestros ojos».

Los bosques de Australia están dominados por árboles de un único género, *Eucalyptus,* y hay más de setecientas especies de ellos llenando un amplio rango de nichos. Una vez más, el dictado de Darwin acerca de los pinzones puede ser traído a colación: «Cabría imaginar que una de las especies de eucalipto habría sido elegida y modificada para diferentes fines». Siguiendo un razonamiento paralelo, un ejemplo incluso más famoso es el de la fauna australiana de mamíferos. En Australia hay, o había hasta extinciones relativamente recientes y quizá causadas por la llegada de los aborígenes, el equivalente ecológico de lobos, gatos, conejos, topos, musarañas, leones, ardillas voladoras y muchos otros. Sin embargo, son marsupiales, muy diferentes de los lobos, gatos, conejos, topos, musarañas, leones y ardillas voladoras con los que estamos familiarizados en el resto del mundo, los denominados «mamíferos de placenta». Los equivalentes australianos descienden todos de unas pocas, o incluso de una sola, especies marsupiales ancestrales, «elegidas y modificadas para diferentes fines». Esta bella fauna marsupial también ha producido criaturas para las cuales es difícil encontrar un referente fuera de Australia. Las numerosas especies de canguros prácticamente encajan en el nicho del antílope (o en el nicho del mono o del lémur en el caso de los canguros arborícolas), pero se mueven saltando en vez de corriendo. Van desde el gran canguro rojo (y algunos extintos que eran incluso mayores, como el temible canguro carnívoro) hasta el pequeño walabí y el canguro arborícola. Hubo marsupiales gigantes del tamaño de rinocerontes, los diprotodontes, emparentados con los modernos wombats pero de casi tres metros de longitud, 180 centímetros de altura hasta el hombro y dos toneladas de peso. Regresaré a los marsupiales de Australia en el siguiente capítulo.

Es casi demasiado ridículo mencionarlo, pero me temo que tengo que hacerlo por ese 40% de la población estadounidense que, como lamenté en el capítulo 1, acepta la Biblia literalmente: piense cómo sería la distribución geográfica de los animales si se hubieran dispersado todos a partir del arca de Noé. ¿No debería haber algún tipo de ley de diversidad de las especies decreciente según nos alejamos de un epicentro, quizá del monte Ararat? No hace falta que diga que eso no es lo que vemos.

¿Por qué todos esos marsupiales —desde los pequeños ratoncillos, pasando por los koalas y los bilbys, a los canguros gigantes y los diprotodontes—, pero ningún mamífero placental, emigraron en masa desde el monte Ararat hasta Australia? ¿Qué ruta tomaron? ¿Y por qué ni uno solo de los miembros de esa desordenada caravana se paró en el camino y se asentó —quizá en la India o en China, o en algún punto a lo largo de la Ruta de la Seda—? ¿Por qué el orden entero de *Edentata* (las veinte especies de armadillos, incluido el extinto armadillo gigante, las seis especies de perezosos, incluidos los extintos perezosos gigantes, y las cuatro especies de osos hormigueros) vagó por América del Sur sin dejar un solo rastro, sin dejar ni un trozo de piel, ni un pelo, ni una escama de ningún colonizador a lo largo del camino? ¿Por qué se les unió el infraorden completo de los roedores caviomorfos, incluidos los conejillos de indias, las pacas, las maras, las capibaras, las chinchillas y muchos otros, un amplio grupo de roedores característicamente sudamericanos que no se encuentran en ningún otro lugar? ¿Por qué todo un suborden de monos, los monos de nariz chata, acabó en América del Sur y en ningún otro lado? ¿No deberían al menos unos pocos haberse unido al resto de los monos, los catarrinos, en Asia o África? ¿Y no debería al menos una de las especies de catarrinos haber acabado en el Nuevo Mundo junto a los platirrinos? ¿Por qué todos los pingüinos llevaron a cabo la larga travesía hacia el Sur, hacia el Antártico, sin que ninguno de ellos acabase en el igualmente habitable Ártico?

Un lémur ancestral, una vez más muy posiblemente una especie única, llegó a Madagascar. Ahora hay treinta y siete especies de lémur (más algunos extintos). Varían en tamaño: desde el lémur ratón pigmeo, más pequeño que un hámster, hasta el lémur gigante, más grande que un gorila y con apariencia de oso, que se extinguió hace muy poco. Todos, hasta el último de ellos, están en Madagascar. ¿Cómo piensa ese 40% de negadores de la historia que alcanzamos una situación así? ¿Acaso las treinta y siete especies de lémur más alguna otra salieron corriendo por la pasarela de Noé y enfilaron hacia Madagascar, sin dejar ni un solo rastro en el camino, ni uno solo en todo el ancho y largo continente africano?

Una vez más, lamento usar un martillo tan grande para cascar una nuez tan pequeña, pero tengo que hacerlo porque más del 40% de la población norteamericana cree literalmente en la historia de Noé. Deberíamos ignorarlos y continuar con nuestra ciencia, pero no podemos

permitírnoslo porque controlan direcciones de colegios, dan clases a sus hijos en sus casas para impedirles el contacto con profesores de ciencias adecuados y entre ellos hay muchos miembros del Congreso de los Estados Unidos, algunos gobernadores e incluso varios candidatos a presidente y vicepresidente. Tienen el dinero y el poder para fundar instituciones, universidades, incluso un museo donde los niños montan en modelos mecánicos de dinosaurios, animales que, según se les dice solemnemente, coexistieron con los humanos. Y tal como han demostrado encuestas recientes, Gran Bretaña no va muy por detrás (¿o debería decir «delante»?), junto con otros lugares de Europa y la mayoría del mundo islámico.

Incluso si dejamos el monte Ararat a un lado; incluso si evitamos satirizar sobre aquellos que se toman el mito del arca de Noé en sentido literal, aparecen problemas similares para cualquier teoría de la creación separada de las especies. ¿Por qué un creador todopoderoso decidiría plantar sus especies cuidadosamente creadas en islas y continentes con el patrón exactamente apropiado para sugerir, de modo inequívoco, que habían evolucionado y se habían dispersado desde el lugar de su evolución? ¿Por qué pondría lémures en Madagascar y en ningún otro sitio más? ¿Por qué pondría monos platirrinos solo en América del Sur, y monos catarrinos solo en África y Asia? ¿Por qué no hay ni un solo mamífero en Nueva Zelanda, excepto murciélagos que pudieron llegar allí volando? ¿Por qué los animales de las cadenas de islas se parecen más a aquellos que están en sus islas vecinas y casi siempre se parecen, aunque menos pero de forma inequívoca, a los del continente o la gran isla más cercanos? ¿Por qué pondría el creador solo mamíferos marsupiales en Australia, de nuevo excepto los murciélagos, que pudieron llegar allí volando, y aquellos que pudieron hacerlo en canoas construidas por el hombre? El hecho es que, si revisamos cada continente y cada isla, cada lago y cada río, cada cima de montaña y cada valle alpino, cada bosque y cada desierto, la única manera en que la distribución de los animales y las plantas tiene sentido es, una vez más, siguiendo el descubrimiento de Darwin sobre los pinzones de las Galápagos: «cabría imaginar que, a partir de un pequeño número de pájaros en este archipiélago, una de las especies hubiera sido escogida y modificada con fines diferentes».

Darwin estaba fascinado por las islas y caminó a lo largo y a lo ancho de unas cuantas en su viaje con el *Beagle*. Incluso descubrió la sorprendente verdad sobre cómo se formaban islas de una clase muy importante, aquellas construidas por los animales llamados «corales». Más tarde Darwin llegaría a comprender la crucial importancia de las islas y los archipiélagos para su teoría, y haría varios experimentos para responder a preguntas sobre la teoría del aislamiento geográfico como un preludio de la especiación (él no utilizó ese término). Por ejemplo, en una serie de experimentos guardó semillas en agua de mar durante largos periodos y demostró que algunas mantenían el poder de germinar incluso después de una inmersión suficientemente larga como para haber viajado a la deriva desde un continente hasta una isla vecina. Descubrió también que los huevos de rana morían inmediatamente en el agua de mar, e hizo buen uso de este conocimiento para explicar un hecho fundamental acerca de la distribución geográfica de las ranas:

> Con respecto a la ausencia de órdenes enteros en islas oceánicas, Bory St. Vincent comentó hace mucho que los batracios (ranas, sapos, tritones) nunca han sido encontrados en ninguna de las muchas islas que se localizan en los grandes océanos. Con gran esfuerzo he tratado de verificar esta afirmación, y he descubierto que es estrictamente cierta. Sin embargo, he sido informado de que existe una rana en las montañas de la gran isla de Nueva Zelanda, pero supongo que esta excepción (si la información es correcta) podría ser explicada por la acción de los glaciares. Esta ausencia general de ranas y sapos en muchas de las islas oceánicas no tiene nada que ver con sus condiciones físicas; de hecho, parece que las islas están especialmente bien preparadas para estos animales, teniendo en cuenta que las ranas han sido introducidas en Madeira, las Azores y Mauricio, y allí se han multiplicado hasta convertirse en una molestia. Pero sabiendo que estos animales y sus huevos mueren inmediatamente en el agua de mar, desde mi punto de vista podemos ver que sería muy difícil su transporte a través del mar, y de ahí la razón por la que no existen en islas oceánicas. Pero la razón por la que según la teoría de la creación no debieron haber sido creadas allí sería muy difícil de explicar.

Darwin era muy consciente del significado de la distribución geográfica de las especies para su teoría de la evolución. Se dio cuenta de que muchos de los hechos podían ser explicados si asumimos que los

animales y las plantas han evolucionado. Partiendo de ahí podemos esperar —y así lo descubrimos— que los animales modernos tiendan a vivir en el mismo continente en el que se hallan los fósiles de los que probablemente fueron sus antepasados, o de animales cercanos a sus antepasados. Debemos esperar, y así lo hemos visto, que los animales compartan el mismo continente con especies que se parecen entre sí. Esta es la reflexión de Darwin sobre esta materia, con especial atención a los animales de América del Sur que él conocía tan bien:

> El naturalista que viaja, por ejemplo de Norte a Sur, nunca deja de sorprenderse por la manera en la que los grupos sucesivos de seres, específicamente distintos, pero aun así claramente relacionados, se reemplazan los unos a los otros. Puede oír hablar de distintos tipos de pájaros, aunque muy relacionados, muy similares, y ver sus nidos construidos de forma muy parecida, aunque no exactamente igual, con huevos coloreados casi de la misma forma. Las llanuras cerca del estrecho de Magallanes están habitadas por una especie de ñandú (avestruz americano) y, al norte, las llanuras de La Plata por otra especie del mismo género; y no por un verdadero avestruz o emú, como los que se encuentran en África o Australia en la misma latitud. En estas mismas llanuras de La Plata, vemos a las pacas y las vizcachas, animales que tienen prácticamente los mismos hábitos que nuestros conejos y nuestras liebres... pero que muestran un tipo de estructura propiamente americano. Cuando ascendemos los majestuosos picos de la Cordillera encontramos las especies alpinas de vizcacha; si miramos al agua, no encontraremos la comadreja ni la rata almizclera, sino el coipú y la capibara, roedores del tipo americano.

Esto es básicamente sentido común, y Darwin pudo recopilar una enorme cantidad de observaciones gracias al sentido común. Pero hay otros hechos acerca de la distribución geográfica de los animales y las plantas, y de la distribución de las rocas, que necesitan otro tipo de explicación: una que es todo menos sentido común y que habría sorprendido y cautivado a Darwin si hubiera llegado a conocerla.

¿Se movió la Tierra?

Todo el mundo en la época de Darwin pensaba que el mapamundi era básicamente algo constante. Algunos de sus contemporáneos contemplaron la posibilidad de amplios puentes de tierra ahora sumergidos para explicar, por ejemplo, las similitudes entre la flora de América del Sur y África. El propio Darwin no estaba muy de acuerdo con la idea del puente de tierra, pero seguramente le habría encantado la evidencia moderna de que continentes enteros se mueven sobre la faz de la Tierra. Esto ofrece, con mucho, la mejor explicación para algunos grandes hechos en la dispersión de animales y plantas, especialmente de los fósiles. Por ejemplo, hay similitudes entre los fósiles de América del Sur, África, la Antártida, Madagascar, la India y Australia que hoy día podemos explicar invocando el antaño gran continente del Sur llamado Gondwana, que unificaba todas estas tierras modernas. Una vez más, nuestro detective que llega tarde se ve obligado a aceptar la conclusión de que la evolución es un hecho.

La teoría de la «deriva continental», como se denomina comúnmente, fue propuesta por primera vez por el climatólogo alemán Alfred Wegener (1880-1930). Wegener no fue el primero que miró el mapa del mundo y se dio cuenta de que la forma de un continente o una isla a veces encaja con la de la línea costera opuesta, como si las dos masas de tierra fueran piezas de un rompecabezas, incluso cuando la línea costera opuesta está muy lejos. No estoy hablando de pequeños ejemplos locales, como el de la isla de Wight, que encaja a la perfección con la costa de Hampshire. Lo que Wegener y sus predecesores comprendieron es que algo así parecía ser cierto con respecto a todas las costas opuestas de los grandes continentes de África y América. La costa brasileña parece recortada por un sastre para encajar bajo el saliente de África occidental, mientras que la parte norte del saliente de África encaja perfectamente con la costa de América del Norte que va desde Florida hasta Canadá. No solo es que las formas encajen más o menos: Wegener también mostró que había formaciones geológicas por toda la cara este de América del Sur que se correspondían con partes de África occidental. De una manera menos clara, la costa occidental de Madagascar tiene una forma que encaja bastante bien con la costa oriental de África (no la sección de la costa de Sudáfrica que está enfrente actualmente, sino la costa de Tanzania y Kenia, un poco más al Norte), mientras que la larga y recta línea del lado oriental de Madagascar es comparable con el largo borde de la India occidental. Wegener también indicó que los fósiles antiguos encontrados en África y América del Sur

eran más similares de lo que cabría pensar si el mapa del mundo hubiera sido siempre tal y como es hoy día. ¿Cómo puede ser, dada la inmensidad del Atlántico Sur? ¿Es posible que los dos continentes estuvieran en algún momento mucho más cerca, o incluso unidos? La idea era fascinante, pero adelantada a su tiempo. Wegener también observó similitudes entre los fósiles de Madagascar y la India, y hay igualmente afinidades entre los fósiles de la parte septentrional de América del Norte y Europa.

Tales observaciones llevaron a Wegener a proponer su herética hipótesis sobre la deriva continental. Todos los grandes continentes del mundo, sugirió, habían estado unidos con anterioridad en un gigantesco supercontinente llamado Pangea. A lo largo de un inmenso periodo de tiempo geológico, propuso Wegener, Pangea se desmembró gradualmente para formar los continentes que hoy conocemos, y entonces flotaron a la deriva lentamente hacia sus posiciones actuales, y aún no han dejado de moverse.

Casi me parece oír a los contemporáneos escépticos de Wegener preguntar, por utilizar la jerga actual, qué había estado fumando. Aun así, hoy día sabemos que acertó. O casi. Tan amplio de miras e imaginativo como era Wegener, debo aclarar que su hipótesis de la deriva continental era significativamente diferente de nuestra moderna teoría de las placas tectónicas. Wegener pensaba que los continentes se movían sobre los océanos como barcos gigantes, no como si flotasen en el agua a modo de la isla hueca del doctor Dolittle de Popsipetl, sino más bien flotando por encima del manto semilíquido del planeta. Con cierta razón, otros científicos levantaron barreras de escepticismo. ¿Qué fuerzas titánicas podrían propulsar un objeto del tamaño de América del Sur o África a lo largo de miles de millas? Ahora pasaré a explicar cómo la moderna teoría de las placas tectónicas difiere de la teoría de Wegener, antes de ver por qué supone una evidencia a nuestro favor.

Viñeta cómica inspirada en la teoría de la deriva continental de Wegener

Imagen 56

En la teoría de las placas tectónicas, el conjunto de la superficie de la Tierra, incluido el fondo de los océanos, está compuesto por una serie de placas rocosas que se superponen como piezas de una armadura. Los continentes que vemos son partes más estrechas de las placas que surgen por encima del nivel del mar. La mayor parte del área de cada placa se encuentra por debajo del mar. A diferencia de los continentes de Wegener,

las placas no navegan por el mar ni se mueven sobre la superficie de la Tierra, sino que *son* la superficie de la Tierra. No piense, como hizo Wegener, en los continentes ensamblándose como un puzle o separados los unos de los otros, no es así. En lugar de eso imagine una placa que se está construyendo continuamente con un borde creciente, en un proceso sorprendente que se conoce como expansión oceánica, que explicaré en un momento. En otros bordes, la placa puede ser «subducida» bajo otra placa vecina. O incluso placas vecinas pueden deslizarse la una junto a la otra. La fotografía en color de la página 17 muestra una porción de la falla de San Andrés, en California, que es donde los bordes de la placa del Pacífico y la placa de América del Norte se deslizan uno sobre otro. La combinación de la expansión oceánica y la subducción significa que no hay huecos entre las placas. La superficie entera del planeta está cubierta por placas, y cada una de ellas desaparece normalmente por subducción bajo una placa vecina en un lado, o resbala sobre otra mientras crece en cualquier otro lugar gracias a la expansión oceánica.

Resulta inspirador pensar en la gran falla que una vez hubo de serpentear por debajo del continente de Gondwana, entre las futuras África y América del Sur. No hay duda de que en su momento estuvo salpicada de lagos como la actual fosa tectónica de África oriental. Más tarde se llenó con agua del mar cuando América del Sur se desgarró con tectónica agonía. Podemos imaginar la vista que disfrutó algún corpulento dinosaurio al contemplar el largo y angosto estrecho formado por la «Gondwana occidental» al separarse. Wegener tenía razón acerca de lo complementario de las piezas del puzle y de que sus formas no eran accidentales. Pero se equivocó al pensar en los continentes como barcas gigantes, moviéndose lentamente a través de fosos ocupados por el mar entre ellos. América del Sur y África, y sus plataformas continentales, no son más que las regiones que sobresalen de dos placas, la mayoría de cuya parte rocosa se encuentra bajo el mar. Las placas constituyen la litosfera dura —literalmente, ‘esfera de roca’— que flota por encima de la ardiente, semiderretida, astenosfera —‘esfera de debilidad’—. La astenosfera es débil en el sentido de que no es rígida y quebradiza como las placas de roca de la litosfera, sino que se comporta prácticamente como un líquido: cediendo, como la masilla o el caramelo, sin estar necesariamente derretida. De manera un tanto confusa, esta distinción entre dos esferas

concéntricas no se corresponde totalmente con la distinción más conocida (basada en la composición química antes que en la fuerza física) entre la corteza y el manto.

Gran parte de las placas consiste en dos tipos distintos de rocas litosféricas. La parte más profunda de los océanos está cubierta por una capa bastante uniforme de roca ígnea muy densa, de aproximadamente diez kilómetros de grosor. Esta capa ígnea se recubre de una capa superficial de roca sedimentaria y barro. Un continente es, de nuevo, el área de la placa visible por encima del nivel del mar, que se eleva a esta altura donde la placa adquiere más grosor por la presencia de capas adicionales de roca menos densa. Las partes submarinas de las placas están en continua creación en sus márgenes —el margen oriental en el caso de la placa de América del Sur, el occidental en el caso de la de África—. Estos dos márgenes bordean la Cordillera Central Atlántica, que serpentea por mitad del Atlántico desde Islandia (que es, de hecho, la única parte sustancial de la cordillera que alcanza la superficie) hasta el lejano Sur.

Otras cordilleras submarinas similares están moviendo sus placas en otras partes el mundo (véanse las páginas en color 18 y 19). Estas cordilleras submarinas trabajan como fuentes alargadas (en la escala temporal lenta de la geología), liberando roca fundida en el proceso que ya he mencionado y que es conocido como expansión oceánica. La cordillera en expansión del Atlántico medio parece empujar a la placa africana hacia el Este y a la placa sudamericana hacia el Oeste. Se ha sugerido la imagen de un par de burós desplegándose en direcciones divergentes, y es bastante cercana a la realidad, suponiendo que recordemos que todo está ocurriendo en una escala temporal demasiado lenta como para que los humanos lo apreciemos. De hecho, la velocidad a la que América del Sur y África se separan ha sido relacionada de forma memorable —tan memorable que se ha convertido en un cliché— con la velocidad a la que crecen las uñas. El hecho de que ahora se encuentren a miles de kilómetros de distancia es un testimonio adicional de la enorme y poco bíblica edad de la Tierra, comparable con la evidencia de la radiactividad que vimos en el capítulo 4.

He utilizado la expresión «parece empujar» justo ahora y debo corregirme a mí mismo. Es tentador pensar en esos burós desenrollándose como si empujaran a sus respectivas placas continentales desde atrás. Esto no es realista; la escala está mal. Las placas tectónicas son demasiado grandes como para ser empujadas desde atrás por fuerzas volcánicas

ascendentes a lo largo de una cordillera en mitad del océano. Sería como si un renacuajo tratase de apartar un petrolero. Pero esto nos lleva al punto clave. La astenosfera, con su propiedad de ser cuasilíquida, tiene corrientes de convección que se extienden a través de toda su superficie, por debajo de toda el área de las placas. En cualquier región, la astenosfera se mueve lentamente en una dirección constante, y después da la vuelta en la dirección opuesta por debajo, en sus capas más profundas. La capa superior de la astenosfera bajo la placa sudamericana, por ejemplo, se mueve inexorablemente hacia el Oeste. Y mientras que es inconcebible que un buró pudiera tener la fuerza suficiente como para empujar la placa sudamericana, no es para nada inconcebible que una corriente de convección, avanzando lentamente en una dirección constante *bajo toda la superficie inferior* de una placa, pudiera arrastrar su carga continental flotante. Ahora no estamos hablando de renacuajos. Un superpetrolero en la corriente de Humboldt, con sus motores apagados, se movería sin duda con la corriente.

Esta es, en resumen, la teoría moderna de las placas tectónicas. Ahora debo volver a las pruebas que demuestran que es cierta. En realidad, como suele ocurrir con los hechos científicos establecidos [55], hay muchos tipos distintos de pruebas, pero solo voy a hablar de las que resultan más decisivas. Se trata de la evidencia que proviene de la edad de las rocas y, especialmente, de las bandas magnéticas en ellas. Es casi demasiado bueno para ser cierto, una perfecta ilustración de mi detective que llega tarde a la escena del crimen y es conducido inexorablemente a una única conclusión. Incluso tenemos algo que se parece mucho a las huellas dactilares: huellas dactilares magnéticas gigantes en las rocas.

Deberíamos acompañar a nuestro detective metafórico en un viaje a través del Atlántico Sur, en un submarino construido para la ocasión capaz de soportar la inmensa presión de la profundidad del océano. El submarino está equipado con un taladro que permite recoger muestras de rocas, a través del sedimento superficial del fondo del mar y hasta alcanzar la misma litosfera volcánica, y también cuenta con un laboratorio a bordo para datar radiométricamente las muestras (véase el capítulo 4). El detective fija el rumbo hacia el Este saliendo del puerto brasileño de Maceio, diez grados de latitud al sur del ecuador. Habiendo viajado más o menos cincuenta kilómetros a través de las aguas poco profundas de la corteza continental (que para los propósitos actuales cuenta como parte de

América del Sur), aseguramos las escotillas de alta presión y nos sumergimos hacia las profundidades, donde la única luz visible normalmente es el destello ocasional de luminiscencia verdosa que proviene de las figuras grotescas que habitan este mundo extraño.

Cuando alcanzamos la máxima profundidad, alrededor de 6.500 metros, perforamos en busca de la litosfera volcánica y tomamos una muestra de la roca. El laboratorio comienza a trabajar y data la muestra en el Cretácico inferior, aproximadamente hace 140 millones de años. El submarino sigue hacia el Este a lo largo del paralelo 10, tomando muestras de rocas a intervalos frecuentes. La edad de cada muestra es cuidadosamente medida y el detective investiga las dataciones en busca de un patrón. No tiene que buscar demasiado lejos. Ni siquiera al doctor Watson se le pasaría por alto. Según viajamos hacia el Este a lo largo de las grandes llanuras de las profundidades submarinas, las rocas se vuelven cada vez más jóvenes. Aproximadamente 730 kilómetros después, las muestras de rocas son ya del Cretácico tardío, de hace unos 65 millones de años, que es precisamente cuando el último de los dinosaurios se extinguió. El patrón continúa mientras nos vamos acercando hacia la mitad del Atlántico y las luces del submarino comienzan a avistar las laderas de una gigantesca formación montañosa submarina. Se trata de la Cordillera Central del Atlántico (véanse páginas en color 18 y 19), que nuestro submarino debe ahora empezar a escalar. Nos arrastramos cada vez más arriba mientras seguimos recogiendo muestras de rocas, y observamos que estas se van haciendo cada vez más y más jóvenes. Para el momento en el que alcanzamos los picos de la cordillera, las rocas son tan jóvenes que podrían haber sido recientemente liberadas desde algún volcán, en forma de lava fresca. De hecho, eso es básicamente lo que ha ocurrido. La isla de Ascensión es parte de la Cordillera Central del Atlántico, que sobresale por encima del nivel del mar como resultado de una serie de erupciones recientes —bueno, he dicho recientes: quizá hace seis millones de años, lo que es reciente dentro de los estándares de las rocas que hemos ido recogiendo a lo largo de nuestro recorrido submarino—.

Ahora nos dirigimos hacia África, por encima del otro lado de la cordillera, sumergiéndonos hasta las profundas llanuras del fondo del Atlántico Este. Seguimos recogiendo muestras de rocas y, como ya habrá imaginado, las rocas se vuelven progresivamente más viejas según nos acercamos a África. Es la imagen exactamente contraria al patrón que

observamos antes de alcanzar la Cordillera Central Atlántica. El detective no tiene ninguna duda acerca de la explicación. Las dos placas se están separando al expandirse el suelo marino, alejándose de la cordillera. Toda la roca nueva que se añade a las dos placas divergentes proviene de la actividad volcánica de la propia cordillera, y después es transportada, en direcciones opuestas, por uno u otro de los gigantescos «burós» que llamamos las placas africana y sudamericana. Los falsos colores en las imágenes de las páginas 18 y 19 sirven para ilustrar este proceso y denotan la edad de las rocas, siendo las rojas las más jóvenes. Se puede ver la maravillosa manera en que los patrones de edad a los dos lados de la Cordillera Central Atlántica son un reflejo perfecto uno del otro.

¡Qué historia tan extraordinaria! Pero aún puede mejorar. El detective percibe un patrón más sutil en las muestras de rocas a medida que van siendo procesadas en el laboratorio de a bordo. Las muestras de rocas que han sido arrancadas de la litosfera son ligeramente magnéticas, como agujas de una brújula. El fenómeno es perfectamente comprensible. Cuando la roca derretida se solidifica, el campo magnético de la Tierra deja su huella en ella, en forma de polarización de los pequeños cristales que conforman la roca ígnea. Los cristales se comportan como diminutas agujas de brújula inmovilizadas, obligadas a marcar la dirección a la que estaban apuntando en el momento en el que la lava fundida se solidificó. Desde hace tiempo sabemos que el polo magnético de la Tierra no está fijo, sino que se mueve, probablemente debido a corrientes que rezuman lentamente en la mezcla de hierro y níquel fundidos que hay en el núcleo del planeta. En la actualidad, el norte magnético se encuentra cerca de la isla de Ellesmere, en el norte de Canadá, pero no permanecerá allí. Para determinar el verdadero Norte utilizando una brújula magnética, los marineros necesitan recurrir a un factor de corrección, que cambia cada año según fluctúa el campo magnético del planeta.

Mientras nuestro detective registra meticulosamente el ángulo exacto en el que reposaban los núcleos rocosos cuando los recogió, el campo magnético inmovilizado en cada muestra le dice la posición del campo magnético de la Tierra el día que la roca se solidificó. Y ahora viene el argumento decisivo. Sucede que, a intervalos regulares de decenas o cientos de miles de años, el campo magnético de la Tierra se da la vuelta totalmente, quizá debido a cambios muy significativos en la mezcla de níquel y hierro del núcleo. Lo que fue el norte magnético cambia hasta una

posición cercana al verdadero Polo Sur, y lo que fue el sur magnético cambia hacia el Norte. Y, por supuesto, las rocas recogen la posición del norte magnético el día que se solidificaron. Teniendo en cuenta que la polarización cambia cada pocas decenas de miles de años, un magnetómetro puede detectar bandas que recorren el lecho rocoso: bandas en las que los campos magnéticos de las muestras de roca apuntan todos a una única dirección, alternando con bandas en las que los campos magnéticos apuntan todos en la dirección contraria. Nuestro detective las colorea en blanco y negro en el mapa. Cuando mira ese mapa, como si analizase huellas dactilares, descubre un patrón indiscutible. Al igual que las marcas de color que señalaban la edad absoluta de las rocas, las huellas dactilares magnéticas del lado occidental de la Cordillera Central del Atlántico son un elegante reflejo de las marcas del lado oriental. Exactamente lo que esperaríamos si la polaridad magnética de la roca fuera marcada cuando la lava se solidificó en la cordillera y después se hubiese alejado lentamente en direcciones opuestas a una velocidad fija y extremadamente pequeña. ¡Elemental, mi querido Watson [56]!

Por volver a la terminología del capítulo 1, la transformación de la hipótesis de Wegener de la deriva continental en la moderna teoría de las placas tectónicas es un ejemplo de manual de la consolidación de una hipótesis tentativa en un hecho o *teoremum* universalmente aceptado. Los movimientos de las placas tectónicas son importantes en este capítulo porque, sin ellos, no podríamos comprender adecuadamente la distribución de los animales y las plantas en los continentes y las islas de nuestro mundo. Cuando hablé de la barrera geográfica inicial que separaba a dos especies incipientes, propuse un terremoto que cambiase el curso de un río. También podría haber mencionado la fuerza de las placas tectónicas que dividen un continente en dos y mueven los dos fragmentos gigantescos en direcciones opuestas, junto con sus animales y sus plantas —el arca de los continentes—.

Madagascar y África formaron una vez parte del gran continente de Gondwana, junto a América del Sur, la Antártida, la India y Australia. Gondwana empezó a romperse —de manera increíblemente lenta para los estándares de nuestra percepción— hace unos 165 millones de años. En ese momento Madagascar, todavía unida a la India, Australia y la Antártida, la Gondwana oriental, comenzó a separase del lado oriental de África. Al mismo tiempo, América del Sur se desgajó de África occidental

en la dirección contraria. Gondwana oriental se rompió bastante más tarde, y, al final, Madagascar se separó de la India hace aproximadamente noventa millones de años. Cada uno de los fragmentos de la vieja Gondwana llevaba a bordo un cargamento de animales y plantas. Madagascar fue una verdadera «arca», al igual que la India. Es probable, por ejemplo, que los antepasados de los avestruces y de los pájaros elefante se originasen en Madagascar/India cuando aún estaban unidas. Más tarde se separaron. Aquellos que permanecieron en la gran balsa llamada Madagascar evolucionaron hasta convertirse en los pájaros elefante, mientras los antepasados de los avestruces navegaron en el barco conocido como India y, posteriormente —cuando la India colisionó con Asia dando lugar al Himalaya—, fueron libres de vagar por el continente asiático, donde finalmente encontraron un camino hacia África, su hábitat natural hoy día. Los pájaros elefante, sin embargo, no volvieron a ser vistos (ni oídos, pues si hubieran pisoteado el suelo todo habría temblado). Mucho más grandes que el más grande de los avestruces, estos gigantes de Madagascar son probablemente el origen del legendario «roc», que aparece en el segundo viaje de Simbad el Marino. Aunque eran lo suficientemente grandes como para que un hombre hubiera cabalgado sobre su lomo, no tenían alas, por lo que nunca podrían haber transportado a Simbad, como se pretendió [57].

No es solo que la teoría de las placas tectónicas, ahora sólidamente establecida, aporte numerosas pruebas que explican la distribución de los fósiles y las criaturas vivas, sino que nos ofrece aún más evidencia de la extrema antigüedad de la Tierra. Debería, por tanto, ser una espina en el lado de los creacionistas, al menos de los creacionistas que hablan de la joven Tierra. ¿Cómo sustentan estas ideas? De hecho, de una manera bastante extraña. No niegan el cambio de los continentes, pero piensan que ocurrió a gran velocidad y muy recientemente, en la época de la inundación de Noé [58]. Cabría pensar que, dado que no tienen ningún problema en ignorar evidencias que no les convienen, como es el caso de la enorme cantidad de pruebas acerca de la evolución, utilizarían el mismo truco con la evidencia de las placas tectónicas. Pero no: extrañamente, aceptan el hecho de que América del Sur encajó una vez con África. Parecen asumir esta evidencia como definitiva, incluso aunque la evidencia del hecho de la evolución es mucho mayor, y ellos la niegan sin

problemas. Dado que la evidencia significa tan poco para ellos, uno se pregunta por qué no se lían la manta a la cabeza y simplemente niegan también todo lo que respecta a las placas tectónicas.

El libro de Jerry Coyne *Why Evolution is True* [Por qué la evolución es verdad] ofrece un tratamiento magistral de la evidencia proporcionada por la distribución geográfica (como cabría esperar del autor del libro actual más importante sobre la especiación). También da en el clavo con respecto a la tendencia de los creacionistas a ignorar las pruebas cuando no apoyan la postura que ellos saben, por las Sagradas Escrituras, que debe ser cierta. «La evidencia biogeográfica para la evolución es hoy día tan poderosa que nunca he visto un artículo o libro creacionista que haya intentado refutarla. Los creacionistas simplemente fingen que dicha evidencia no existe». Los creacionistas actúan como si los fósiles fueran la única prueba de la evolución, y, de hecho, las pruebas fósiles son bastante sólidas. Toneladas de fósiles han sido descubiertas desde la época de Darwin, y todas estas pruebas o bien la apoyan activamente o son compatibles con la evolución. Aún más revelador, como ya he mencionado, es que ni un solo fósil contradice la evolución. Aun así, a pesar de lo eficaces que resultan las pruebas fósiles, quiero volver a incidir en el hecho de que no son la evidencia más poderosa con la que contamos. Aunque no se hubiera encontrado ni un solo fósil, las pruebas que provienen de los animales que han sobrevivido serían suficientes para llevarnos a la conclusión de que Darwin estaba en lo cierto. El detective que llega a la escena del crimen después de los hechos puede acumular pistas de los supervivientes que son incluso más indiscutibles que los fósiles. En este capítulo hemos visto que la distribución de los animales en las islas y los continentes es exactamente la que cabría esperar si todos fueran parientes que hubieran evolucionado de antepasados comunes a lo largo de grandes periodos de tiempo. En el próximo capítulo compararemos a los animales modernos entre sí, observando la distribución de las características en el reino animal, y en especial comparando sus secuencias de código genético, lo que nos llevará a la misma conclusión.

10

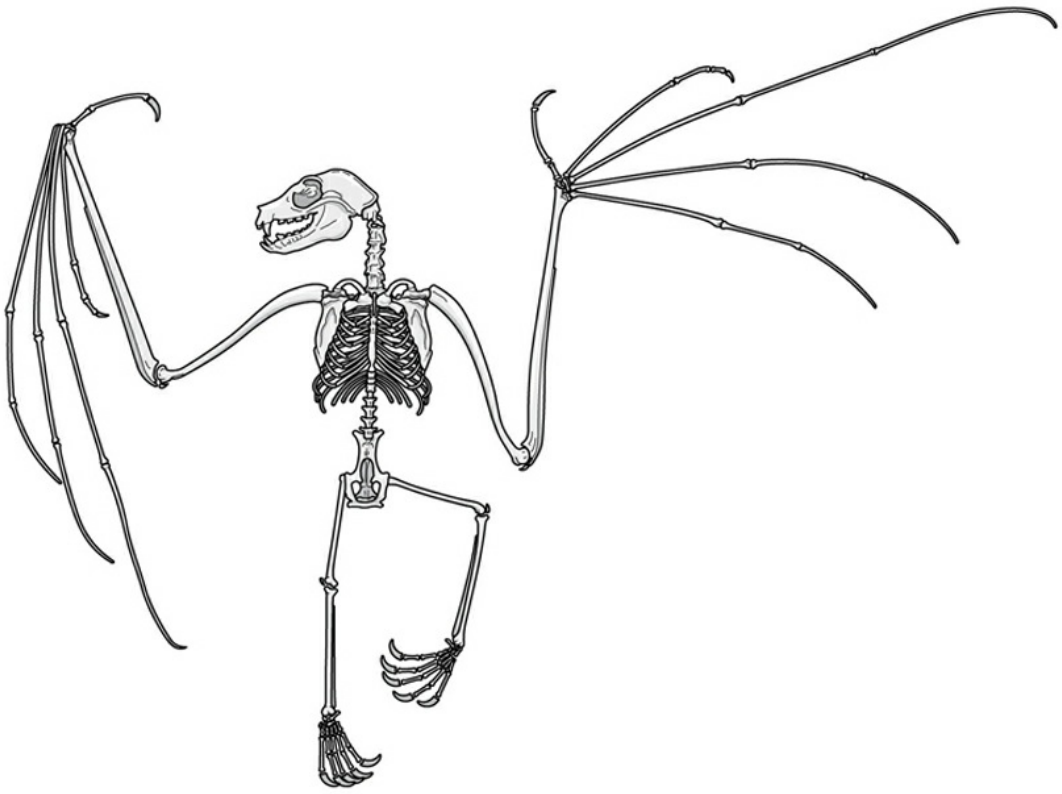
EL ÁRBOL DEL PARENTESCO

HUESO CON HUESO

Qué gran obra es el esqueleto de los mamíferos. No me refiero a que sea bello en sí mismo, aunque creo que lo es. Me refiero al hecho de que podamos hablar sobre «el» esqueleto de los mamíferos: el hecho de que esa cosa interconectada tan compleja varíe tanto entre los mamíferos, en todas sus partes, mientras que al mismo tiempo sea tan *parecida* en todos ellos. Nuestro esqueleto nos es suficientemente familiar como para no necesitar una imagen, pero observe el esqueleto de un murciélago. ¿No es fascinante cómo cada hueso tiene su correspondiente identificable en el esqueleto humano? Identificable por el orden en que se interconectan. Solo las proporciones son diferentes. Las manos del murciélago están agrandadas enormemente (en relación con su tamaño total, por supuesto), pero a nadie se le puede escapar la correspondencia entre nuestros dedos y esos largos huesos de las alas. La mano humana y la mano del murciélago son —nadie en su sano juicio podría negarlo— dos versiones de la misma cosa. El término técnico para este tipo de parecido es «homología». El ala para volar del murciélago y nuestra mano para agarrar son homólogas. Las manos de nuestro antepasado común —y el resto del esqueleto— fueron estiradas o comprimidas, parte por parte, en direcciones diferentes y en cantidades distintas a lo largo de sucesivos linajes de descendientes.

Lo mismo es aplicable —aunque de nuevo en diversas proporciones — al ala de un pterodáctilo (no es un mamífero, pero el principio se mantiene, lo que lo hace aún más impresionante). La membrana del ala de este pterodáctilo está soportada en su mayor parte por un solo dedo, el que llamaríamos dedo meñique. Me confieso culpable de una neurosis con origen en la homología, causada por el hecho de que un meñique pueda

aguantar tanto peso, porque en los humanos parece muy frágil. Es una tontería, por supuesto, porque, en un pterodáctilo, el quinto dedo, lejos de ser «pequeño», es casi tan largo como toda la longitud del cuerpo, y seguramente lo sentiría fuerte y robusto, igual que nosotros sentimos nuestros brazos. Una vez más, esto me sirve para ilustrar el argumento que estoy planteando. El dedo meñique está *modificado* para soportar la membrana del ala. Todos los detalles han cambiado, pero todavía es reconocible el meñique por su relación espacial con los otros huesos del esqueleto. El término equivalente para «meñique» en *pterodactiliano* significa ‘gran punta rubicunda’.

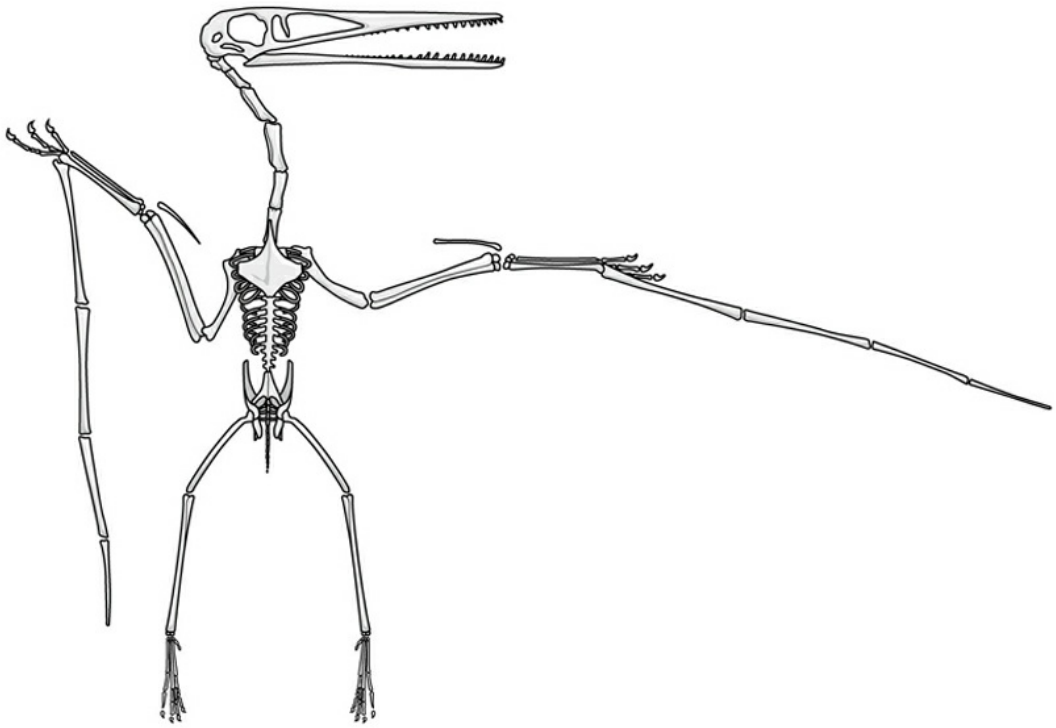


Esqueleto del murciélago

Imagen 57 (Ilusraciones en el texto) Imagen 57 (Créditos Individuales)

Además de los verdaderos voladores —los pájaros, los murciélagos, los pterosaurios y los insectos—, muchos otros animales planean: un hábito que podría darnos pistas sobre los orígenes del vuelo real. Tienen membranas para planear que necesitan el soporte del esqueleto; pero no tienen que descansar en los huesos de los dedos como ocurre con las alas

de los murciélagos y los pterosaurios. Las ardillas voladoras (dos grupos independientes de roedores) y los cuscus (marsupiales australianos que parecen casi exactamente ardillas voladoras pero que no están emparentados con ellas) despliegan una membrana de piel entre sus brazos y sus piernas. No se requieren dedos individuales que soporten mucha carga y estos no están sobredimensionados. Yo, con mi pequeña neurosis del meñique, estaría más tranquilo como ardilla voladora que como pterodáctilo, porque la sensación es *mejor* si utilizas los brazos completos y las piernas para realizar trabajos en los que hay que soportar cargas.

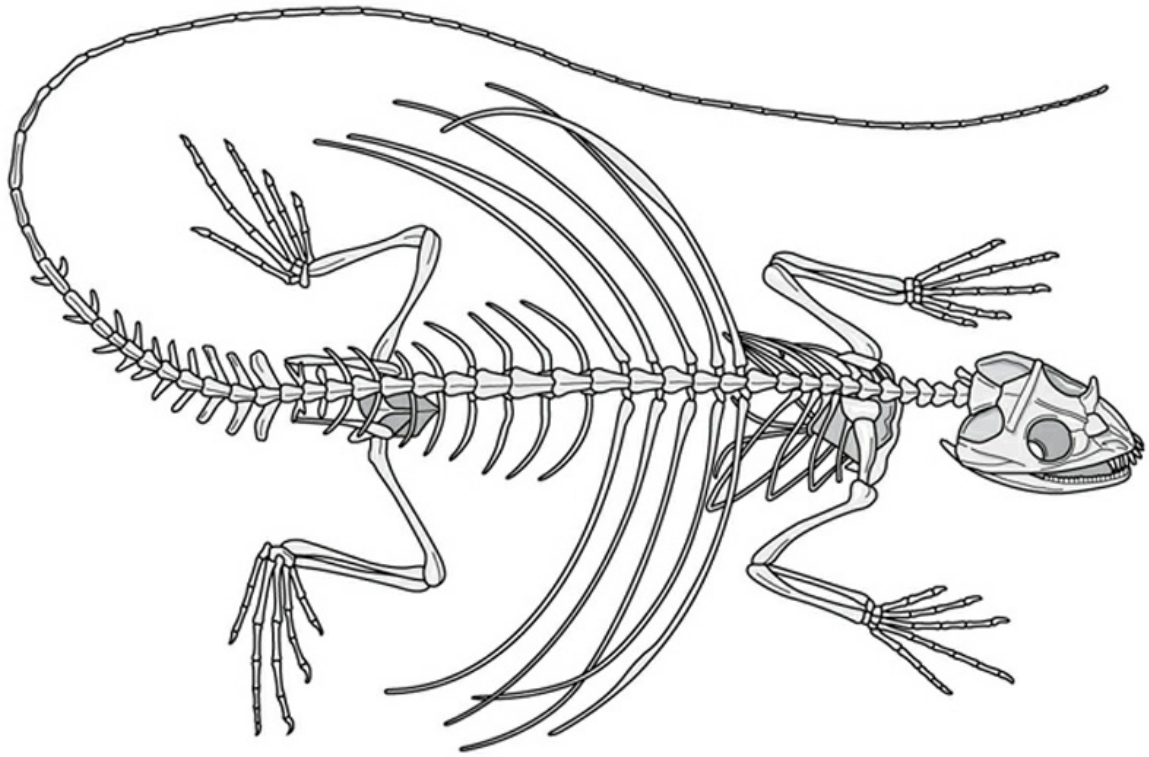


Esqueleto del pterodáctilo

Imagen 58

En la siguiente imagen se muestra el esqueleto del llamado «lagarto volador», otro planeador elegante de los bosques. Se puede apreciar a primera vista que son las costillas, y no los dedos, o los brazos y las piernas, las que se han modificado para soportar las «alas» —las membranas de vuelo—. Una vez más, el parecido del esqueleto en conjunto con los de otros vertebrados es completamente claro. Se podría

analizar cada hueso, uno por uno, identificando en cada caso el hueso preciso correspondiente en el esqueleto humano, del murciélago o del pterosaurio.



Esqueleto del «lagarto volador»

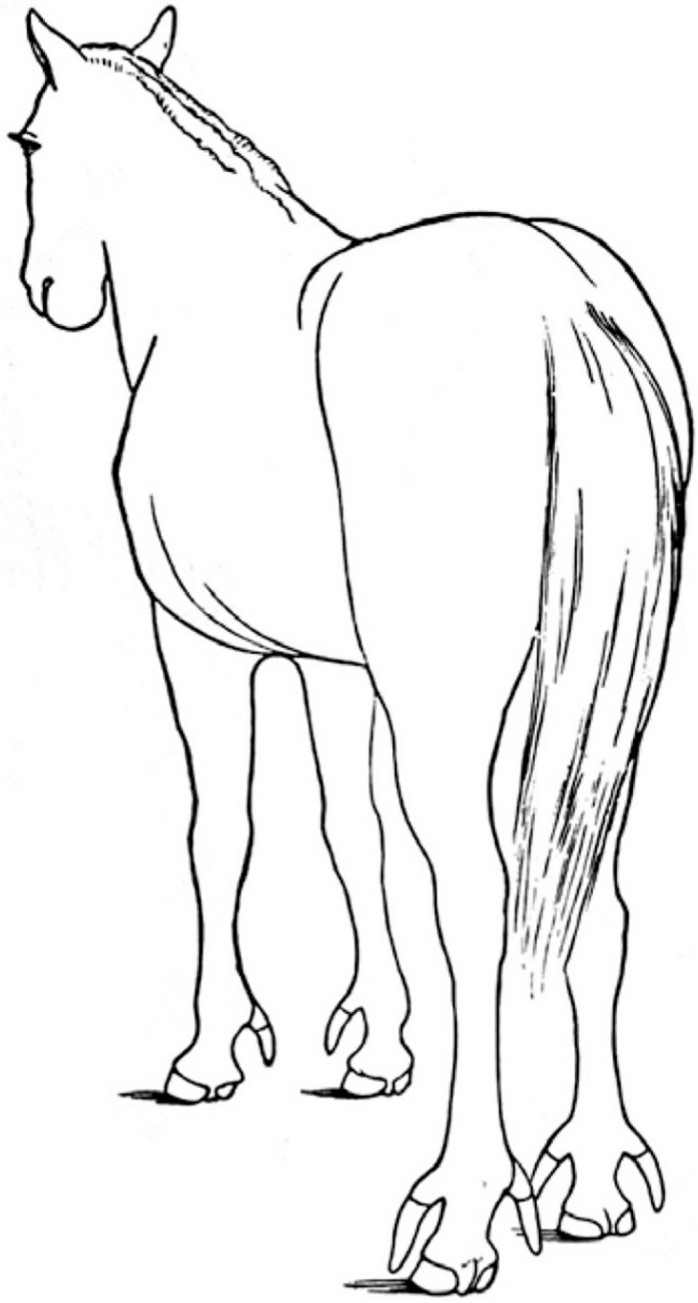
Imagen 59

El colugo, también llamado «lémur volador», de los bosques del sudeste asiático recuerda a las ardillas voladoras y a los cuscus voladores, aunque su cola, así como sus brazos y piernas, está incluida en la estructura de soporte de la membrana que sirve para volar. No me acaba de convencer porque no me puedo imaginar qué se siente teniendo una cola, aunque los humanos, junto con todos los demás monos «sin cola», tenemos una cola residual, el coxis, oculta bajo la piel. Siendo monos casi sin cola, es difícil para nosotros imaginar lo que sería ser un mono araña, cuya cola domina completamente toda su columna vertebral. En la imagen de la página en color 26 se puede apreciar que es mucho más larga que los brazos y las piernas, ya de por sí largos. Como pasa en muchos monos del Nuevo Mundo (de hecho, es bastante general para muchos de los mamíferos del Nuevo Mundo, lo que no deja de ser curioso y difícil de

interpretar), la cola del mono araña es prensil, lo que significa que ha sido modificada para poder agarrar, y casi parece una mano extra, aunque no es homóloga a una mano real y no tiene dedos. De hecho, la cola del mono araña se parece mucho a una mano o a un brazo extra.

Probablemente no es necesario que repita de nuevo el mensaje. El esqueleto base es el mismo que en cualquier otro mamífero, pero modificado para un trabajo diferente. Bueno, la cola en sí no es exactamente igual: la cola del mono araña dispone de vértebras extras, pero dichas vértebras se identifican fácilmente como del mismo tipo que las de cualquier cola, incluido nuestro coxis. ¿Puede imaginarse lo que supondría ser un mono con cinco «manos» prensiles —una en el extremo de cada brazo y pierna, además de una cola— de las que pudiéramos colgarnos con facilidad? Yo no puedo. Pero sé que la cola del mono araña es análoga a mi coxis, igual que el larguísimo hueso del ala de un pterodáctilo es homólogo a mi meñique.

Veamos ahora otro hecho sorprendente. La pezuña de un caballo es homóloga a la uña de nuestro dedo anular (o a la uña del dedo central del pie). Los caballos andan literalmente de puntillas, aunque no como nosotros cuando decimos que andamos de puntillas. Han perdido casi completamente sus otros dedos. En un caballo, los homólogos de nuestros dedos índice y anular, y sus equivalentes en las extremidades traseras, sobreviven como pequeños huesos «entablillados», unidos al hueso metacarpiano, e invisibles por fuera de la piel. El hueso metacarpiano es homólogo a nuestro metacarpiano medio, que está dentro de la mano (o el metatarso, que está en nuestro pie). Todo el peso del caballo —muy considerable en el caso de un Shire o de un Clydesdale— es soportado por los dedos anulares de manos y pies. Las homologías, por ejemplo de nuestros dedos anulares o de los de un murciélago, son completamente claras. Nadie puede dudar de ellas; y para remarcar el asunto, a veces hay caballos que nacen con tres dedos en cada pata, con el dedo central haciendo las veces de «pie» normal y los dos laterales como pezuñas en miniatura.



Caballo polidáctilo

Imagen 60

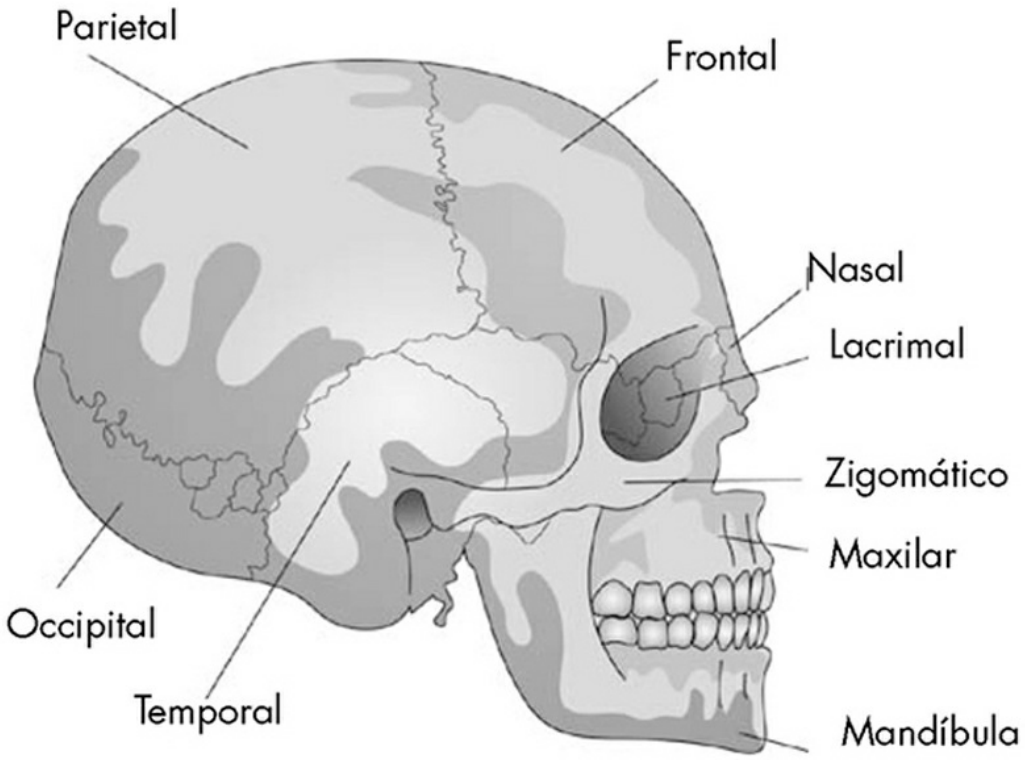
¿Puede ver lo maravillosa que es esta idea de modificación casi indefinida a lo largo de periodos inmensos de tiempo, en la que cada forma modificada mantiene trazas inconfundibles del original? Me encantan los litopternos, unos herbívoros sudamericanos ya extinguidos, sin parentesco cercano con ningún animal moderno y muy diferentes de los caballos —

excepto porque tenían patas y pezuñas casi idénticas—. Los caballos (en América del Norte [59]) y los litopternos (en América del Sur, que en esa época era una isla gigantesca con el istmo de Panamá en el lejano futuro) evolucionaron, cada uno por su lado, desarrollando exactamente la misma reducción de todos los dedos, excepto de los centrales, y pezuñas robustas idénticas al final de los mismos. Probablemente no hay muchas formas en las que un animal herbívoro se pueda convertir en un corredor rápido. Los caballos y los litopternos encontraron la misma solución —reducir todos los dedos excepto el central— y la llevaron a término. Las vacas y los antílopes dieron con una solución distinta: reducir todos los dedos menos dos.

La siguiente afirmación resulta paradójica, pero verá cómo cobra sentido, y también la importancia que tiene como observación. Los esqueletos de todos los mamíferos son idénticos, pero sus huesos son diferentes. La solución a la paradoja reside en mi uso calculado de la palabra «esqueleto» para designar el *ensamblado* de los huesos en una configuración ordenada de unos con otros. Las formas de los huesos no son, según este enfoque, propiedades del «esqueleto». El término «esqueleto», en este sentido especial, ignora las formas de los huesos individuales y solo se preocupa por el orden en el que se unen: «este hueso con este otro» en las palabras de Ezequiel, y más visible aún en la canción basada en ese pasaje:

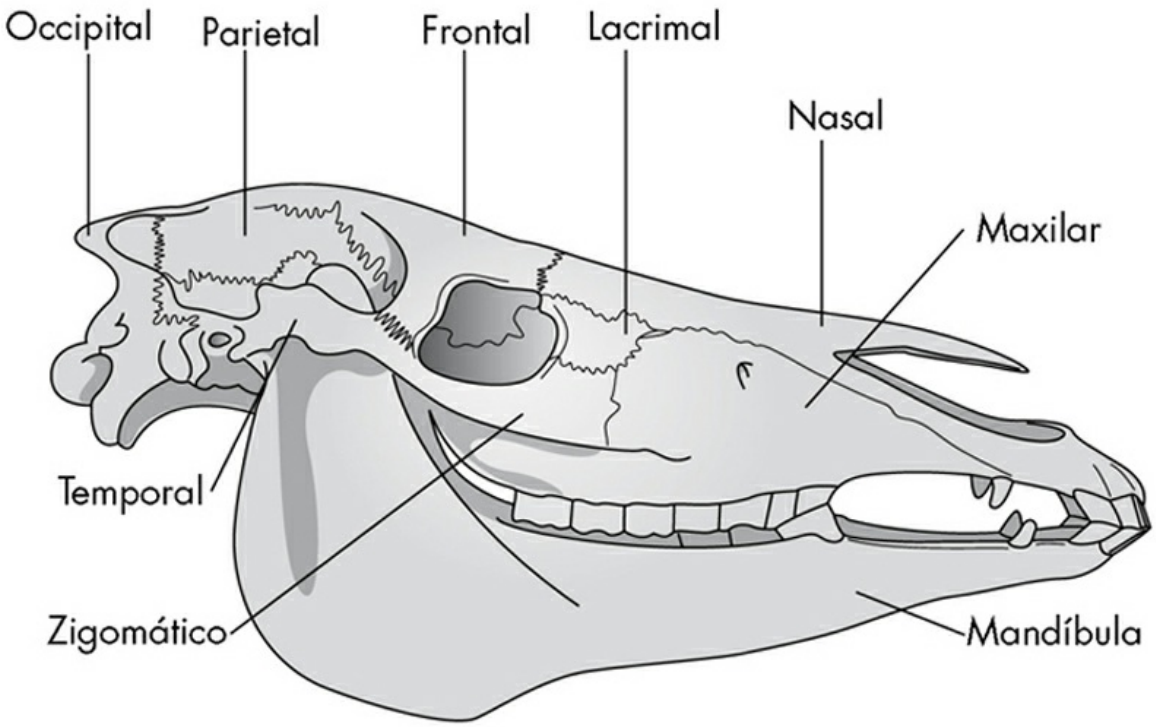
> Tu hueso del dedo conectado a tu hueso del pie,
> Tu hueso del pie conectado a tu hueso del tobillo,
> Tu hueso del tobillo conectado a tu hueso de la pierna,
> Tu hueso de la pierna conectado a tu hueso de la rodilla,
> Tu hueso de la rodilla conectado a tu hueso del muslo,
> Tu hueso del muslo conectado a tu hueso de la cadera,
> Tu hueso de la cadera conectado a tu hueso de la espalda,
> Tu hueso de la espalda conectado a tu hueso del hombro,
> Tu hueso del hombro conectado a tu hueso del cuello,
> Tu hueso del cuello conectado a tu hueso de la cabeza,
> ¡Oigo la palabra del Señor!

Lo interesante es que esta canción se podría aplicar literalmente a cualquier mamífero y, de hecho, a cualquier vertebrado terrestre, y con mucho más detalle de lo que la letra sugiere. Por ejemplo, tu «hueso de la cabeza» o cráneo contiene veintiocho huesos, la mayoría unidos entre sí por «suturas» rígidas, pero con un importante hueso móvil (la mandíbula inferior [60]). Y lo más maravilloso es que, hueso arriba o abajo, el mismo conjunto de veintiocho huesos, que pueden etiquetarse perfectamente con los mismos nombres, se encuentra en todos los mamíferos.



Cráneo humano

Imagen 61

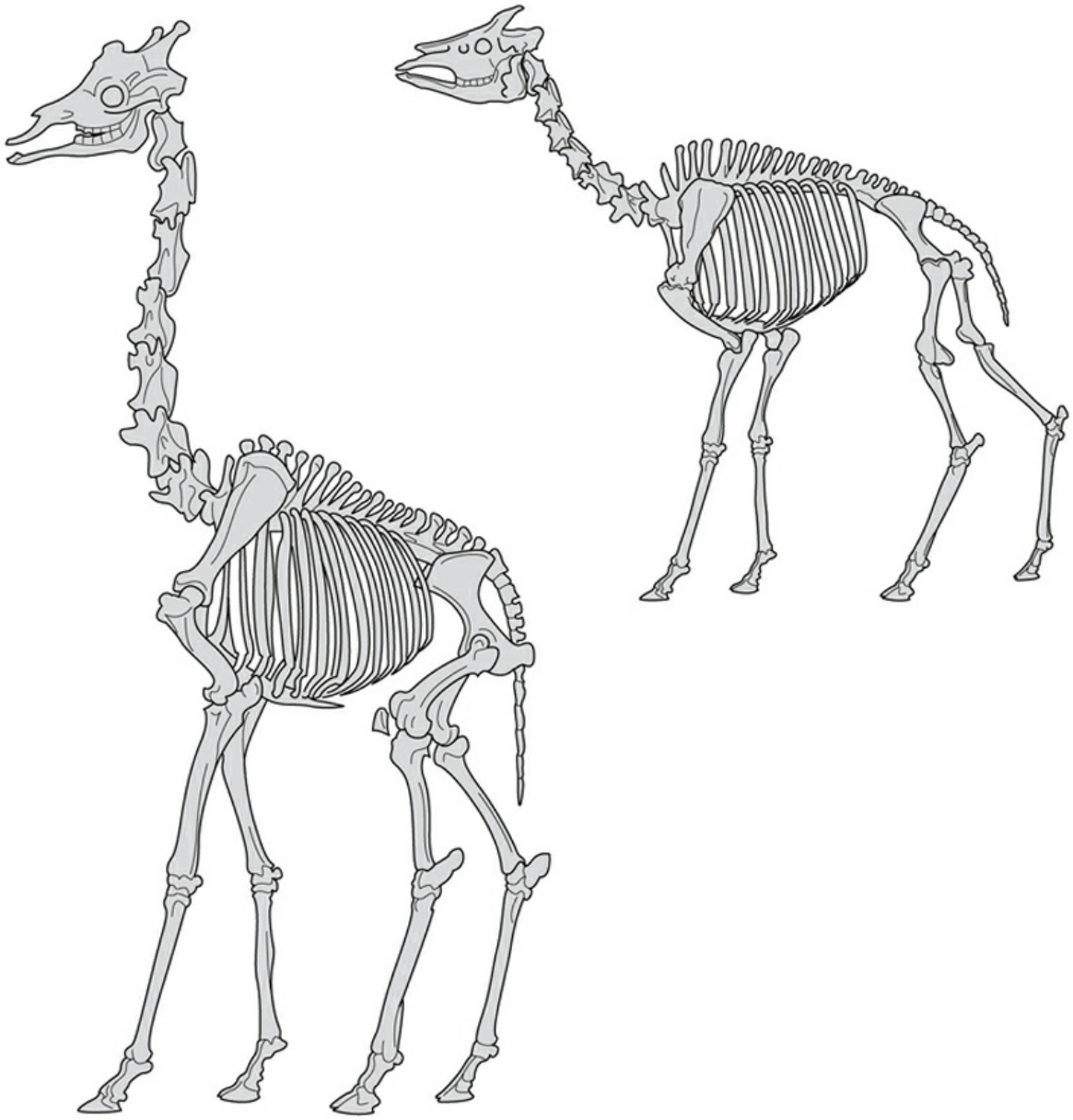


Cráneo de caballo

Imagen 62

Tu hueso del cuello conectado con tu hueso occipital,
Tu occipital conectado con tu hueso parietal,
Tu parietal conectado con tu hueso frontal,
Tu hueso frontal conectado con tu hueso nasal,
[...]
Tu hueso 27 conectado con tu hueso 28...

Todo esto es lo mismo, a pesar del hecho de que las formas de cada hueso son radicalmente diferentes entre los distintos mamíferos.



Jirafa y Okapi

Imagen 63 (Ilusraciones en el texto) Imagen 63 (Créditos Individuales)

¿Qué conclusión podemos sacar de todo ello? Nos hemos limitado aquí a los animales modernos, por lo que no estamos viendo la evolución en acción. Somos detectives que llegan tarde a la escena del crimen y el patrón de similitudes entre los esqueletos de animales modernos es exactamente lo que esperaríamos si todos descendieran de un antepasado común, siendo algunos de ellos más recientes que otros. El esqueleto ancestral se ha ido modificando gradualmente a lo largo del tiempo.

Algunas parejas de animales, por ejemplo, las jirafas y los okapis, comparten un antepasado común. No es estrictamente correcto describir a una jirafa como un okapi que se ha estirado verticalmente, ya que ambos son animales modernos. Aunque sería una buena suposición (apoyada por la evidencia fósil, como de hecho ocurre, pero no estamos hablando de fósiles en este capítulo) afirmar que el antepasado común probablemente se parecía más a un okapi que a una jirafa. De forma similar, los impalas y los ñus [61] son parientes cercanos entre sí, y ligeramente más lejanos de las jirafas y los okapis. Los cuatro son parientes más lejanos todavía de otros animales de pezuña hendida, como los cerdos y los facóqueros (que son parientes entre sí y parientes a su vez de los pecaríes). Todos los animales de pezuña hendida son parientes más lejanos de los caballos y las cebras (que no tienen pezuñas hendidas y son parientes cercanos entre sí). Podemos ir tan lejos como queramos, agrupando parejas de parientes en grupos, y agrupando grupos de parientes y (grupos de (grupos de (grupos de parientes))). Me he permitido utilizar paréntesis automáticamente y todo el mundo sabe lo que significan. El significado de los paréntesis en lo que sigue es evidente, porque ya sabemos todo sobre los primos que comparten abuelos y los primos segundos que comparten bisabuelos, y así sucesivamente.

{(lobo/zorro)(león/leopardo)}{(jirafa/okapi)(impala/ñu)}

Todo apunta a un simple árbol de antepasados: un árbol genealógico.

He supuesto que el árbol de similitudes es realmente un árbol genealógico, pero cabe preguntarnos: ¿estamos obligados a llegar a esta conclusión? ¿Hay interpretaciones alternativas? ¡Bueno, lo cierto es que casi ninguna! El patrón jerárquico de similitudes fue descubierto por los creacionistas en la época predarwiniana, y propusieron una explicación no evolutiva —una realmente exagerada—. Los patrones de similitud, desde su punto de vista, reflejaban *temas* en la mente del diseñador. Él había tenido varias ideas sobre cómo crear animales. Sus pensamientos discurrían sobre un tema de mamíferos e, independientemente, sobre otro de insectos. Dentro del tema de mamíferos, las ideas del diseñador se dividían jerárquicamente en subtemas (por ejemplo, el de las pezuñas hendidas) y subsubtemas (por ejemplo, el de los cerdos). Hay un componente importante de súplica y de esperanza en este argumento, y

hoy día los creacionistas casi no recurren a ello. De hecho, como sucede con la evidencia de la distribución geográfica, que comentamos en el último capítulo, ellos raramente discuten la evidencia comparativa, y prefieren mantenerse en la evidencia de los fósiles, que, según les han enseñado a creer (sin duda de manera errónea), constituyen para ellos la tierra prometida.

AQUÍ NO SE PRESTA

Para recalcar cómo de extraña es la idea de un creador que se atiene rígidamente a «temas», piense que cualquier diseñador humano estaría contento de tomar prestada una idea de una de sus invenciones, si esto beneficiara a otra. Quizá hay un «tema» de diseño de aeronaves que está separado del «tema» del diseño de trenes. Pero un componente de un avión, por ejemplo, un diseño mejorado para las luces de lectura sobre los asientos, podría ser utilizado en los trenes. ¿Por qué no hacerlo si sirve para el mismo propósito en ambos? Cuando se inventaron los automóviles, el nombre «carruaje sin caballos» nos indica de dónde vino parte de su inspiración. Pero los vehículos tirados por caballos no necesitan volante —se utilizan riendas para guiar a los caballos—, por lo que el volante debe de tener otro origen. No sé de dónde vino, pero sospecho que se tomó prestado de una tecnología completamente diferente, la de los barcos. Antes de ser reemplazado por el volante, que fue introducido hacia finales del siglo XIX, el mecanismo original para guiar un coche era el timón, también un préstamo de los barcos, pero desplazado de la parte trasera del vehículo a la delantera.

Si las plumas son una buena idea dentro del «tema» pájaros, de tal forma que cada pájaro, sin excepción, las tiene, independientemente de que vuele o no, ¿por qué ningún mamífero las tiene? ¿Por qué el diseñador no tomó prestada esa ingeniosa invención, la pluma, al menos para los murciélagos? La respuesta evolucionista es clara. Todos los pájaros heredaron sus plumas de un antepasado común, que tenía plumas. Ningún mamífero desciende de ese antepasado. Es tan simple como eso [62]. El

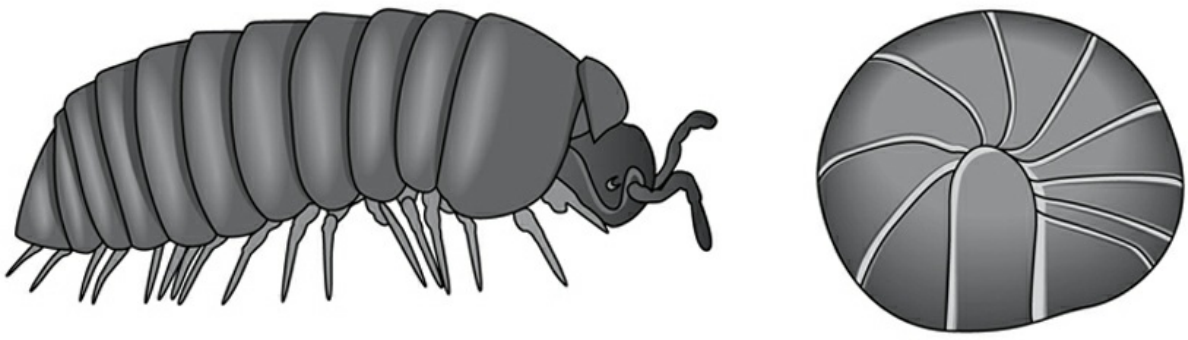
árbol de similitudes es un árbol genealógico. Es el mismo tipo de historia para cada rama y para cada subrama y para cada subsubrama del árbol genealógico.

Ahora llegamos a un punto interesante. Hay muchos ejemplos en los que superficialmente parece que las ideas se han tomado «prestadas» de una parte del árbol e injertadas en otra, como una variedad de manzana injertada en un árbol estándar. Un delfín, que es una ballena pequeña, se parece superficialmente a varios tipos de peces grandes. Uno de estos peces, el dorado *(Coryphoena hippuris)*, es llamado a veces «delfín». Los dorados y los delfines verdaderos tienen la misma forma alargada, adaptada a sus hábitos de vida similares como cazadores rápidos cerca de la superficie del mar. Pero su técnica para nadar, aunque en apariencia es similar, no la tomó uno prestada del otro, como se puede observar fácilmente si nos fijamos en los detalles. Aunque ambos obtienen su velocidad principalmente de la cola, el dorado, como todos los peces, mueve la cola de lado a lado. Pero al delfín verdadero lo delata su historia de mamífero, y mueve la cola de arriba abajo. El movimiento ondulatorio ancestral del pez, de lado a lado a lo largo de la columna vertebral, ha sido heredado por los lagartos y las serpientes, que casi se puede decir que «nadan» sobre la tierra. Comparemos eso con el galope de un caballo o la carrera de un leopardo. La velocidad viene de doblar la columna, como ocurre con los peces y las serpientes; pero en los mamíferos la columna se dobla de arriba abajo, no lateralmente. Quizá hay un estadio intermedio en el que apenas se dobla la espina dorsal en ninguna dirección, como en la rana. Por otro lado, los cocodrilos son capaces de «galopar» (aterradoramente deprisa), así como de utilizar la forma de andar de los lagartos, más convencional entre los reptiles. Los antepasados de los mamíferos no se parecían en nada a los cocodrilos, pero quizá los cocodrilos nos están mostrando cómo un antepasado intermedio podría haber combinado ambas formas de caminar.

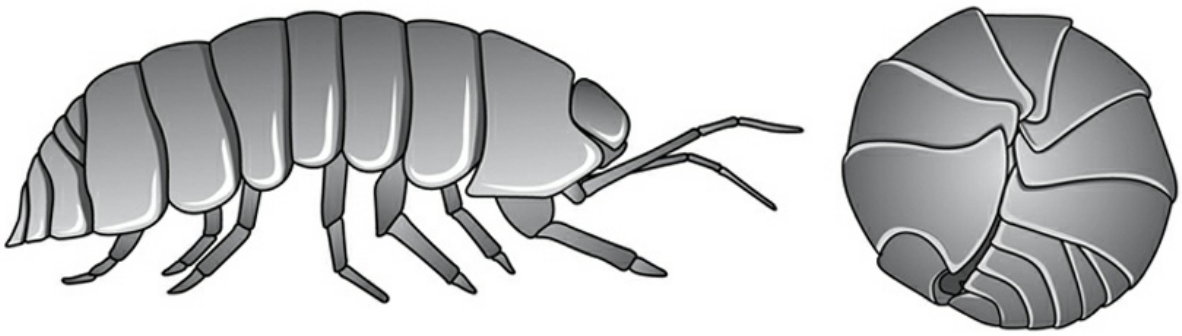
En cualquier caso, los antepasados de las ballenas y de los delfines eran, sin discusión, mamíferos terrestres que, seguramente, «galopaban» por las praderas, los desiertos o las tundras con una flexión ascendente-descendente de la columna vertebral. Y cuando volvieron al mar mantuvieron su movimiento ancestral de la columna. Si las serpientes «nadan» sobre la tierra, ¡los delfines «galopan» por el mar! De la misma forma, la cola de un delfín puede parecerse a primera vista a la cola

dividida de un dorado, pero está situada horizontalmente, mientras que las aletas de la cola del dorado están alineadas con el plano vertical. Hay muchos otros aspectos que nos hacen pensar que la historia del delfín está escrita en su cuerpo, y volveré a ellos en el capítulo que se titula así.

En otros casos, el parecido superficial es tan grande que resulta bastante difícil rechazar la hipótesis del «préstamo», pero una inspección más cercana muestra que debemos hacerlo. Los animales pueden resultar tan similares que parezca que están emparentados. Pero las similitudes, aunque impresionantes, se ven ampliamente superadas por las diferencias cuando se observa todo el cuerpo. Las cochinillas son pequeñas criaturas comunes con muchas patas, que habitualmente se enrollan formando una pelota protectora, como los armadillos. De hecho, este puede ser el origen del nombre latino, *Armadillidium.* Ese es el nombre de un tipo de cochinilla, que es un crustáceo emparentado con las gambas pero que vive en tierra —donde le delata su historia acuática reciente, pues respira por branquias que deben mantenerse húmedas—. Pero el tema central de esta historia es que hay un tipo completamente diferente de cochinilla que no es un crustáceo, sino un miriápodo. Cuando se las ve enrolladas, se puede pensar que son casi idénticas, pero una es un crustáceo modificado, mientras que la otra es un miriápodo modificado (en la misma dirección). Si los desenrollamos y los observamos con atención, inmediatamente veremos, al menos, una diferencia importante. El miriápodo tiene dos pares de patas en cada segmento, mientras que la cochinilla solo tiene uno. ¿No es maravillosa esta modificación sin fin? Un examen más detallado revelará que, en cientos de aspectos, la cochinilla-miriápodo se parece más a un miriápodo convencional. El parecido con una cochinilla es superficial —convergente—.



Cochinilla miriápodo



Cochinilla crustáceo

Imagen 64

Casi cualquier zoólogo que no sea especialista diría que el cráneo de la siguiente imagen pertenece a un perro. El especialista descubrirá que no es realmente el cráneo de un perro al observar los dos agujeros prominentes en el paladar. Son signos que hablan de los marsupiales, el gran grupo de mamíferos que se encuentra actualmente en Australia. Es, de hecho, el cráneo de un *Thylacinus*, el «tigre de Tasmania». Los tilacinos y los verdaderos perros (como los dingos, con los que compitieron en Australia y Tasmania) han convergido en su cráneo porque tienen (tenían, lamentablemente, en el caso del desafortunado tilacino) un estilo de vida similar.

Cráneo de tilacino, «tigre de Tasmania» o «lobo marsupial»

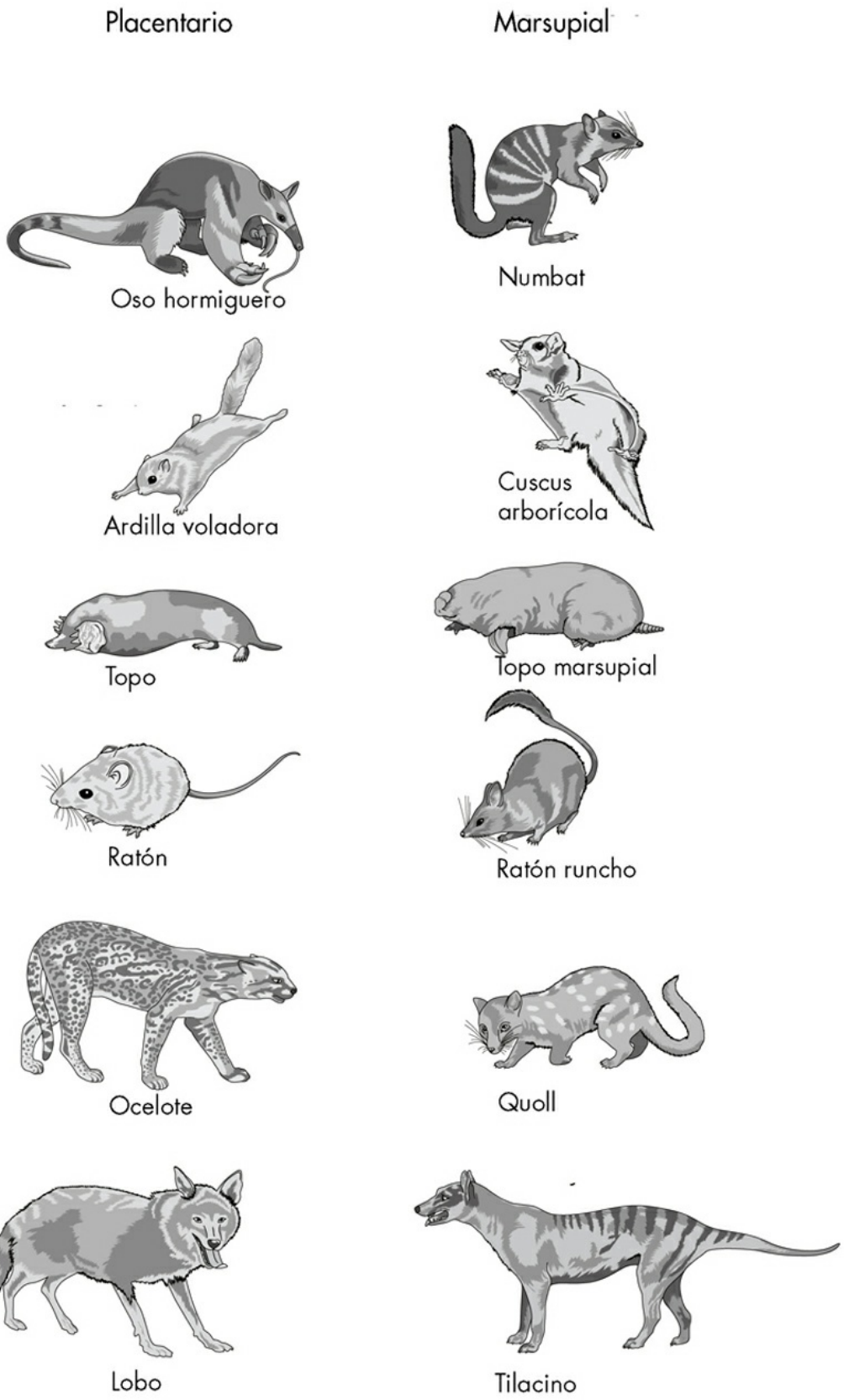
Imagen 65

En el capítulo sobre la distribución geográfica de animales ya mencioné la magnífica fauna de mamíferos marsupiales de Australia. El tema relevante en este momento es la convergencia repetida entre estos marsupiales y una gran variedad de homólogos entre los mamíferos «placentarios» (es decir, no marsupiales) que dominan el resto del mundo. Aunque distan mucho de ser idénticos, incluso en características superficiales, cada marsupial de la ilustración de la página siguiente es lo suficientemente similar a su equivalente placentario —es decir, al placentario que más se parece en su actividad— como para impresionarnos, pero ciertamente no lo suficiente como para sugerir que un creador «ha tomado prestado algo».

La mezcla de los genes en un acervo genético podría ser vista como una forma de prestar o compartir «ideas» genéticas, pero la recombinación sexual está confinada dentro de una especie, y es por tanto irrelevante en este capítulo, que trata sobre comparaciones entre especies: por ejemplo, comparaciones entre mamíferos marsupiales y placentarios. Es interesante que entre las bacterias sea común el préstamo de ADN. En un proceso que a veces se ve como un tipo precursor de reproducción sexual, las bacterias —incluso cepas con un parentesco muy lejano— intercambian «ideas» de ADN con una facilidad desenfrenada. «Compartir ideas» es una de las formas principales por las que las bacterias descubren «trucos» útiles, como la resistencia a antibióticos específicos.

A menudo nos referimos a este fenómeno con el nombre poco indicativo de «transformación». La razón es que cuando fue descubierto en 1928, por Frederick Griffith, nadie comprendía el ADN. Lo que Griffith descubrió fue que una cepa no virulenta de *Streptococcus* podía volverse virulenta a partir de una cepa completamente diferente, aun cuando la cepa virulenta estuviera muerta. Actualmente diríamos que la cepa no virulenta incorpora en su genoma algo del ADN de la cepa virulenta (al ADN no le importa estar «muerto», es solo información codificada). En el lenguaje de este capítulo, la cepa no virulenta toma «prestada» una «idea» genética de una cepa virulenta. Por supuesto, el caso de las bacterias que toman prestados genes de otras bacterias es muy diferente a que un diseñador tome prestadas sus propias ideas de un «tema» y las reutilice en otro tema. Sin embargo, es interesante porque, si fuera tan común en animales como

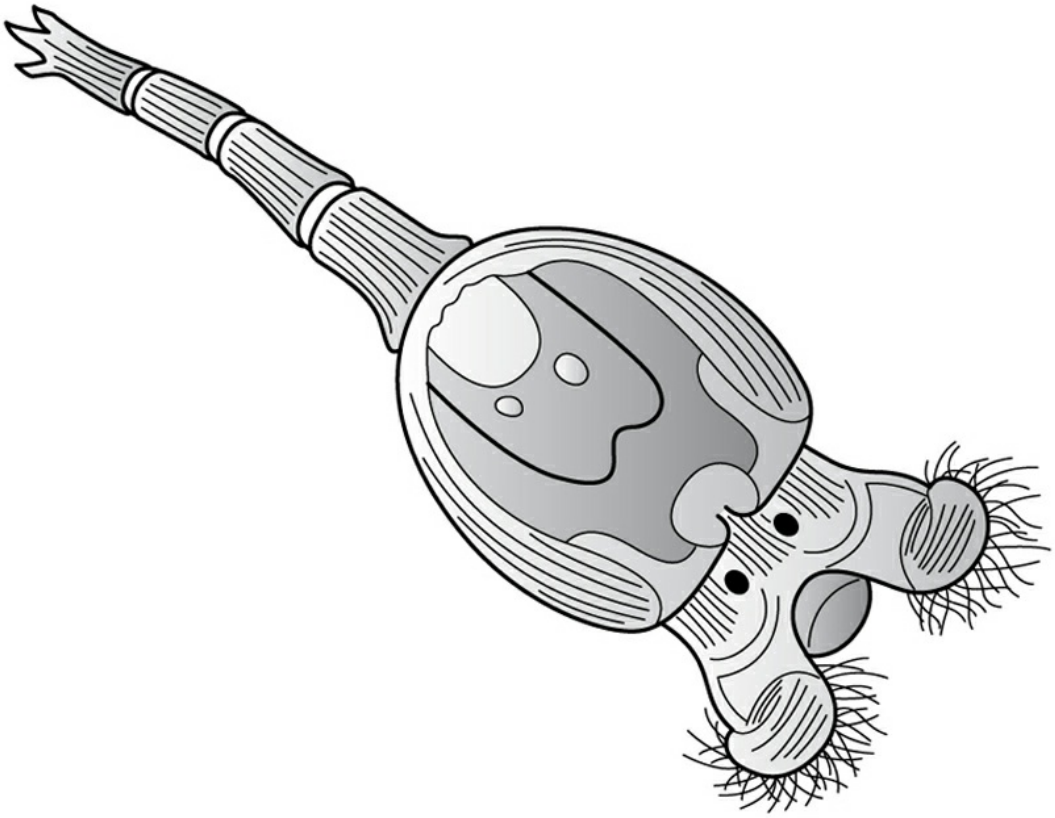
lo es en las bacterias, sería más difícil refutar la hipótesis del «diseñador que toma prestadas» ideas. ¿Qué pasaría si los murciélagos y los pájaros se comportasen como las bacterias en este sentido? ¿Qué pasaría si fragmentos del genoma de los pájaros pudieran ser transportados, quizá a través de una infección vírica o bacteriana, e implantados en el genoma de un murciélago? Quizá sería posible que una única especie de murciélago desarrollara de forma repentina alas, al tomar prestada la información del ADN en una versión genética del «copia y pega» de los ordenadores.



Homólogos placentarios y marsupiales

Imagen 66

En los animales, a diferencia de las bacterias, la transferencia de genes está casi completamente confinada al intercambio sexual dentro de las especies. De hecho, las especies pueden ser definidas muy bien como conjuntos de animales que son capaces de intercambiar genes entre ellos. Una vez que dos poblaciones de especies se han separado durante un tiempo suficiente como para no poder intercambiar genes sexualmente (en general después de un periodo inicial de separación geográfica forzada, como vimos en el capítulo 9), entonces los definimos como especies separadas, y nunca vuelven a intercambiar genes, a no ser por la intervención de los ingenieros genéticos humanos. Mi colega Jonathan Hodgkin, catedrático de Genética en Oxford, conoce solo tres supuestas excepciones a la regla de que la transferencia de genes está confinada a las especies: en gusanos nematodos, en moscas de la fruta y (a mayor escala) en los rotíferos bdeloideos. Este último grupo es especialmente interesante porque, a diferencia de los grandes grupos de eucariotas, sus miembros no tienen sexo. ¿Pudiera ser que hubieran sido capaces de salir adelante sin sexo por haber vuelto a una forma bacteriana ancestral de intercambio de genes? La transferencia de genes entre especies parece ser más común en las plantas. La planta parásita cuscuta dona genes a las plantas anfitrionas a las que se entrelaza [63].



Rotífero bdeloideo

Imagen 67 (Ilusraciones en el texto) Imagen 67 (Créditos Individuales)

No tengo una opinión clara sobre la política de los alimentos genéticamente modificados, y dudo entre sus beneficios potenciales sobre la agricultura, por un lado, y el instinto de precaución, por otro. Pero merece la pena detenerse en un argumento que no he oído antes. Hoy día maldecimos la forma en que nuestros predecesores introdujeron especies de animales en tierras extrañas solo para divertirse. La ardilla gris americana fue introducida en Gran Bretaña por un antiguo duque de Bedford: un acto frívolo que ahora vemos como desastroso e irresponsable. Es interesante preguntarse si los taxonomistas del futuro lamentarán la forma en que nuestra generación ha jugado con los genomas: transportando, por ejemplo, genes «anticongelantes» de peces del Antártico a tomates para protegerlos de las heladas. Los científicos han tomado prestado el gen que da a la medusa un brillo fluorescente para insertarlo en el genoma de patatas, con la esperanza de hacerlas brillar cuando necesiten riego. He leído sobre un «artista» que proyecta realizar

una «instalación» consistente en perros luminosos, brillando con la ayuda de genes de medusa. Ese desenfreno de la ciencia en nombre de un pretendido «arte» ofende mi sensibilidad. ¿Pero podría ir más lejos el daño? ¿Podrían estos caprichos frívolos menoscabar la validez de estudios futuros sobre las relaciones evolutivas? Lo dudo, aunque quizá merezca la pena llamar la atención sobre la cuestión, con un espíritu de precaución. La razón del principio de precaución es, en definitiva, evitar repercusiones futuras de opciones y acciones que hoy no son peligrosas de una forma evidente.

Crustáceos

Comencé el capítulo con el esqueleto de los vertebrados, que es un maravilloso ejemplo de un patrón invariable en el que se unen detalles que sí varían. Casi cualquier otro grupo importante de animales muestra el mismo tipo de estructura. Cogeré otro de mis ejemplos favoritos: los crustáceos decápodos, grupo que incluye a las langostas, las gambas, los cangrejos y los cangrejos ermitaños (que no son cangrejos, dicho sea de paso). La estructura corporal de todos los crustáceos es la misma. Mientras que nuestro esqueleto vertebrado está formado por huesos duros dentro de un cuerpo blando, los crustáceos tienen un *exoesqueleto* que consiste en tubos duros, dentro de los cuales el animal guarda y protege sus partes blandas. Los tubos duros están unidos y articulados de forma parecida a nuestros huesos. Piense, por ejemplo, en las delicadas articulaciones de las patas de un cangrejo o de una langosta, y en la articulación más robusta de la mandíbula. Los músculos responsables del pellizco que puede llegar a asestar una gran langosta están dentro de los tubos que forman la pinza. Los músculos equivalentes en los humanos cuando pellizcamos algo están unidos a los huesos situados entre el dedo anular y el pulgar.

Al igual que los vertebrados, pero a diferencia de los erizos de mar, los crustáceos tienen simetría lateral, con una serie de segmentos recorriendo la longitud del cuerpo desde la cabeza hasta la cola. Los segmentos son iguales entre sí en su plano básico, pero a menudo difieren en el detalle. Cada segmento está formado por un tubo corto unido, bien rígidamente o mediante una articulación, a los dos segmentos vecinos.

Como en los vertebrados, los órganos y los sistemas de órganos de un crustáceo muestran un patrón repetitivo al desplazarnos desde la parte frontal hacia atrás. Por ejemplo, el cordón nervioso principal, que recorre la longitud del cuerpo por el lado ventral (y no el dorsal, como en el caso de la columna vertebral), tiene un par de ganglios (algo así como minicerebros [64]) en cada segmento, a partir de los cuales salen nervios que se extienden por ese segmento. La mayoría de los segmentos tienen una extremidad a cada lado que consiste en una serie de tubos unidos por articulaciones. Las extremidades de los crustáceos terminan normalmente en una bifurcación de dos ramas, que en muchos casos podríamos llamar «pinza». La cabeza también está segmentada, aunque, como ocurre con la de los vertebrados, el patrón de segmentación es menos distinguible que en el resto del cuerpo. Hay cinco pares de extremidades ocultas en la cabeza, aunque podría sonar un poco extraño llamarlas de esta forma, ya que se han modificado para convertirse en antenas o componentes del mecanismo de la mandíbula. Por eso se les llama normalmente «apéndices» en lugar de «extremidades». De forma más o menos invariable, los cinco apéndices de segmentación de la cabeza, empezando por el frente, son las primeras antenas (anténulas), las segundas antenas, las mandíbulas, los primeros maxilares (o maxílulas) y los segundos maxilares. Las anténulas y las antenas se emplean principalmente para percibir cosas. Las mandíbulas de los maxilares están relacionadas con la masticación, trituración y otras formas de procesar la comida. A medida que recorremos el cuerpo hacia la cola, los apéndices segmentales o extremidades son bastante variables, y los centrales a menudo consisten en patas para andar, mientras que los que nacen de los segmentos posteriores están destinados a otras funciones, como nadar.

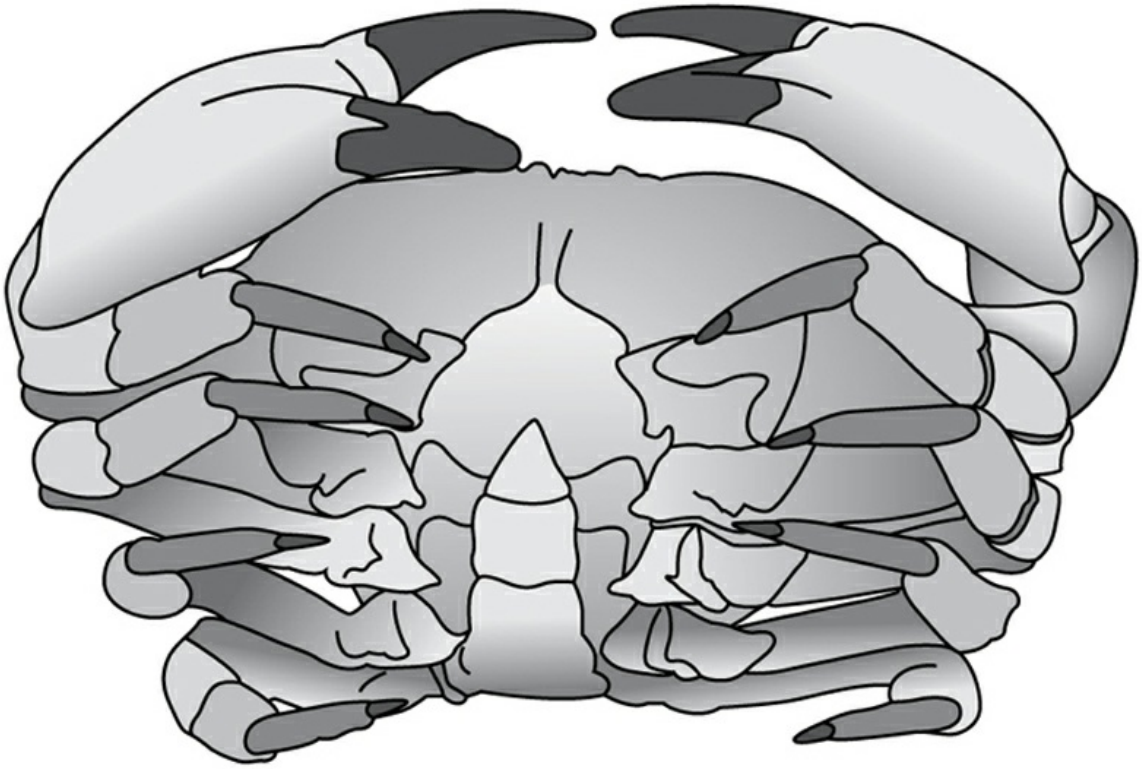
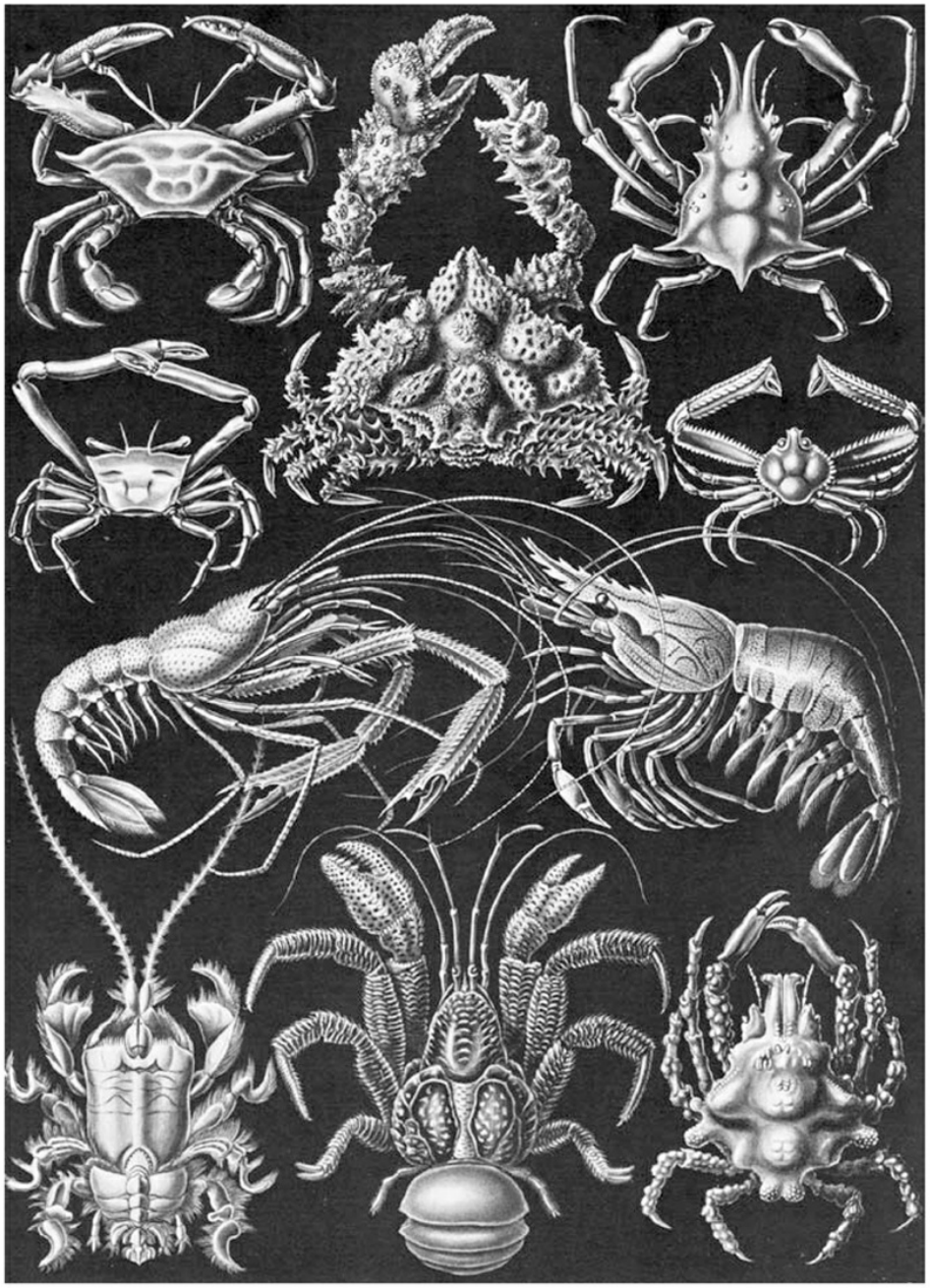


Imagen 68

Cangrejo macho mostrando el estrecho abdomen plegado hacia atrás

En una langosta o en una gamba, después de los habituales cinco apéndices segmentales de la cabeza, los primeros apéndices segmentales del cuerpo son las pinzas. Los siguientes cuatro pares son las patas para caminar. Los segmentos que sostienen a las pinzas y a las patas están unidos formando el tórax. El resto del cuerpo se llama abdomen. Sus segmentos, al menos hasta que se alcanza la punta de la cola, son los «pleópodos», apéndices parecidos a plumas que ayudan para nadar, lo que es muy importante en algunas graciosas y delicadas gambas. En los cangrejos, la cabeza y el tórax se han unido en una única pieza más grande, donde se localizan los diez pares de extremidades. El abdomen está doblado y oculto debajo de la cabeza/tórax, por lo que no es visible desde arriba. No obstante, se le puede dar la vuelta para ver fácilmente el patrón segmentado del abdomen. La imagen muestra el típico abdomen estrecho de un cangrejo macho. El abdomen de la hembra es más ancho y recuerda a un delantal, que es como de hecho se llama. Los cangrejos ermitaños son

atípicos en el sentido de que su abdomen es asimétrico (para encajar en la concha vacía del molusco que constituye su casa), blando y sin protección (porque la concha del molusco le proporciona ya esa protección).



Crustáceos de Haeckel. Ernst Haeckel fue un distinguido zoólogo alemán y un excelente ilustrador

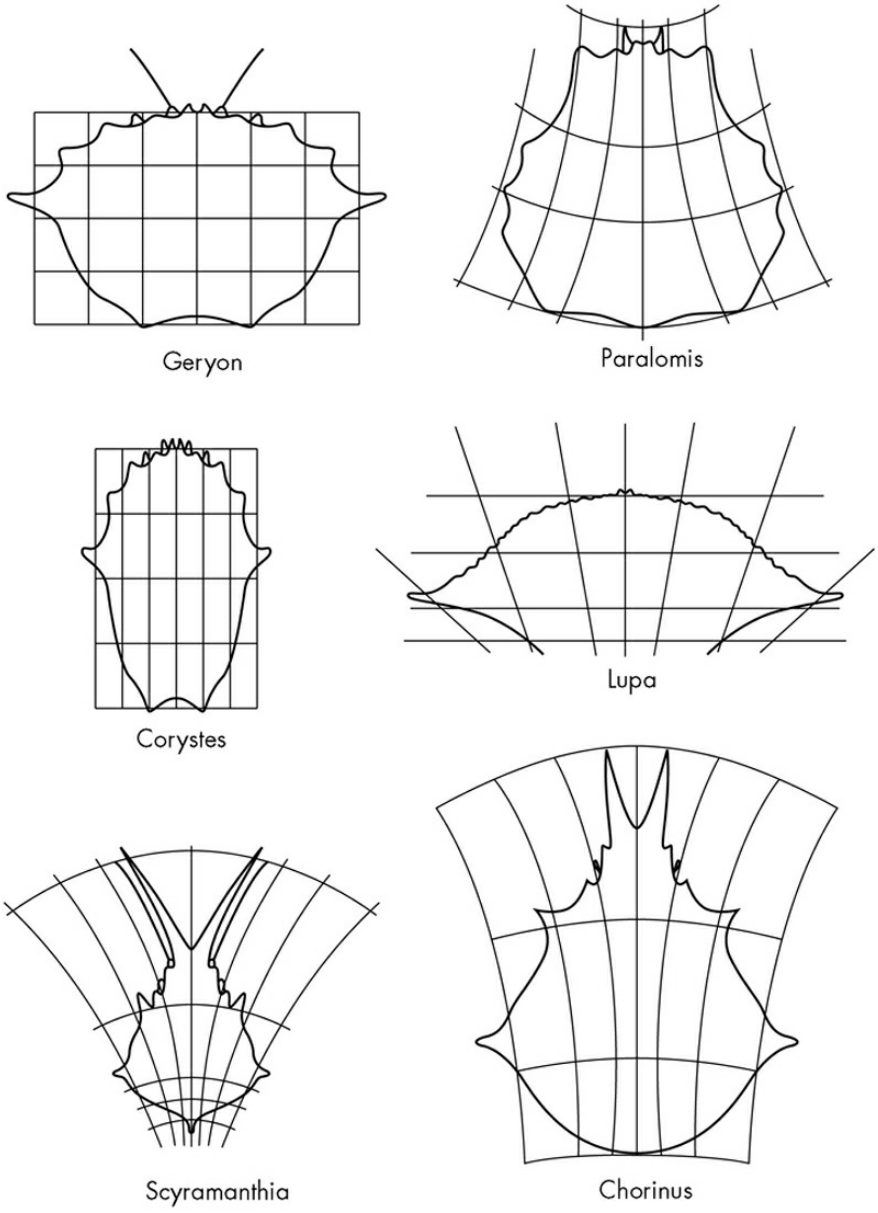
Imagen 69

Para hacerse una idea de algunas de las formas maravillosas en que el cuerpo de los crustáceos está modificado en los detalles, mientras que la estructura del cuerpo no varía en absoluto, fíjese en el conjunto de dibujos de la siguiente imagen, realizados por el famoso zoólogo del siglo XIX Ernst Haeckel, quizá el más fiel discípulo de Darwin en Alemania (la devoción no fue correspondida, pero incluso Darwin habría admirado el talento de dibujante de Haeckel). Igual que hicimos con el esqueleto de los vertebrados, observemos cada parte del cuerpo de estos cangrejos de mar y de río y veamos cómo, sin lugar a error, podemos encontrar su correspondiente en todos los demás. Cada trocito del exoesqueleto está unido a los «mismos» trocitos, pero las formas de los trocitos son diferentes. Y una vez más la interpretación obvia —yo diría que la única razonable— es que todos estos crustáceos han heredado la estructura de su esqueleto de un antepasado común. Han moldeado los componentes individuales dándoles una gran variedad de formas. Pero el plano general se mantiene exactamente como fue heredado de su antepasado.

¿Qué habría hecho D'Arcy Thompson con un ordenador?

En 1917, el gran zoólogo escocés D'Arcy Thompson escribió un libro llamado *Sobre el crecimiento y la forma,* y en su último capítulo introdujo su famoso «método de las transformaciones» [65]. Podía dibujar un animal sobre papel cuadriculado y luego distorsionar el papel siguiendo fórmulas matemáticas, para mostrar que la forma del animal original se había convertido en otro animal parecido. Podemos imaginar el papel cuadriculado original, sobre el que dibujaba el primer animal, como un trozo de goma. Después, el papel cuadriculado sería el equivalente al mismo trozo de goma, pero estirado o deformado de modo matemáticamente definido. Por ejemplo, él tomó seis especies de cangrejos y dibujó una de ellas, *Geryon,* sobre papel cuadriculado ordinario (el trozo de goma sin deformar). Luego deformó su «hoja de goma» matemática de cinco formas diferentes para conseguir una representación aproximada de las otras cinco especies de cangrejo. Los detalles matemáticos no son importantes, aunque sí fascinantes. Lo que se puede ver claramente es que no lleva mucho tiempo transformar un

cangrejo en otro. El mismo D'Arcy Thompson no estaba muy interesado en la evolución, pero es fácil imaginar qué tendrían que haber hecho las mutaciones genéticas para dar lugar a cambios como esos. Eso no significa que debamos pensar que *Geryon*, o cualquiera de estos seis cangrejos, sea antepasado de los otros. Ninguno de ellos lo era y en cualquier caso eso no es importante ahora. El asunto es que, independientemente del aspecto que tuviera el cangrejo ancestral, los cambios de este *tipo* podrían transformar cualquiera de las seis especies (o un antepasado putativo) en cualquier otra.



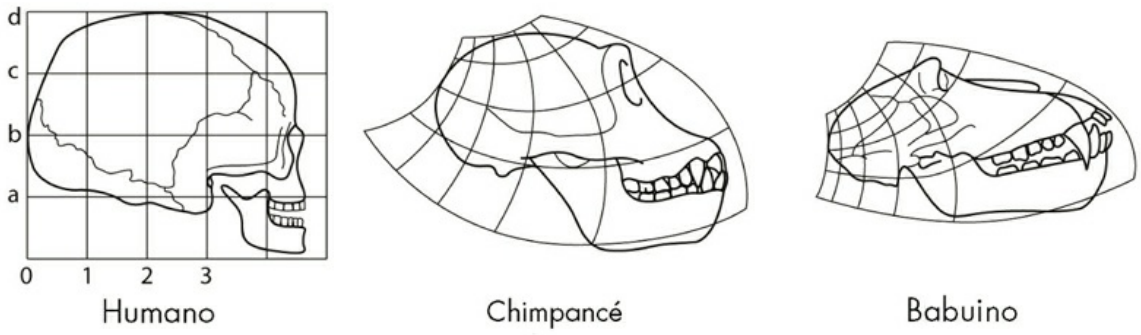
«Transformaciones» del cangrejo, de D'Arcy Thompson

Imagen 70

La evolución nunca ocurrió tomando una forma adulta y consiguiendo que se transformara en otra. Recuerde que cada adulto crece a partir de un embrión. Las mutaciones seleccionadas habrían trabajado en el embrión en desarrollo, cambiando el ritmo de crecimiento de unas partes del cuerpo en relación con otras. En el capítulo 7 interpretamos la evolución del cráneo humano como una serie de cambios en los ritmos de crecimiento de algunas partes en relación con otras, controlados por los genes del embrión en desarrollo. Deberíamos esperar, por tanto, que, si dibujamos un cráneo humano sobre una hoja de «goma matemática», fuera posible distorsionar la goma de alguna forma matemática adecuada y conseguir un parecido aproximado al cráneo de un pariente próximo, como el chimpancé, o —quizá con un poco más de distorsión— de un primo más distante, como el babuino. Y esto es lo que mostró D'Arcy Thompson.

Observe, una vez más, que es una decisión arbitraria dibujar primero el cráneo humano y luego transformarlo en el de un chimpancé o un babuino. Podría haber dibujado, digamos, el chimpancé primero y después haber obtenido las distorsiones necesarias para llegar al humano y al babuino. O lo que es más interesante para un libro sobre la evolución, tema sobre el que no versaba el suyo, podría haber dibujado primero, digamos, el cráneo de un *Australopithecus* sobre la goma original, y haber obtenido luego el modo de transformarlo en un cráneo humano moderno. Esto habría funcionado seguramente igual de bien que las imágenes anteriores, y habría sido significativo de una forma más directa desde el punto de vista de la evolución.

Al principio de este capítulo introduje la idea de una «homología» utilizando como ejemplo los brazos de los murciélagos y de los humanos. Siendo indulgente y mediante un uso particular del lenguaje, dije que los esqueletos eran idénticos, mientras que los huesos eran diferentes. Las transformaciones de D'Arcy Thompson nos proporcionan un buen método para precisar esta idea. En esta formulación, dos órganos —por ejemplo, la mano de un murciélago y la mano humana— son homólogos si resulta posible dibujar uno sobre una hoja de goma y deformarlo hasta llegar al otro. Los matemáticos tienen una palabra para esto: «homeomórfico» [66].



«Transformaciones» del cráneo, de D'Arcy Thompson

Imagen 71

Los zoólogos reconocieron la homología en tiempos predarwinianos y los preevolucionistas describen las, digamos, alas de los murciélagos y las manos humanas como homólogas. Si hubieran sabido suficientes matemáticas les habría gustado utilizar la palabra «homeomórfico». En los tiempos posdarwinianos, cuando se aceptó de forma generalizada que los murciélagos y los humanos comparten un antepasado común, los zoólogos comenzaron a definir la homología en términos evolutivos. Los parecidos homólogos son los que se heredan de un antepasado común. La palabra «análogo» se llegó a utilizar para nombrar parecidos debidos a una función compartida, no a la ascendencia. Por ejemplo, el ala de un murciélago y el ala de un insecto se describirían como análogas, a diferencia del brazo homólogo de un murciélago y un humano. Si queremos usar la homología como evidencia del hecho de la evolución, entonces no podemos usar la evolución para definirla. Por este motivo, es conveniente volver a la definición preevolutiva de «homología». El ala del murciélago y el brazo humano son homeomórficos: se puede transformar uno en otro distorsionando la goma sobre la que se dibujó. No se puede transformar un ala de un murciélago en el ala de un insecto de esta forma, porque no hay partes correspondientes. La existencia ampliamente extendida de los homeomorfismos, que no están definidos en términos evolutivos, se puede utilizar como una evidencia para la evolución. Es fácil ver cómo la evolución podría funcionar con cualquier brazo de un vertebrado y transformarlo en el brazo de cualquier otro vertebrado, simplemente cambiando las velocidades relativas de crecimiento en el embrión.

Desde que comencé a familiarizarme con los ordenadores como estudiante graduado en los años sesenta, me he preguntado qué podría haber hecho D'Arcy Thompson con un ordenador. La pregunta se hizo más apremiante en los años ochenta, cuando empezaron a estar disponibles ordenadores con pantalla (y no solo las impresoras de papel). El problema era dibujar sobre goma deformable y luego distorsionar la superficie del dibujo de forma matemática —¡y eso estaba *pidiendo* un tratamiento computacional!—. Sugerí que la Universidad de Oxford debía ofertar una beca para contratar a un programador que trasladara las transformaciones de D'Arcy a una pantalla de ordenador, de tal forma que fueran sencillas de utilizar. Conseguimos el dinero y contratamos a Will Atkinson, programador de primera línea y biólogo, que se convirtió en amigo y consejero en mis propios proyectos de programación. Una vez que resolvió el complejo problema de programar un rico repertorio de deformaciones matemáticas de la «goma», fue relativamente sencillo incorporar esta magia matemática a un programa de selección artificial de bioformas, similar a mis propios programas de «biomorfos», que describí en el capítulo 2. Igual que en mis programas, al «jugador» se le presenta una pantalla llena de formas animales y se le invita a elegir una de ellas para su «cría selectiva» generación tras generación. Una vez más, había «genes» que persistían a través de las generaciones, y una vez más los genes ejercían influencia sobre la forma de los «animales». Pero en este caso, el modo en que los genes influían en la forma del animal era controlando la distorsión de la «goma» sobre la que se había dibujado la forma del animal. Teóricamente, por tanto, debería haber sido posible comenzar con, digamos, un cráneo de *Australopithecus* dibujado sobre la goma «distorsionada» y haber encontrado el camino a través de criaturas con cajas craneales progresivamente más grandes y con hocicos cada vez más cortos —con un parecido creciente a los humanos, en otras palabras—. En la práctica resultó muy difícil conseguir algo como eso, y considero que el hecho es, en sí mismo, interesante.

Creo que una razón por la que resulta difícil es, de nuevo, porque las transformaciones de D'Arcy Thompson cambian una forma *adulta* en otra forma adulta. Como recalqué en el capítulo 8, esta no es la manera en que funciona la evolución. Cada animal individual tiene una historia de desarrollo. Comienza como un embrión y se convierte, por el crecimiento desproporcionado de diferentes partes del cuerpo, en un adulto. La

evolución no es una distorsión controlada genéticamente de un adulto en otro, es una alteración genéticamente controlada de un programa de desarrollo. Julian Huxley (nieto de T. H. y hermano de Aldous) reconoció esto cuando, poco tiempo después de la publicación de la primera edición del libro de D'Arcy Thompson, modificó el «método de las transformaciones» para estudiar la forma en que los embriones se convierten en embriones más avanzados o en adultos. Esto es todo lo que quiero decir aquí sobre el método de las transformaciones de D'Arcy Thompson. Volveré a este asunto en el capítulo final para hablar sobre un tema relacionado.

La evidencia comparativa siempre ha aportado más en favor del hecho de la evolución, como sugerí al principio de este capítulo, que la evidencia fósil. El mismo Darwin escribió una opinión similar en *El origen de las especies* al final de su capítulo sobre las «Afinidades mutuas de los seres orgánicos»:

> Finalmente, varias clases de hechos que han sido considerados en este capítulo creo que sugieren tan claramente que las innumerables especies, géneros y familias de seres orgánicos que pueblan este mundo descienden todos, cada uno dentro de su propia clase o grupo, de padres comunes y que todos han sido modificados en el curso de la descendencia, que yo adopto sin dudar esta posición aun cuando hubiera otros hechos o argumentos en contra.

COMPARACIONES MOLECULARES

Lo que Darwin no sabía —no podía saberlo— es que la evidencia comparativa llega a ser incluso más convincente cuando incluimos la genética molecular junto a las comparaciones anatómicas con las que sí estaba familiarizado.

De la misma forma que el esqueleto de los vertebrados es invariable entre todos los vertebrados, pero los huesos individuales son diferentes, y de la misma forma que el exoesqueleto de los crustáceos es invariable entre todos los crustáceos, mientras que los «tubos» individuales varían, también el código del ADN es invariable entre todas las criaturas vivas, mientras que los genes individuales varían. Esto es un hecho realmente

asombroso que muestra con más claridad que ninguna otra cosa que todas las criaturas vivas son descendientes de un único antepasado. No solo el código genético mismo, sino todo el sistema completo de genes/proteínas necesarios para la vida, con los que tratamos en el capítulo 8, es el mismo en todos los animales, plantas, hongos, bacterias, arqueas y virus. Lo que varía es lo que está escrito en el código, no el código mismo. Y cuando miramos comparativamente lo que está escrito en el código —las secuencias genéticas actuales en todas estas criaturas diferentes—, encontramos el mismo tipo de árbol jerárquico de semejanzas. Encontramos el mismo *árbol genealógico* —aunque desplegado de forma mucho más detallada y convincente— que en el esqueleto de los vertebrados, el de los crustáceos y, de hecho, en todo patrón de parecidos anatómicos en todos los reinos de la vida.

Si queremos saber cuál es el grado de parentesco entre dos especies —es decir, cómo de cerca está un erizo de un mono—, lo ideal sería mirar los textos moleculares completos de cada gen de ambas especies y comparar cada punto y cada coma, como haría un estudioso de la Biblia al comparar dos rollos o fragmentos de Isaías. Pero lleva tiempo y es caro. El Proyecto del Genoma Humano duró diez años, lo que representa muchos siglos en la escala humana. Aunque ahora sería posible conseguir el mismo resultado en una fracción de ese tiempo, todavía sería una empresa grande y comprometida, como también lo sería el proyecto del genoma del erizo. Al igual que los aterrizajes del Apolo, y como el Gran Colisionador de Hadrones (que acaba de ser puesto en marcha en Ginebra mientras escribo esto —la gigantesca escala de esta hazaña internacional me emocionó cuando lo visité—), la descodificación completa del genoma humano es uno de esos logros que me hace sentir orgulloso de ser humano. Estoy encantado con que el proyecto del genoma del chimpancé acabe de ser concluido con éxito, así como el equivalente de otras especies más. Si continúa el actual ritmo de éxitos (véase la «ley de Hodgkin» más adelante), pronto será económicamente viable secuenciar cada pareja de especies cuya cercanía de parentesco queramos medir. Mientras tanto, para la mayoría tenemos que contentarnos con muestrear partes específicas de sus genomas, lo que funciona muy bien.

Podemos simplemente tomar unas pocas muestras de genes (o proteínas, cuyas secuencias sean traducidas directamente a genes) y compararlas entre especies. Volveré a esto en un momento. Pero hay otras

formas de hacer una muestra aproximada y automática, y las tecnologías para lograrlo han estado disponibles durante mucho tiempo. Un primer método, que funciona sorprendentemente bien, aprovecha el sistema inmune de los conejos (se puede utilizar cualquier animal que se quiera, pero los conejos hacen muy bien el trabajo). Igual que para la defensa natural del cuerpo contra los patógenos, el sistema inmune del conejo fabrica anticuerpos contra cualquier proteína extraña que entre en el torrente sanguíneo. De la misma forma que se puede saber si yo he tenido tos ferina examinando los anticuerpos de mi sangre, también se puede saber a lo que ha sido expuesto un conejo en el pasado examinando su respuesta inmune en el presente. Los anticuerpos presentes en el conejo constituyen una historia de las sacudidas a las que su carne ha sido sometida —incluidas proteínas inyectadas artificialmente—. Si se inyecta, por ejemplo, una proteína de un chimpancé en un conejo, los anticuerpos que fabrica atacarán posteriormente a la misma proteína si se le administra otra vez. Pero supongamos que la segunda dosis es de una proteína equivalente, no de chimpancé, sino de gorila. La exposición anterior del conejo a la proteína del chimpancé le habrá prevenido *parcialmente* contra la versión del gorila, pero la reacción será más débil. Y también le habrá prevenido contra la versión del canguro, pero la reacción será todavía más débil, dado que el canguro está mucho menos relacionado que el gorila con el chimpancé que fijó la referencia. La intensidad de la respuesta del sistema inmune del conejo a una inyección posterior de proteína es una medida de la semejanza de esa proteína con la original a la que fue expuesto el conejo al principio. Fue con ese método, usando conejos, como Vincent Sarich y Allan Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron en 1960 que los humanos y los chimpancés tienen una relación de parentesco mucho más cercana de lo que antes se pensaba.

Hay también métodos que utilizan los propios genes, comparándolos directamente entre especies, en lugar de comparar las proteínas que codifican. Uno de los métodos más antiguos y efectivos es la hibridación de ADN, que es lo que está normalmente detrás de afirmaciones del tipo: «Los humanos y los chimpancés comparten el 98% de sus genes». Hay algo de confusión, por cierto, sobre qué significan exactamente esos porcentajes. ¿El 98% de *qué* es idéntico? El número exacto depende de cómo de grandes sean las unidades que estamos contando. Una analogía muy simple sirve para aclarar esto, y lo hace de una forma interesante

porque las diferencias entre la analogía y la cosa real son tan reveladoras como las similitudes. Supongamos que tenemos dos versiones del mismo libro y queremos compararlas. Quizá es el libro de Daniel y queremos comparar la versión canónica con un pergamino antiguo que se acaba de descubrir en una cueva en la costa del mar Muerto. ¿Qué porcentaje de capítulos de los dos libros es idéntico? Probablemente cero, ya que se requiere solo una discrepancia en cualquier lugar de todo un capítulo para que digamos que no son idénticos. ¿Qué porcentaje de sus *frases* son idénticas? El porcentaje será ahora mucho mayor. Aún mayor sería el porcentaje de palabras idénticas, porque las palabras tienen menos letras que las frases —menos oportunidades para romper la identidad—. Pero el parecido de una palabra también se rompe si difiere en alguna de las letras. Por tanto, si alineamos dos textos y los comparamos letra a letra, el porcentaje de letras idénticas será aún mayor que el porcentaje de palabras idénticas. Así pues, una estimación de aproximadamente «un 98% en común» no significa nada, a menos que especifiquemos el tamaño de la unidad que estamos comparando. ¿Estamos comparando capítulos, palabras, letras o qué? Y lo mismo se cumple cuando comparamos ADN de dos especies. Si estamos comparando cromosomas enteros, el porcentaje compartido es cero, porque solo se requiere una pequeña diferencia, en algún lugar en los cromosomas, para poder decir que los cromosomas son diferentes.

El tan citado número del 98% de material genético compartido entre los humanos y los chimpancés no se refiere ni al número de cromosomas ni al número total de genes, sino al número de «letras» de ADN (técnicamente, pares de bases) que casan entre sí dentro de los genes respectivos de humanos y chimpancés. Pero hay un fallo en ello. Si hacemos la alineación de forma ingenua, una letra *perdida* (o una letra añadida), en contraposición a una letra equivocada, hará que no casen todas las letras siguientes porque estarán desplazadas un paso arriba (hasta que haya un error en la dirección opuesta para alinearlas de nuevo). Es claramente injusto dejar que la estimación de discrepancias crezca de esta forma. El ojo de un estudioso, al analizar dos pergaminos de Daniel, se da cuenta de ello automáticamente, de una forma que es difícil de cuantificar. ¿Cómo podemos hacer esto con el ADN? Aquí es donde dejamos nuestra

analogía con los libros y pergaminos y vamos directamente al asunto real, porque, como suele ocurrir, la cosa real —el ADN— es más fácil de entender que la analogía.

Si calentamos poco a poco ADN, llega un punto —en torno a los 85 ºC— en que las uniones entre las dos cadenas de la doble hélice se rompen y las dos hélices se separan. Podemos pensar en los 85 ºC, o la temperatura que sea en cualquier caso, como un «punto de fusión». Si lo dejamos enfriar de nuevo, cada hélice simple se une espontáneamente otra vez con otra hélice simple, o con un fragmento de hélice simple, donde quiera que encuentre una con la que emparejarse, utilizando las reglas ordinarias de emparejamiento de las bases de la doble hélice. Podríamos pensar que esta última sería siempre la pareja de la que se acababa de separar y con la que, por supuesto, estaba perfectamente emparejada. De hecho, podría ser, pero normalmente no es así de fácil. Los fragmentos de ADN encontrarán otros fragmentos con los que se puedan emparejar, y lo normal es que no sean exactamente iguales que las parejas originales. De hecho, si añadimos fragmentos separados de ADN de otra especie, los fragmentos de las cadenas simples pueden unirse a fragmentos de ADN de la especie equivocada, de igual manera que se unirían a cadenas simples de la especie adecuada. ¿Por qué no iban a hacerlo? Esta es la sorprendente conclusión de la revolución de la biología molecular llevada a cabo por Watson y Crick: que el ADN es solo ADN. No «importa» si es ADN humano, ADN de chimpancé o ADN de manzana. Los fragmentos se emparejarán alegremente con fragmentos complementarios donde quiera que los encuentren. Sin embargo, la fuerza de la unión no es siempre igual. Los fragmentos de una hebra de ADN se unen con más fuerza a fragmentos correspondientes que a cadenas menos similares. Esto ocurre porque la mayoría de las «letras» del ADN (las «bases» de Watson y Crick) encuentran compañeros opuestos con los que no se pueden emparejar. La unión de estas cadenas está, en consecuencia, debilitada —como una cremallera a la que le falta algún diente—.

¿Cómo podemos medir esta fuerza del enlace una vez que se han encontrado y unido fragmentos de especies diferentes? Mediante un método sorprendentemente sencillo. Medimos el «punto de fusión» de las uniones. Recuerde que dije que el punto de fusión del ADN de doble cadena es de unos 85 ºC. Esto es siempre cierto en el ADN de doble cadena adecuadamente emparejado, como cuando una cadena de ADN

humano se «funde» separándose de su cadena complementaria de ADN humano. Pero cuando el enlace es más débil —como cuando una cadena humana se une a una cadena de chimpancé—, es suficiente una temperatura ligeramente inferior para romper el enlace. Y cuando el ADN humano se ha unido a ADN de un pariente más lejano, como un pez o un sapo, basta una temperatura aún menor para separarlos. La diferencia entre el «punto de fusión» cuando una cadena está unida a otra de su propia clase y el «punto de fusión» cuando está unida a una cadena de otra especie es nuestra medida de la distancia genética entre dos especies. Como regla general, cada decremento de 1 ºC en el «punto de fusión» es aproximadamente equivalente a una caída de un 1% en el número de letras de ADN emparejadas (o un incremento de un 1% en el número de dientes que faltan en la cremallera).

Hay dificultades con el método en las que no he entrado, y problemas complicados que tienen soluciones ingeniosas. Por ejemplo, si mezclamos ADN humano con ADN de chimpancé, la mayor parte del ADN humano fragmentado se unirá con otros fragmentos humanos, y la mayoría del ADN del chimpancé se unirá al de su propia clase. ¿Cómo se separa el ADN híbrido, cuyo «punto de fusión» es lo que realmente queremos medir, del ADN de la «misma clase»? La respuesta se obtiene mediante un truco ingenioso que implica el etiquetado radiactivo. Pero los detalles nos desviarían mucho de nuestro camino. El asunto principal es que la hibridación de ADN es la técnica que lleva a los científicos a barajar cifras como el 98% de similitud genética entre humanos y chimpancés, y proporciona porcentajes predeciblemente inferiores a medida que nos movemos hacia pares de animales con un parentesco más alejado.

El método más moderno para medir la similitud entre genes emparejados de especies diferentes es el más directo y el más costoso: leer la secuencia de letras de los genes utilizando el mismo método que se usó en el Proyecto del Genoma Humano. Aunque es todavía caro para comparar el genoma completo, se puede conseguir una buena aproximación comparando una pequeña muestra de genes, algo que se hace cada vez con más frecuencia.

Con independencia de la técnica que usemos para medir la similitud entre dos especies, ya sean los anticuerpos de los conejos o los puntos de fusión o la secuenciación directa, el siguiente paso es muy parecido. Después de obtener un único número que representa la similitud entre cada

par de especies, colocamos los números en una tabla. Cogemos un conjunto de especies y escribimos sus nombres, en el mismo orden, como cabeceras de las columnas y de las filas. Luego ponemos el porcentaje de similitudes en las celdas apropiadas. La tabla será triangular (la mitad del cuadrado) porque, por ejemplo, el porcentaje de similitud entre el ser humano y el perro será el mismo que entre el perro y el ser humano. Por tanto, si hemos rellenado toda la tabla, las dos mitades a cada lado de la diagonal serán simétricas.

Y ahora, ¿qué tipo de resultados cabría esperar? Sobre el modelo de evolución deberíamos predecir que nos encontraremos poniendo una puntuación alta en la celda que conecta al ser humano con el chimpancé y una puntuación más baja en la celda que conecta al ser humano y al perro. La celda humano/perro debería teóricamente tener una puntuación de parecido idéntica a la de la celda chimpancé/perro, porque los humanos y los chimpancés tienen exactamente el mismo grado de parentesco con los perros. Debería también ser idéntico el de la celda mono/perro y el de la celda lémur/perro. Esto es así porque los humanos, los chimpancés, los monos y los lémures están todos conectados al perro a través de su antepasado común, un primate temprano (que probablemente se parecía un poco a un lémur). La misma puntuación deberían tener las celdas de humano/gato, chimpancé/gato, mono/gato y lémur/gato, porque los gatos y los perros están emparentados con todos los primates a través del antepasado común de todos los carnívoros. Debe haber una puntuación mucho más baja —idealmente igual de baja— en todas las celdas que unan, por ejemplo, a un calamar con cualquier mamífero. Y no debería importar qué mamífero escojamos, ya que todos están igual de distantes de un calamar.

Estas son expectativas teóricas muy poderosas, pero no hay razón para que, en la práctica, no puedan ser traicionadas. Si lo fueran, sería una evidencia contra la evolución. Lo que ocurre realmente resulta ser —dentro de los márgenes estadísticos de error— justo lo que esperaríamos de la suposición de que la evolución ha ocurrido. Esto es otra forma de decir que, si se proyectan sobre las ramas de un árbol las distancias genéticas entre pares de especies, todo cuadra de forma satisfactoria. Por supuesto, el encaje no es del todo perfecto. Las expectativas numéricas en biología normalmente tienen la precisión de una aproximación.

La evidencia de la comparación de ADN (o de proteína) se puede utilizar para decidir —bajo la suposición de la evolución— qué pares de animales son parientes más cercanos que otros. Lo que convierte esto en una evidencia extremadamente poderosa para la evolución es que se puede construir un árbol de parecidos genéticos de forma independiente para cada gen. Y el resultado importante es que cada gen da lugar aproximadamente al mismo árbol genealógico. Una vez más, esto es exactamente lo que cabría esperar si estuviéramos tratando con un árbol genealógico verdadero. No es lo que esperaríamos si un diseñador hubiera analizado todo el reino animal y hubiera elegido y cogido —o «tomado prestadas»— las mejores proteínas para el trabajo, donde quiera que se encuentren en el reino animal.

El primer estudio a gran escala siguiendo esta línea fue realizado por un grupo de genetistas en Nueva Zelanda, dirigidos por el profesor David Penny. El grupo de David Penny tomó cinco genes que, aunque no idénticos entre todos los mamíferos, eran suficientemente similares como para tener el mismo nombre en todos ellos. Los detalles no importan, pero los cinco genes eran los de la hemoglobina A, la hemoglobina B (las hemoglobinas dan a la sangre su color), el fibrinopéptido A, el fibrinopéptido B (los fibrinopéptidos se utilizan en la coagulación de la sangre) y el citocromo C (que desempeña un papel importante en la bioquímica celular). Se eligieron once mamíferos para comparar: el mono rhesus, la oveja, el caballo, el canguro, la rata, el conejo, el perro, el cerdo, el ser humano, la vaca y el chimpancé.

Penny y sus colegas pensaron estadísticamente. Querían calcular la probabilidad de que, solo por azar, dos moléculas dieran lugar al mismo árbol genealógico, si la evolución no fuese cierta. Así que intentaron imaginar todos los árboles posibles que pudieran terminar en once descendientes. Es un número sorprendentemente grande. Incluso si nos limitamos a «árboles binarios» (es decir, árboles con ramas que solo se bifurcan —no se separan en tres o más ramas—), el número total de árboles posibles es de más de 34 millones. Los científicos observaron pacientemente cada uno de los 34 millones de árboles y los compararon con los otros 33.999.999 árboles. ¡No, por supuesto que no lo hicieron! Requeriría demasiado tiempo de ordenador. Lo que hicieron, en cambio, fue construir una aproximación estadística ingeniosa, un atajo equivalente a ese cálculo monstruoso.

Así es como funcionaba el método de aproximación. Tomaron el primero de los cinco genes, digamos la hemoglobina A (en todos los casos utilizamos el nombre de la proteína en lugar del gen que codifica esa proteína). De todos estos millones de árboles querían encontrar cuál era el más «parsimonioso» en el que estuviera implicada la hemoglobina. «Parsimonioso» significa aquí 'que necesita postular el mínimo cambio evolutivo'. Por ejemplo, todos los miles de árboles que asumían que el pariente más cercano a un ser humano era un canguro, mientras que los humanos y los chimpancés tenían un parentesco más lejano, resultaron ser árboles muy poco «parsimoniosos»: se necesita asumir mucho cambio evolutivo para dar lugar al resultado de que los canguros y los humanos tienen un antepasado común reciente.

El veredicto de la hemoglobina A sería:

> Este es un árbol muy poco «parsimonioso». No solo tengo que realizar mucho trabajo de mutaciones para terminar de forma tan diferente en humanos y canguros, sino que, a pesar de nuestra relación de parentesco, tan cercana de acuerdo con este árbol, también tengo que hacer un gran trabajo de mutaciones en la otra dirección, para asegurarme de que, a pesar de su gran separación en este árbol en particular, los humanos y los chimpancés de alguna forma terminaron con una hemoglobina A similar. Voto en contra de este árbol.

La hemoglobina A concluye con un veredicto de este tipo para cada uno de los 34 millones de árboles, alguno más favorable que otro, y finalmente termina eligiendo unas pocas docenas de los árboles mejor clasificados. De estos, la hemoglobina A diría algo como:

> Este árbol sitúa a los humanos y a los chimpancés como parientes cercanos y sitúa a las ovejas y a las vacas como parientes cercanos y sitúa a los canguros en una rama separada. Resulta ser un árbol muy bueno porque casi no tengo que hacer trabajo de mutaciones para explicar los cambios evolutivos. Es un árbol muy «parsimonioso» y ¡consigue el voto de la hemoglobina A!

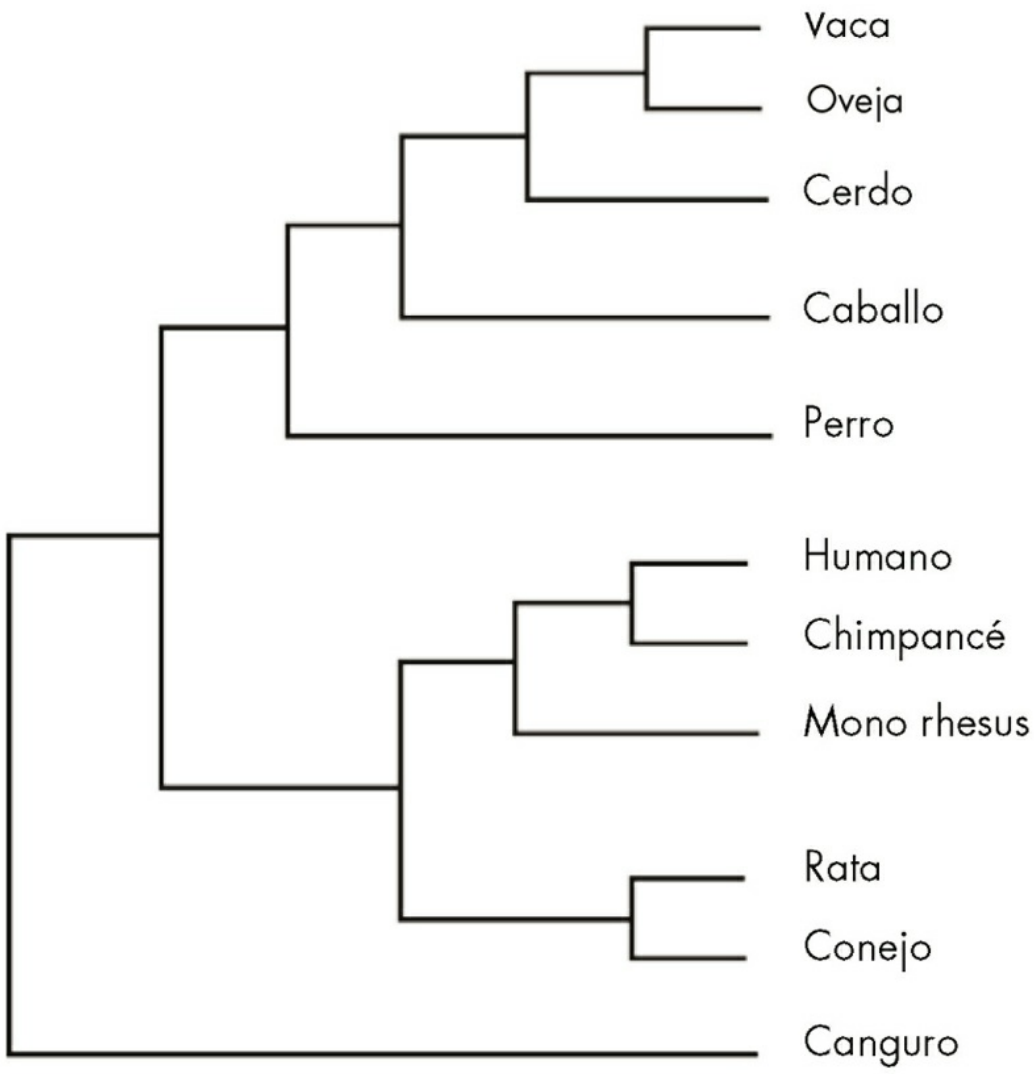
Por supuesto que habría sido agradable si la hemoglobina A y todos los demás genes pudieran determinar un único árbol «parsimonioso», pero eso es pedir demasiado. Entre los 34 millones posibles solo se espera que

unos pocos árboles ligeramente diferentes opten a las primeras posiciones de la hemoglobina A.

Y ahora, ¿qué pasa con la hemoglobina B? ¿Qué pasa con el citocromo C? Cada una de las cinco proteínas tiene derecho a su propio voto para encontrar sus propios árboles preferidos (esto es, «parsimoniosos») de entre 34 millones de árboles. Sería perfectamente posible para el citocromo C llegar a un voto completamente diferente sobre cuál es el árbol más «parsimonioso». Podría resultar que el citocromo C de los humanos realmente fuera muy parecido al de los canguros y muy diferente al de los chimpancés. Lejos de reconocer el cercano emparejamiento entre la oveja y la vaca propuesto por la hemoglobina A, el citocromo C podría descubrir que no necesita mutar para situar a la oveja muy cerca de, digamos, los monos, y para situar a las vacas muy cerca de los conejos. Bajo la hipótesis de la creación no hay ninguna razón por la que esto no pudiera ocurrir. Pero lo que Penny y sus colegas encontraron es que había un acuerdo sorprendentemente alto entre las cinco proteínas (y utilizaron una estadística todavía más ingeniosa para mostrar cómo de improbable sería haber llegado a este acuerdo por azar). Entre 34 millones de árboles posibles las cinco proteínas «votaron» por el mismo subconjunto de árboles. Esto es exactamente lo que esperaríamos de la suposición de que solo hay un árbol real que relacione a los once animales, y es el árbol *genealógico:* el árbol de los parentescos evolutivos. Es más, el árbol de consenso al que «votaron» las cinco moléculas resultó ser el mismo que los zoólogos habían deducido a partir de evidencias anatómicas y paleontológicas, no moleculares.

El estudio de Penny fue publicado en 1982, hace bastante tiempo. Los años transcurridos desde entonces han visto una enorme proliferación de pruebas detalladas de las secuencias exactas de genes de numerosos animales y plantas. El acuerdo sobre los árboles más «parsimoniosos» se extiende ahora mucho más allá de las once especies y las cinco moléculas que Penny y sus colegas estudiaron. El suyo fue un ejemplo muy bueno y demoledor, como probaron con la evidencia estadística. La suma total de datos de secuencias genéticas que hay ahora disponibles establece la cuestión más allá de toda duda concebible. Mucho más convincente que la evidencia fósil (también muy convincente), la evidencia de las comparaciones entre genes está convergiendo rápida y decisivamente en un gran árbol de la vida. En la ilustración vemos un árbol de las once

especies del estudio de Penny que representa un «voto» de consenso moderno de muchas partes diferentes del genoma de los mamíferos. Es la consistencia del acuerdo entre todos los diferentes genes del genoma lo que nos da confianza no solo en la precisión histórica de árbol de consenso mismo, sino en el hecho de que la evolución ha ocurrido.



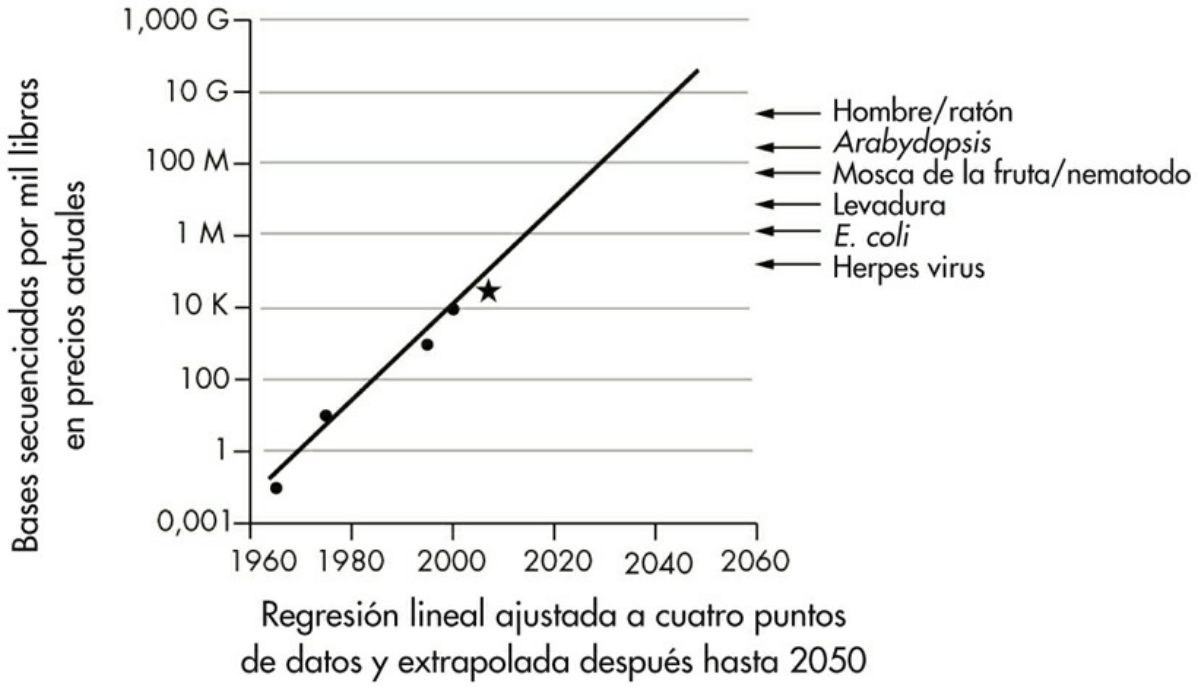
Árbol genealógico de las once especies de Penny

Si la tecnología molecular genética sigue expandiéndose a su ritmo exponencial actual, para el año 2050 será rápido y barato obtener la secuencia completa del genoma de un animal, poco más complicado que tomar su temperatura o su presión sanguínea. ¿Por qué digo que la tecnología genética está expandiéndose exponencialmente? ¿Podemos medirlo? Hay un paralelismo en la tecnología de los ordenadores, la

llamada «ley de Moore». Denominada así por Gordon Moore, uno de los fundadores de la compañía de circuitos integrados Intel, se puede expresar de varias formas, porque se unen varias medidas de la potencia de un ordenador. Una versión de la ley afirma que el número de unidades que se pueden empaquetar en un circuito integrado de un tamaño dado se dobla entre cada dieciocho meses y dos años aproximadamente. Es una ley empírica, lo que significa que en lugar de haber sido derivada de una teoría, resulta ser cierta cuando miramos los datos. Se ha mostrado correcta durante un periodo de unos cincuenta años hasta ahora, y muchos expertos piensan que lo seguirá siendo durante al menos algunas décadas más. Otras tendencias exponenciales, con un tiempo de duplicación similar, que pueden considerarse versiones de la ley de Moore, incluyen el aumento de velocidad de la computación y del tamaño de la memoria por coste de unidad. Las tendencias exponenciales siempre conducen a resultados sorprendentes, como Darwin demostró cuando, con la ayuda de su hijo matemático George, tomó el elefante como ejemplo de animal con un ciclo reproductivo lento y mostró que, en solo unos pocos siglos de crecimiento no restringido exponencial, los descendientes de una sola pareja de elefantes cubrirían la tierra. No hace falta decir que el crecimiento de la población de elefantes no es exponencial en la práctica. Está limitado por la comida y el espacio, por las enfermedades y por muchas otras cosas. Ese era, de hecho, el argumento central de Darwin, ya que ahí es donde entra la selección natural.

Pero la ley de Moore se ha venido cumpliendo desde hace al menos cincuenta años. Aunque nadie tiene una idea clara de por qué, varias medidas de la potencia de un ordenador han ido aumentando exponencialmente en la práctica, mientras que la tendencia del elefante de Darwin es exponencial solo en teoría. Se me ocurrió que podría haber una ley similar para la tecnología genética y el secuenciamiento de ADN. Se lo sugerí a Jonathan Hodgkin, catedrático de Genética en Oxford (que fue alumno mío). Descubrí con alegría que él ya había pensado en ello —y lo había medido, para preparar una conferencia que iba a dar en su antiguo colegio—. Estimó el coste de secuenciar una longitud estándar de ADN en cuatro momentos de la historia, 1965, 1975, 1995 y 2000. Yo alteré sus números para representar «ganancia esperada» o «¿cuánto ADN se puede secuenciar con mil libras». Dibujé las cantidades en una escala logarítmica, porque una tendencia exponencial siempre se ve como una

línea recta cuando se representa logarítmicamente. Como puede observar en el gráfico, los cuatro puntos de Hodgkin encajan bastante bien sobre una línea recta. Ajusté una línea a los puntos (usando la técnica de regresión lineal: véase la nota 1 del capítulo 5) y luego me tomé la libertad de proyectarla hacia el futuro. Muy poco tiempo antes de que este libro se enviara a imprimir enseñé esta sección al profesor Hodgkin y me pasó los datos más recientes de los que tenía conocimiento: el genoma del ornitorrinco con pico de pato, que fue secuenciado en 2008 (el ornitorrinco era una buena elección debido a su posición estratégica en el árbol de la vida: el antepasado que compartimos con él vivió hace 180 millones de años, lo que es cerca de tres veces el tiempo transcurrido desde la extinción de los dinosaurios). He dibujado el punto del ornitorrinco como una estrella en el gráfico y se puede ver que se ajusta muy bien cerca de la línea proyectada que se calculó con los datos anteriores.



Ley de Hodgkin

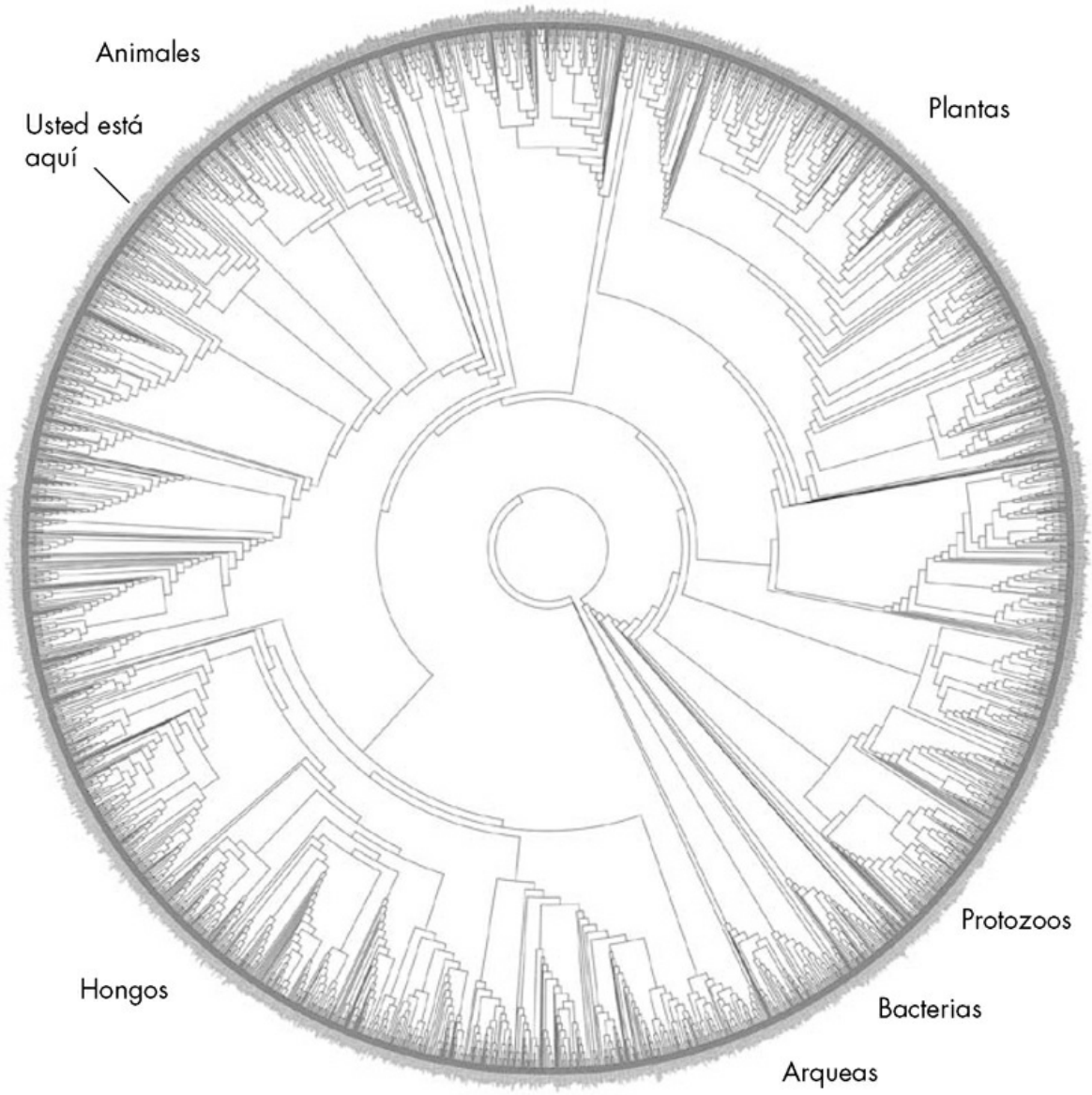
Imagen 73

La pendiente de la línea de lo que estoy llamando ahora (sin permiso) la ley de Hodgkin es solo ligeramente menos inclinada que la de la ley de Moore. El tiempo para doblarse es de un poco más de dos años, mientras

que en la ley de Moore es de un poco menos de dos años. La tecnología del ADN es muy dependiente de los ordenadores, por lo que es razonable pensar que la ley de Hodgkin depende, al menos parcialmente, de la ley de Moore. Las flechas de la derecha indican los tamaños de los genomas de varias criaturas. Si seguimos las flechas hacia la izquierda hasta que alcanzan la línea inclinada de la ley de Hodgkin, se puede ver una estimación de cuándo será posible secuenciar un genoma del mismo tamaño que la criatura a la que se hace referencia por solo mil libras (con el valor actual). Para un genoma del tamaño del de la levadura solo necesitamos esperar hasta el 2020. Para el genoma de un mamífero moderno (hasta donde este cálculo rápido hecho sobre la parte de atrás de un sobre puede precisar, todos los mamíferos son igual de caros), la fecha estimada es justo al llegar a 2040. Esto es una predicción estimulante: una base de datos masiva de secuencias de ADN, obtenidas a bajo coste y fácilmente de todos los rincones del reino de los animales y del reino de las plantas. Las comparaciones detalladas de ADN rellenarán los vacíos en nuestro conocimiento sobre los parentescos evolutivos actuales de todas las especies con todas las demás: conoceremos, con completa seguridad, el árbol genealógico completo de todas las criaturas vivas [67]. Solo Dios sabe cómo tendremos que dibujarlo; no cabrá en ningún papel de tamaño razonable.

Hasta el momento, el intento a mayor escala en esa dirección ha sido realizado por un grupo de investigadores en colaboración con David Hillis, el hermano de Danny Hillis, quien construyó uno de los primeros supercomputadores. El dibujo de Hillis hace el diagrama del árbol más compacto, situándolo alrededor de un círculo. No se puede ver el salto en el que los dos extremos casi se encuentran, pero está entre las «bacterias» y las «arqueas». Para ver cómo funciona este dibujo circular, puede fijarse en la versión reducida que lleva tatuada en la espalda Clare D'Alberto, una estudiante graduada de la Universidad de Melbourne cuyo entusiasmo por la zoología no es solo superficial. Clare me ha permitido amablemente reproducir la fotografía en este libro (véase página en color 25). Su tatuaje incluye una pequeña muestra de 86 especies (el número de ramas terminales). Se puede ver el salto en el dibujo circular y podemos imaginar el círculo abierto. Las ilustraciones que —en menor número— se sitúan alrededor del borde están elegidas estratégicamente a partir de las bacterias, los protozoos, las plantas, los hongos y cuatro filos animales.

Los vertebrados están representados por el alargado dragón marino de la derecha, un pez sorprendente, cuya protección descansa en su parecido a las algas. El dibujo circular de Hillis es el mismo excepto porque tiene tres mil especies. Los nombres aparecen alrededor del borde exterior del círculo, demasiado pequeños como para leerlos —aunque el *Homo sapiens* ha sido hábilmente marcado con la expresión «Usted está aquí»—. Podemos hacernos una idea de cómo de dispersa es una muestra de este árbol, incluso en un dibujo tan amplio como este, si nos dicen que los parientes más cercanos de los humanos que podrían entrar en el círculo son las ratas y los ratones. Los mamíferos tienen que reducirse drásticamente para poder ajustar todas las otras ramas del árbol a la misma longitud. Imagine un árbol similar con diez millones de especies en lugar de las tres mil incluidas aquí. Y diez millones no es la estimación más optimista del número de especies vivas. Merece la pena descargarse el árbol de Hillis de su sitio web (véanse notas al final del libro) e imprimirlo como un póster en un papel de un tamaño que, según recomiendan, debe ser de al menos 220 centímetros (incluso sería aconsejable uno mayor).



El dibujo de Hillis

Imagen 74

EL RELOJ MOLECULAR

Ahora, aprovechando que estamos hablando de moléculas, tenemos un trabajo pendiente en relación con el capítulo sobre los relojes evolutivos. Allí vimos los anillos de los troncos de los árboles y varios tipos de relojes radiactivos, pero dejamos los relojes moleculares hasta

después de haber aprendido algo sobre otros aspectos de la genética molecular. Ha llegado el momento. Piense en esta sección como un apéndice para el capítulo sobre los relojes.

El reloj molecular asume que la evolución es cierta y que se produce a un ritmo suficientemente constante a través del tiempo geológico como para ser usado como un reloj por sí mismo, suponiendo que pueda ser calibrado con la utilización de fósiles que, a su vez, se calibran con relojes radiactivos. Igual que un reloj de vela asume que las velas arden a un ritmo fijo y conocido, uno de agua asume que esta sale de un cubo a una velocidad que puede ser calibrada, y uno de pared asume que un péndulo se balancea a un ritmo fijo, el reloj molecular asume que hay ciertos aspectos de la *propia* evolución que se producen a un intervalo fijo. El ritmo fijo se puede calibrar con esas partes del registro evolutivo que están bien documentadas mediante fósiles (datables radiactivamente). Una vez calibrado, el reloj molecular puede emplearse para otras partes de la evolución que no están bien documentadas por los fósiles. Por ejemplo, para animales que no tienen esqueletos duros y que raramente fosilizan.

Buena idea, pero ¿qué nos da derecho a esperar que podemos encontrar procesos evolutivos que ocurran a una velocidad constante? De hecho, una gran cantidad de pruebas sugiere que los ritmos evolutivos son muy variables. Mucho antes de la era moderna de la biología molecular, J. B. S. Haldane propuso el *darwin* como una medida de la velocidad evolutiva. Supongamos que, a lo largo del tiempo evolutivo, alguna característica medible de un animal está cambiando en una dirección constante. Por ejemplo, supongamos que la longitud media de la pierna está aumentando. De esta forma, si durante un periodo de un millón de años la longitud de la pierna aumenta multiplicándose por un factor *e* (2,718..., un número elegido por razones de conveniencia matemática en las que no necesitamos entrar [68]), diremos que la tasa de cambio evolutivo es de un darwin. El mismo Haldane calculó la tasa de cambio de la evolución del caballo como de aproximadamente cuarenta milidarwins, mientras que se ha sugerido que la evolución de los animales domésticos bajo selección artificial debería ser medida en kilodarwins. La velocidad de la evolución de los guppies trasladados a un río sin depredadores, como se describió en el capítulo 5, se ha estimado en cuarenta y cinco kilodarwins. La evolución de los «fósiles vivos» como *Lingula* (página

135) se mide probablemente en microdarwins. La idea está clara: las tasas de cambio de la evolución de las cosas que vemos y medimos, como las patas y los picos, son altamente variables.

Si la velocidad de la evolución es tan variable, ¿cómo podemos esperar utilizarla como un reloj? Aquí es donde la genética molecular llega al rescate. A primera vista no nos quedará claro cómo se puede hacer esto. Cuando las características medibles como la longitud de la pata evolucionan, lo que estamos viendo es la manifestación externa y visible de un cambio genético subyacente. ¿Cómo, entonces, puede ser que las tasas de cambio a nivel molecular proporcionen un buen reloj, mientras que las velocidades de evolución de las patas o de las alas no lo hacen? Si las patas y los picos cambian a velocidades que van de los microdarwins a los kilodarwins, ¿por qué deberían ser las moléculas más fiables como relojes? La respuesta es que los cambios genéticos que se manifiestan en la evolución visible y exterior —de cosas como las patas y los brazos— son solo la punta del iceberg, y están muy influenciados por la variación de la selección natural. La mayor parte del cambio genético que se da a nivel molecular es *neutral* y se puede, por tanto, esperar que suceda a un ritmo que es independiente de la utilidad, y que podría ser incluso constante dentro de cada gen. Un cambio genético neutral no tiene efecto en la supervivencia del animal, y esta es una credencial útil para un reloj. Esto es así porque se esperaría que los genes que afectan a la supervivencia, de forma positiva o negativa, evolucionaran a un ritmo diferente, reflejando este hecho.

Cuando el gran genetista japonés Motoo Kimura, entre otros, propuso la teoría neutral de la evolución molecular, esta resultó controvertida. Una versión de ella está ahora ampliamente aceptada y, sin entrar aquí en la evidencia detallada, voy a aceptarla en este libro. Ya que tengo reputación de «archiadaptacionista» (supuestamente obsesionado con la selección natural como la fuerza más importante, o incluso la única, que dirige la evolución), podemos tener cierta confianza en que, si incluso yo apoyo la teoría neutral, ¡es poco probable que muchos otros biólogos se opongan a ella! [69].

Una mutación neutral es la que, aunque fácilmente medible por técnicas de genética molecular, no está sujeta a la selección natural, bien sea positiva o negativa. Los «pseudogenes» son neutrales por una razón. Son genes que una vez hicieron algo útil pero que ahora se han quedado al

margen y nunca se transcriben o se traducen. Podrían muy bien no existir, y son exactamente lo que necesitamos para un reloj evolutivo. Hay otras clases de genes preferidos por los científicos para los relojes moleculares, pero no entraré en más detalles. Para lo que sí resultan útiles los pseudogenes es para poner en un compromiso a los creacionistas. Fuerzan incluso su ingenuidad creativa para dar una razón convincente de por qué un creador inteligente debería haber creado un pseudogén —un gen que no hace absolutamente nada y tiene la apariencia de ser una versión anticuada de un gen que solía hacer algo—, a menos que fuera puesto ahí deliberadamente para engañarnos.

Dejando de lado los pseudogenes, es un hecho sorprendente que la mayor parte (el 95% en el caso de los humanos) del genoma podría no estar ahí y no habría ninguna diferencia. La teoría neutral se aplica incluso a muchos de los genes del 5% restante —los genes que se leen y se usan —. Se aplica incluso a los genes que son totalmente vitales para la supervivencia. Debo ser claro aquí. No estamos diciendo que un gen al que se aplica la teoría neutral no tenga efecto sobre el cuerpo. Lo que estamos diciendo es que una versión mutante del gen tiene exactamente el mismo efecto que la versión no mutada. Sea importante o no este gen, la versión mutada tiene el mismo efecto que la versión sin mutar. A diferencia de los pseudogenes, en los que el gen mismo puede ser descrito adecuadamente como neutral, estamos hablando ahora de casos en los que solo las *mutaciones* (por ejemplo, cambios en los genes) pueden ser descritas estrictamente como neutrales, no los genes mismos.

Las mutaciones pueden ser neutrales por varias razones. El código del ADN es un «código degenerado». Esto es un término técnico que significa que algunas «palabras» del código son sinónimos exactos [70]. Cuando un gen muta a uno de sus sinónimos, no tendríamos por qué llamarlo mutación. De hecho, no es una mutación en lo que se refiere a sus consecuencias sobre el cuerpo. Y por la misma razón no es una mutación en lo que se refiere a la selección natural. Pero es una mutación para los genetistas moleculares, porque ellos la pueden ver utilizando sus métodos. Es como si yo fuera a cambiar la fuente con la que escribo una palabra, digamos de «canguro» a «canguro». Seguimos pudiendo leer la palabra nueva y sigue refiriéndose al mismo animal australiano. El cambio de tipo de letra de Arial Narrow a Garamond es detectable, pero irrelevante para el significado.

No todas las mutaciones neutrales son tan neutrales como esta. Algunas veces, el gen nuevo se traduce en una proteína diferente, pero el «sitio activo» (recuerde las «hendiduras» tan cuidadosamente formadas que encontramos en el capítulo 8) de la nueva proteína se mantiene igual que el antiguo. En consecuencia, no hay ningún efecto sobre el desarrollo embrionario del cuerpo. La forma no mutada y la forma mutada del gen son todavía sinónimos en lo que se refiere a sus efectos sobre el cuerpo. Es posible también (aunque a los «ultradarwinistas» como yo no nos seduce esa idea) que algunas mutaciones realmente sí cambien el cuerpo, pero de una forma tal que no tiene efecto en la supervivencia, ni a favor ni en contra.

Por tanto, y para resumir la teoría neutral, decir que un gen, o una mutación, es «neutral» no significa necesariamente que el gen mismo sea inútil. Podría ser de vital importancia para la supervivencia del animal. Lo que significa es que la forma mutada de un gen —que podría ser o no importante para la supervivencia— no es *diferente* de la forma no mutada con respecto a sus efectos (que podrían ser muy importantes) sobre la supervivencia. Tal como sucede realmente, podríamos decir que la mayoría de las mutaciones son neutrales. Son indetectables por la selección natural, pero detectables por los genetistas moleculares; y esta es una combinación ideal para un reloj evolutivo.

Nada de esto debe usarse para restar importancia a la cima del iceberg: la minoría de las mutaciones que no son neutrales. Son ellas las seleccionadas, positiva o negativamente, en la evolución de mejoras. Son aquellas cuyos efectos vemos realmente —y la selección natural las «ve» también—. Son aquellas cuya selección da a los seres vivos la sobrecogedora ilusión de haber sido diseñados. Pero es el resto del iceberg —las mutaciones neutrales, que son mayoría— lo que nos importa cuando hablamos del reloj molecular.

A medida que avanza el tiempo geológico, el genoma está sujeto a una lluvia de desgastes en forma de mutaciones. En esa pequeña porción del genoma en la que las mutaciones realmente importan para la supervivencia, la selección natural se encarga de deshacerse de las malas y favorecer las buenas. Las mutaciones neutras, por el contrario, simplemente se apilan, sin castigo y sin llamar la atención —excepto para los genetistas moleculares—. Y ahora necesitamos un nuevo término técnico: *fijación.* Una nueva mutación, si es genuinamente nueva, tendrá

una frecuencia baja en el acervo genético. Si volvemos a visitar el acervo genético un millón de años más tarde, es posible que la mutación haya aumentado su frecuencia un cien por cien o algo parecido a eso. Si esto ocurre, se dice que la mutación ha «llegado a la fijación». Ya no pensaremos en ella como una mutación. Se ha convertido en la norma. La forma obvia en la que una mutación llega a la fijación es cuando la selección natural la favorece. Pero hay otra forma. Puede llegar a la fijación por azar. Igual que un apellido noble puede desaparecer por falta de descendientes varones, las alternativas a la mutación de la que estamos hablando pueden llegar a desaparecer del acervo genético. La mutación puede hacerse frecuente en el acervo genético por la misma suerte que llevó a «Smith» a convertirse en el apellido más común de Inglaterra. Por supuesto, es mucho más interesante si el gen llega a la fijación por alguna buena razón —que es la selección natural—, pero también puede ocurrir por azar, dado el gran número de generaciones. Y el tiempo geológico es suficientemente vasto como para que mutaciones neutras lleguen a la fijación a un ritmo predecible. El ritmo al que lo hacen varía, pero es una característica de los genes en particular, y dado que la mayoría de las mutaciones son neutrales, esto es precisamente lo que hace posible el reloj molecular.

Es la fijación lo que importa para el reloj molecular, porque los genes «fijados» son los que miramos cuando comparamos dos animales modernos para intentar estimar el momento en que sus antepasados se separaron. Los genes fijados son los genes que caracterizan a las especies. Son aquellos que son de todo menos universales en el acervo genético. Y podemos comparar los genes que se han fijado en una especie con los genes que lo han hecho en otra para estimar el momento en que ambas se separaron. Hay dos complicaciones en las que no entraré porque Yan Wong y yo las hemos comentado en profundidad en mi libro *El cuento del antepasado.* Con ciertas reservas y con varios factores importantes de corrección, el reloj molecular funciona.

De la misma forma que los relojes radiactivos avanzan a velocidades enormemente variadas, con vidas medias que van de las fracciones de segundo a las decenas de miles de millones de años, genes diferentes proporcionan un maravilloso repertorio de relojes moleculares, útiles para medir el cambio evolutivo a escalas que van desde un millón hasta mil millones de años, y todas las etapas intermedias. Igual que cada isótopo

radiactivo tiene su vida media característica, cada gen tiene su tasa de cambio característica —el ritmo al que las mutaciones nuevas típicamente llegan a la fijación por azar—. Los genes de la histona tienen una tasa característica de una mutación cada mil millones de años. Los genes del fibrinopéptido son mil veces más rápidos, con una tasa de cambio de una mutación que se fija cada millón de años. Los genes del citocromo C y de la familia de la hemoglobina tienen tasas intermedias, con tiempos de fijación medidos en millones o decenas de millones de años.

Ni los relojes radiactivos ni los relojes moleculares avanzan de forma regular como un reloj de péndulo o de pulsera. Si pudiéramos oírlos, sonarían como un contador Geiger; los relojes radiactivos lo hacen literalmente, ya que es precisamente un contador Geiger lo que usamos para escucharlos. Un contador Geiger no avanza regularmente como un reloj, avanza al azar, y cada paso llega en ráfagas extrañas que parecen tartamudear. Así es como las mutaciones y las fijaciones sonarían si pudiéramos oírlas en la inmensa escala de tiempo de la geología. Pero, ya sea tartamudeando como un contador Geiger, o metronómicamente como un reloj de pulsera, lo importante sobre los aparatos para medir el tiempo es que deben avanzar a un ritmo *promedio.* Eso es lo que hacen los relojes radiactivos, y eso es lo que hacen los relojes moleculares.

He introducido el reloj molecular diciendo que asume el hecho de la evolución, y por tanto no puede utilizarse como una evidencia a favor de ella. Pero ahora, después de entender cómo funciona, podemos ver que era demasiado pesimista. La existencia de pseudogenes —genes inútiles, que no se transcriben y que tienen un marcado parecido con los genes útiles— es un ejemplo perfecto de la forma en que los animales y las plantas tienen su historia escrita en ellos mismos. Pero esto es un tema que debe esperar al siguiente capítulo.

11

LA HISTORIA ESCRITA EN NOSOTROS

Comencé este libro imaginando a un profesor de latín obligado a desperdiciar su tiempo y energía defendiendo la afirmación de que los romanos y su lengua realmente existieron. Volvamos a esa idea y preguntémonos cuál es realmente la evidencia a favor de que existieran el Imperio romano y el latín. Yo vivo en Gran Bretaña, donde, como en el resto de Europa, Roma moldeó a su paso el paisaje, entretejió su lengua entre nosotros y su historia a través de nuestra literatura. Caminemos a lo largo del muro de Adriano, conocido entre los locales como «El Muro Romano». Caminemos, como hice yo domingo tras domingo, en fila india desde mi internado en el (relativamente) moderno Salisbury hasta la fortaleza romana de Old Sarum, y susurremos a los fantasmas imaginados de las legiones muertas. Despleguemos un mapa del Servicio Cartográfico Oficial de Inglaterra; donde veamos una carretera rural totalmente recta y de gran longitud, especialmente donde haya zonas verdes entre tramos de carretera o caminos de tierra que se puedan alinear exactamente con una regla, casi siempre encontraremos detrás una huella romana. Hay vestigios del Imperio romano por todos lados a nuestro alrededor.

Los cuerpos vivos también tienen su historia escrita en ellos. Están «erizados» por el equivalente biológico de las carreteras, muros, monumentos, fragmentos de cerámica romanos e incluso inscripciones antiguas talladas en el ADN vivo, listas para ser descifradas por los eruditos.

¿«Erizados»? Sí, literalmente. Cuando tenemos frío o estamos asustados, cuando quedamos embrujados por la incomparable destreza de un soneto de Shakespeare, se nos pone la carne de gallina. ¿Por qué? Porque nuestros antepasados eran mamíferos normales con pelo por todo el cuerpo, que se levantaba o bajaba a instancia de los sensibles

termostatos del cuerpo. Si hacía demasiado frío los pelos se erizaban para aumentar la capa aislante de aire caliente. Si hacía demasiado calor la capa se aplanaba para permitir que el calor del cuerpo escapara más fácilmente. Más tarde en la evolución, el sistema de erizado del pelo se reutilizó para propósitos de comunicación social y se involucró en «la expresión de las emociones», como Darwin descubrió en el libro que lleva ese título. No me puedo resistir a compartir aquí algunas líneas —del Darwin clásico— de dicha obra:

> El Sr. Sutton, que era el inteligente cuidador de los Jardines Zoológicos, observó atentamente para mí al chimpancé y al orangután, y sostiene que cuando de repente se asustan, como por una tormenta, o cuando se enfadan al ser molestados, su pelo se eriza. Vi a un chimpancé alarmado ante la presencia de un estibador de carbón, y el pelo se le erizó por todo su cuerpo... Puse una serpiente disecada en la jaula de los monos y el pelo de varias de las especies se erizó instantáneamente... Cuando mostré una serpiente disecada a un pecarí, su pelo se erizó de manera maravillosa a lo largo de su espalda; y lo mismo ocurrió con un jabalí enfurecido.

El pelo del lomo se eriza con la ira. También con el miedo: los pelos se erizan para aparentar un aumento de tamaño y asustar a depredadores peligrosos o a rivales. Incluso nosotros, monos desnudos, tenemos la maquinaria para erizar los pelos no existentes (o apenas existentes) y llamamos a esto «carne de gallina». La maquinaria que eriza el pelo es un *vestigio,* una reliquia no funcional de algo que desempeñó un trabajo útil para nuestros antepasados remotos. Los pelos vestigiales son uno de los muchos ejemplos de la historia escrita sobre nosotros. Constituyen una evidencia persuasiva de que la evolución ocurrió y, de nuevo, no proviene de los fósiles, sino de los animales modernos.

Como ya vimos en el capítulo anterior, en el que lo comparaba con un pez de tamaño similar, como un dorado, no tenemos que profundizar demasiado en un delfín para descubrir la historia de su vida en tierra firme. A pesar de tener una forma estilizada, como la de un pez, y a pesar del hecho de que ahora vive de forma permanente en el mar y moriría enseguida si encallara en la playa, un delfín, a diferencia de un dorado, tiene un «mamífero terrestre» entretejido en su interior. Tiene pulmones, no agallas, y se ahogaría como cualquier animal terrestre si se le impidiera

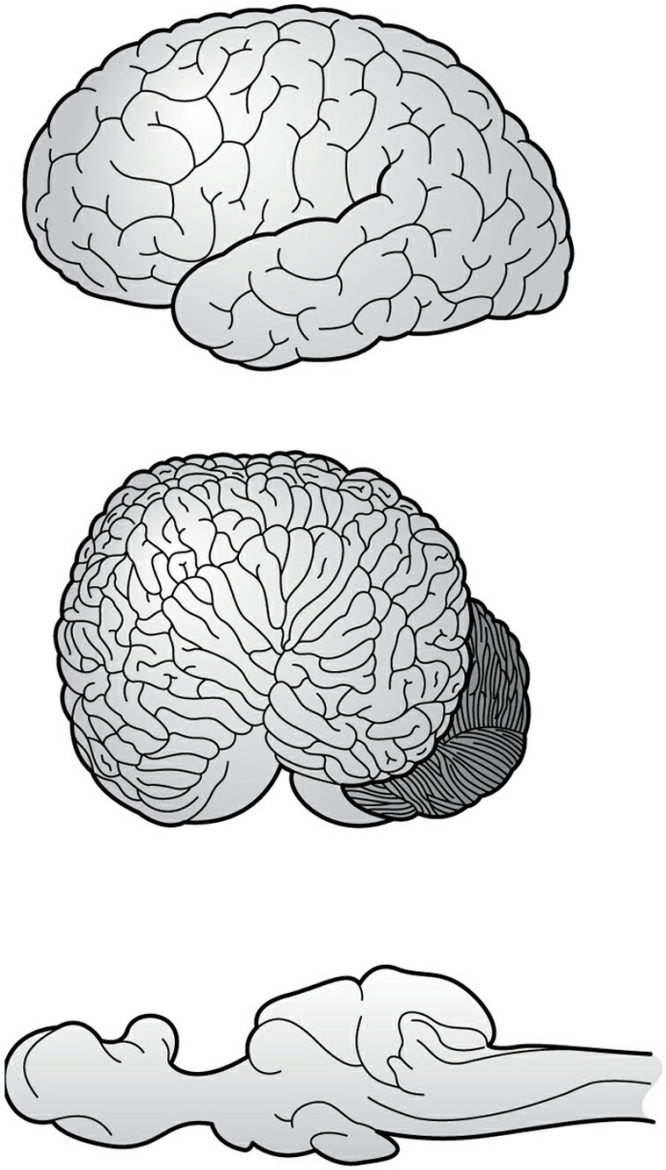
respirar aire, aunque puede contener la respiración mucho más tiempo que un mamífero terrestre. Su aparato respiratorio ha sido modificado en todo tipo de sentidos para adecuarse al mundo marino. En lugar de respirar a través de dos pequeños orificios localizados al final de su nariz, como cualquier mamífero normal, tiene un único orificio en la parte superior de su cabeza, lo que le permite respirar saliendo ligeramente a la superficie. Este «espiráculo» tiene una válvula hermética para evitar que el agua entre, y un gran diámetro para minimizar el tiempo necesario para tomar aire. En una comunicación de 1845 a la Royal Society, que Darwin, como miembro, probablemente leyó, Francis Sibson Esq. [71] escribió: «Los músculos que abren y cierran el agujero, y que actúan sobre varios sacos, forman una de las más complicadas, y al mismo tiempo exquisitamente ajustadas, piezas de maquinaria que la naturaleza o el arte nos presentan». El espiráculo consigue corregir un problema que nunca se habría presentado si el delfín respirase con branquias, como un pez. Y muchos de los detalles del espiráculo se pueden ver como correcciones a problemas secundarios que surgieron cuando la aspiración del aire se trasladó desde los orificios de la nariz hasta la parte superior de la cabeza. Un diseñador real habría planeado su ubicación directamente en la parte superior de la cabeza —en el caso de que no se hubiera decidido a eliminar los pulmones y sustituirlos por agallas—. A lo largo de este capítulo encontraremos continuamente ejemplos de cómo la evolución corrige un «error» inicial o una reliquia histórica mediante una compensación o ajuste a posteriori, en lugar de volver al tablero de dibujo como haría un diseñador real. En cualquier caso, la compleja y elaborada solución de la salida hacia el espiráculo es un testimonio elocuente del linaje ancestral del delfín sobre tierra firme.

Otra innumerable cantidad de características atestigua que los delfines y las ballenas tienen su historia ancestral escrita por todo el cuerpo, como vestigios de carreteras romanas trazadas siguiendo caminos en línea recta y senderos a través del mapa de Inglaterra. Las ballenas no tienen extremidades traseras, pero hay unos huesos pequeños, ocultos a cierta profundidad, que son restos de la cintura pélvica y las patas traseras de sus antepasados que caminaban, desaparecidos hace mucho tiempo: lo mismo ocurre con los sirenios o vacas marinas (ya he hablado de ellos varias veces: los manatíes, los dugongos y la vaca marina de Steller, de ocho metros de longitud, que fue cazada hasta la extinción por los seres

humanos) [72]. Los sirenios son muy diferentes de las ballenas y los delfines, pero son el único otro grupo de mamíferos completamente marinos que nunca salen a la orilla. Si los delfines son carnívoros rápidos e inteligentes, los manatíes y los dugongos son herbívoros lentos y perezosos. En el acuario de manatíes que visité en el oeste de Florida, por primera vez no me puse furioso porque los altavoces emitieran música. Era una música tranquila y relajante, y parecía tan apaciblemente apropiada que no molestaba en absoluto. Los manatíes y los dugongos flotan sin esfuerzo en equilibrio hidrostático, no mediante una vejiga natatoria como hacen los peces, sino porque están equipados con huesos pesados que sirven de contrapeso a la flotabilidad de su grasa. Su gravedad específica es muy parecida a la del agua, y pueden realizar ajustes precisos sobre ella expandiendo o contrayendo su caja torácica. La precisión de su control de flotabilidad aumenta por la posesión de una cavidad separada para cada pulmón: tienen dos diafragmas.

Los delfines y las ballenas, los dugongos y los manatíes paren a sus crías vivas, como todos los mamíferos. No es una práctica exclusiva de los mamíferos. Muchos peces son vivíparos, pero lo son de manera muy distinta (a decir verdad, en una fascinante variedad de formas diversas, evolucionadas sin duda de modo independiente). La placenta del delfín es inconfundiblemente de mamífero, y también lo es su hábito de dar de mamar leche a las crías. Su cerebro es sin duda el cerebro de un mamífero y, de hecho, un mamífero muy avanzado en ese aspecto. El córtex cerebral de un mamífero es una hoja de materia gris que envuelve el exterior del cerebro. Ser más listo consiste, en parte, en aumentar el área de esta hoja. Esto se podría hacer ampliando el tamaño total del cerebro y del cráneo que lo aloja. Como resultado, los mamíferos inteligentes se las ingenian para aumentar el área de la hoja dentro de los límites marcados por el cráneo, y lo hacen distribuyendo la hoja en grandes pliegues y fisuras. Esta es la razón por la que el cerebro humano se parece a una nuez arrugada, y los cerebros de los delfines y las ballenas son los únicos que rivalizan con nuestros cerebros de mono en el grado de plegamiento. Los cerebros de los peces no tienen estos pliegues. De hecho, no tienen córtex cerebral, y todo el cerebro es pequeño comparado con el del delfín o el del ser humano. La historia de mamífero del delfín está íntimamente ligada a la rugosa superficie del cerebro. Es una parte de su carácter de mamífero, junto con

la placenta, la leche, un corazón con cuatro cavidades, una mandíbula inferior con un único hueso, la sangre caliente y muchas otras características específicas de los mamíferos.



Cerebros de un humano (arriba), un delfín (centro) y una trucha común (abajo). (No a la misma escala)

Imagen 75

«De sangre caliente», así es como catalogamos a los mamíferos y a las aves, pero lo que realmente tienen es la habilidad de mantener su temperatura constante. Es una buena idea, porque se pueden optimizar las reacciones químicas dentro de una célula para que funcionen mejor a una

temperatura en particular. Los animales de «sangre fría» no tienen necesariamente la sangre fría. Un lagarto tiene la sangre más caliente que un mamífero si ambos se encuentran a mediodía, a pleno sol, en el desierto del Sahara. Un lagarto tendrá la sangre más fría que la de un mamífero si ambos están sobre la nieve. El mamífero tiene la misma temperatura todo el tiempo, y tiene que trabajar duro para mantenerla constante, recurriendo a sus mecanismos internos. Los lagartos utilizan medios externos para regular su temperatura, poniéndose al sol cuando necesitan calentarse y a la sombra cuando necesitan enfriarse. Los mamíferos regulan su temperatura corporal con más precisión, y los delfines no son una excepción. Una vez más, su historia de mamíferos está escrita en ellos, aun cuando hayan vuelto a la vida marina, donde la mayoría de las criaturas no mantienen una temperatura constante.

ESTUVIERON ORGULLOSOS DE SUS ALAS

Los cuerpos de las ballenas y de los sirenios tienen abundantes reliquias históricas que vemos fácilmente porque viven en un entorno muy diferente del de sus antepasados terrestres. Se puede aplicar un principio similar a las aves que han perdido el hábito y el equipamiento para volar. No todas las aves vuelan, pero todas mantienen al menos reliquias de sus aparatos de vuelo. Los avestruces y los emúes son corredores muy rápidos que nunca vuelan, pero tienen muñones de las alas como herencia de sus antepasados remotos, que sí lo hacían. Los muñones de las alas del avestruz, sin embargo, no han perdido completamente su utilidad. Aunque demasiado pequeños para volar, parece que conservan un papel en el control del balanceo y la dirección, y también en exhibiciones sexuales y sociales. Las alas del kiwi son demasiado pequeñas como para ser vistas por fuera de su magnífica capa de plumas, pero allí también hay vestigios de los huesos de las alas. Los moas perdieron sus alas completamente. Su país de origen, Nueva Zelanda, tiene un porcentaje muy alto de pájaros sin alas, probablemente porque la ausencia de mamíferos dejó nichos abiertos para ser ocupados por cualquier criatura que pudiera llegar allí volando. Pero esos pioneros, después de llegar con sus alas, las perdieron más tarde al ir desempeñando los roles de mamífero disponibles en tierra.

Probablemente esto no es aplicable a los moas, cuyos antepasados no tenían alas ya antes de que el gran continente austral, Gondwana, se rompiera en fragmentos —Nueva Zelanda fue uno de ellos— que llevaban su carga de animales «gondwanianos». Tampoco es aplicable a los kakapos, los loros de Nueva Zelanda, que no vuelan, pero cuyos antepasados, que sí volaban, vivieron aparentemente hasta hace tan poco que los kakapos todavía intentan volar, aunque carecen del equipamiento para poder hacerlo. En palabras del inmortal Douglas Adams en *Mañana no estarán:*

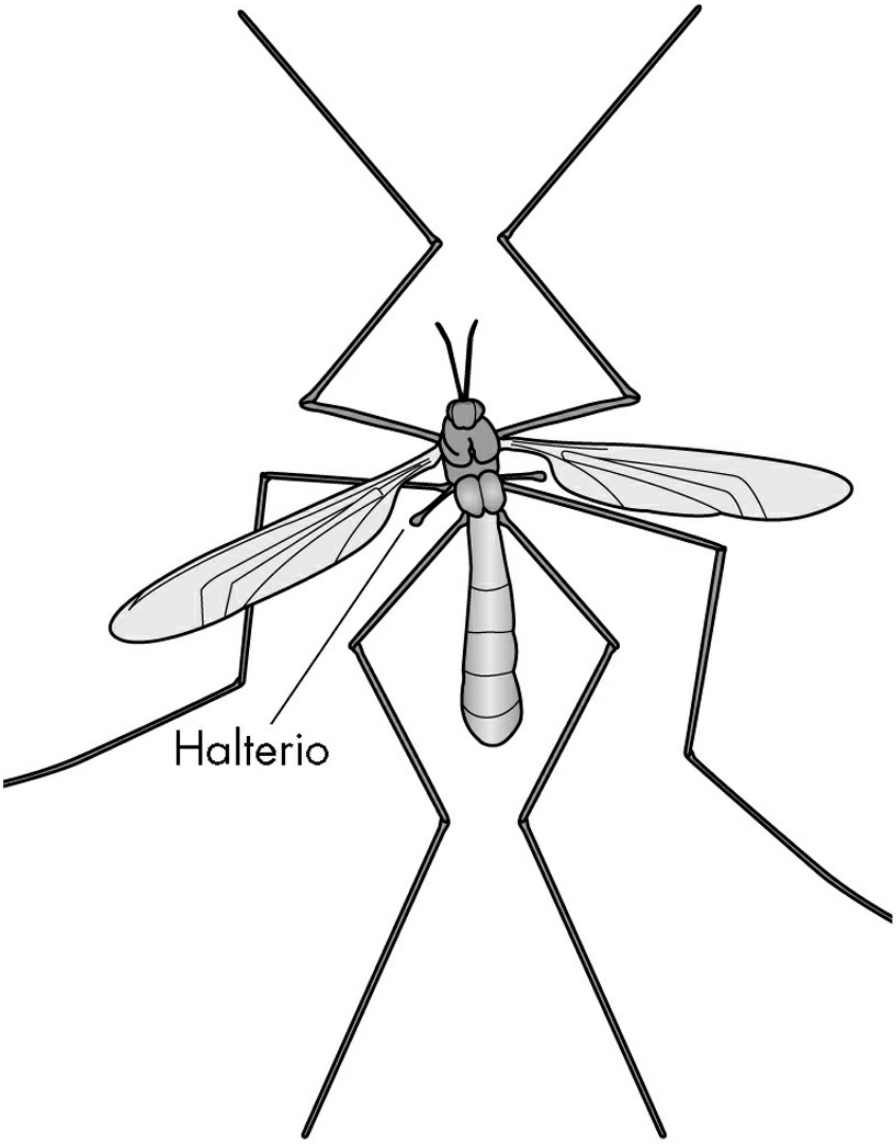
> Es un pájaro extremadamente gordo. Un adulto de buen tamaño puede pesar hasta tres kilos o tres kilos y medio, y sus alas llegan a agitarse un poco si cree que va a tropezar con algo —pero volar está completamente fuera de cuestión—. Lamentablemente, sin embargo, parece que no solo ha olvidado cómo volar, sino que ha olvidado que ha olvidado cómo volar. Aparentemente, un kakapo seriamente asustado se subirá a un árbol y saltará de él, aunque vuela como un ladrillo y aterriza en un salto sin gracia sobre el suelo.

Mientras que los avestruces, los emúes y los ñandúes son grandes corredores, los pingüinos y los cormoranes no voladores de las Galápagos son grandes nadadores. Tuve el privilegio de nadar con un cormorán no volador en una gran piscina rocosa en la isla de Isabela, y me encantó contemplar la velocidad y la agilidad con que exploraba una rendija tras otra, manteniéndose sumergido durante un tiempo sorprendente (yo tenía la ventaja de llevar un equipo de buceo). A diferencia de los pingüinos, que utilizan sus cortas alas para «volar bajo el agua», los cormoranes de las Galápagos se impulsan con sus potentes patas y sus pies provistos de enormes membranas, utilizando sus alas solo como estabilizadores. Pero todas las aves que no vuelan, incluyendo a los avestruces y las especies de su tipo, que perdieron sus alas hace mucho tiempo, descienden claramente de antepasados que las utilizaban para volar. Ningún observador razonable dudaría seriamente de que eso fue así, lo que significa que, a cualquiera que lo piense, le debería resultar muy difícil —¿por qué no imposible?— dudar del hecho de la evolución.

Numerosos grupos diferentes de insectos han perdido también sus alas, o las han reducido en gran medida. A diferencia de los insectos sin alas primitivos, como el pececillo de plata, las pulgas y los piojos han

perdido las alas que sus antepasados tuvieron en algún momento. La polilla gitana hembra tiene los músculos de sus alas atrofiados y no puede volar. Tampoco lo necesita, porque los machos vuelan hacia ellas atraídos por el rastro químico que dejan, que pueden detectar en concentraciones increíblemente bajas. Si las hembras se movieran como los machos, el sistema probablemente no funcionaría, ya que para cuando el macho hubiera llegado al gradiente químico en dispersión lenta, ¡su fuente ya se habría desplazado!

A diferencia de la mayoría de los insectos, que tienen cuatro alas, los dípteros, como sugiere su nombre latino, *Diptera,* solo tienen dos. El segundo par de alas se ha reducido a un par de «halterios» que oscilan velozmente como bolos de malabarista, a los que se parecen, y que hacen el papel de pequeños giróscopos. ¿Cómo sabemos que los halterios descienden de alas ancestrales? Por varias razones. Ocupan exactamente el mismo lugar en el tercer segmento torácico que ocupa el ala en el segundo segmento (y también en el tercero en algunos insectos). Se mueven siguiendo el mismo patrón de «figura de ocho» que las alas de los dípteros. Tienen la misma embriología que las alas, y aunque son minúsculos, si se observan con atención, sobre todo durante el desarrollo, se puede ver que son alas atrofiadas, claramente modificadas —a menos que seamos negadores de la evolución— a partir de alas ancestrales. Para aportar más testimonios a la misma historia, hay moscas mutantes de la fruta llamadas «mutantes homeóticas», cuya embriología es anormal, ya que no desarrollan halterios, sino un segundo par de alas, como una abeja o cualquier otro tipo de insecto.



Halterios en un mosquito

Imagen 76

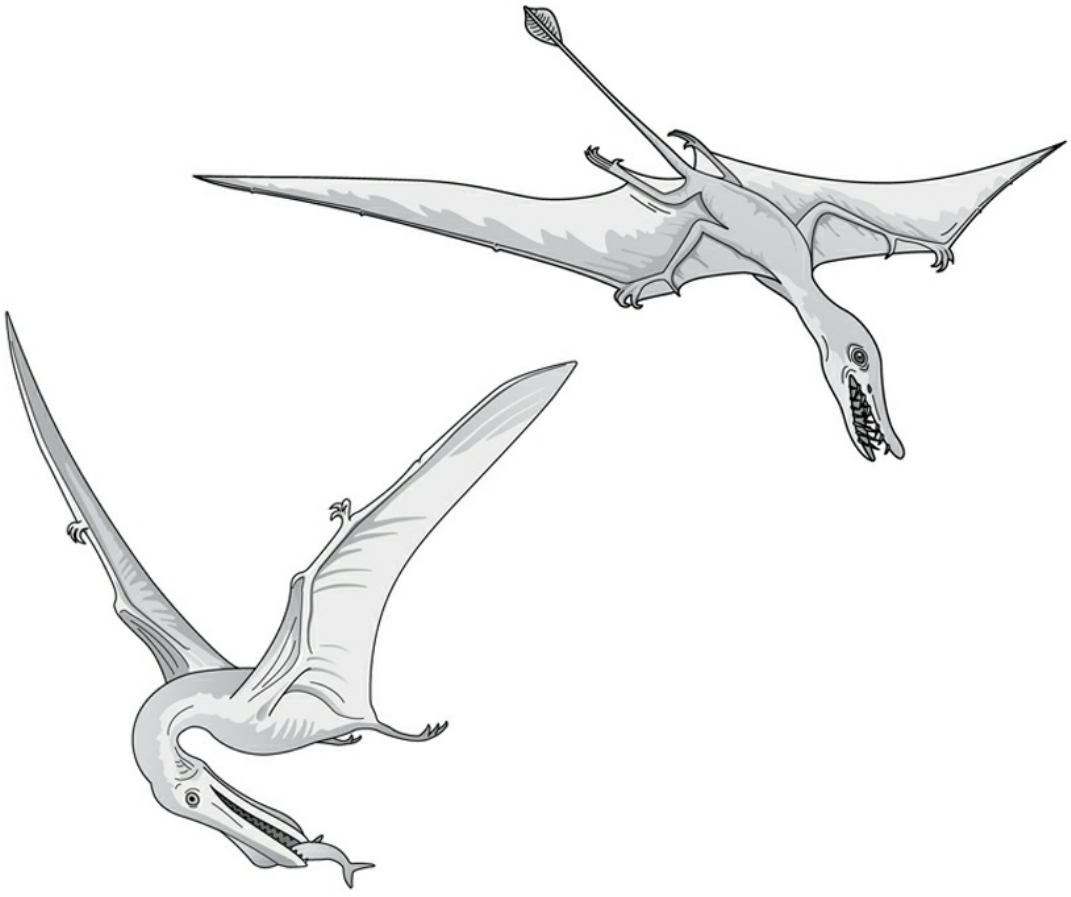
¿Qué aspecto habrían tenido los estadios intermedios entre las alas y los halterios? Y ¿por qué habría favorecido la selección natural esos estadios intermedios? ¿Qué utilidad tiene medio halterio? J. W. S. Pringle, mi antiguo profesor en Oxford, cuyo semblante amenazador y serio le hizo merecer el sobrenombre de «John el Risueño», fue principalmente quien descubrió cómo funcionan los halterios. Se dio cuenta de que todas las alas de los insectos tienen en la base pequeños órganos que detectan la torsión y otras fuerzas. Los órganos sensoriales en la base de los halterios son muy similares —otra evidencia de que los halterios son alas modificadas—.

Mucho antes de que los halterios evolucionasen, la información que llegaba al sistema nervioso proveniente de estos órganos sensoriales habría permitido que las alas, mientras vibraban rápidamente al volar, actuasen como giróscopos rudimentarios. Ya que cualquier máquina que vuela es naturalmente inestable, necesita ser capaz de compensarse con una instrumentación sofisticada, por ejemplo con giróscopos.

Toda la cuestión sobre los voladores estables e inestables es muy interesante. Observe los pterosaurios de la imagen de la página siguiente, reptiles voladores extinguidos contemporáneos de los dinosaurios. Cualquier ingeniero aeronáutico podría decirnos que el *Rhamphorhynchus*, el pterosaurio de la parte superior de la imagen, debió de ser un volador estable gracias a su larga cola terminada en una «pala de ping-pong». El *Rhamphorhynchus* no habría necesitado un control giroscópico sofisticado como el que tienen las moscas en sus halterios, porque su cola lo hacía inherentemente estable. Por otro lado, como el mismo ingeniero nos diría, no habría tenido gran capacidad de maniobra. En cualquier máquina que vuele, siempre hay un compromiso entre la estabilidad y la maniobrabilidad. El gran John Maynard Smith, que trabajó como diseñador de aeronaves antes de volver a la universidad para estudiar zoología (porque los aviones eran ruidosos y anticuados), señaló que los animales que vuelan se pueden mover en el tiempo evolutivo, adelante y atrás en el espectro de este compromiso, algunas veces perdiendo estabilidad a cambio de una mayor maniobrabilidad, pero pagando por ello en forma de más instrumentación y capacidad de cálculo —del cerebro—. En la parte de abajo de la imagen se puede ver un *Anhanguera*, un pterodáctilo tardío del Cretácico, que vivió unos sesenta millones de años después del *Rhamphorhynchus* del Jurásico. El *Anhanguera* no tenía casi cola, como los murciélagos modernos. Igual que los murciélagos, seguramente hubiera sido una aeronave inestable, que dependiera de su instrumentación para mantener un control preciso en cada momento sobre sus superficies de vuelo.

El *Anhanguera* no tenía halterios, por supuesto. Probablemente utilizaba otros órganos sensoriales para obtener la información equivalente, quizá los canales semicirculares del oído interno. Estos eran realmente muy grandes en aquellos pterosaurios que han sido examinados —aunque, de forma un tanto decepcionante para la hipótesis de Maynard Smith, eran grandes tanto en el *Rhamphorhynchus* como en el *Anhanguera*

—. Pero volviendo a las moscas, Pringle sugiere que sus antepasados de cuatro alas probablemente tenían grandes abdómenes que los habrían hecho estables. Las cuatro alas habrían actuado como giróscopos rudimentarios. Después, continúa, los antepasados de las moscas comenzaron a moverse a lo largo del *continuum* de la estabilidad, ganando capacidad de maniobra y haciéndose menos estables a medida que el abdomen se reducía. Las alas traseras empezaron a desplazarse más hacia la función giroscópica (que siempre habían realizado, en cierta medida, como alas), haciéndose más pequeñas y más pesadas para su tamaño, mientras que las alas delanteras se hicieron más grandes, ganando relevancia en el vuelo. Habría habido un *continuum* en el cambio, a medida que las alas delanteras asumían más tareas de aviación y las traseras se encogían para encargarse de la aviónica.

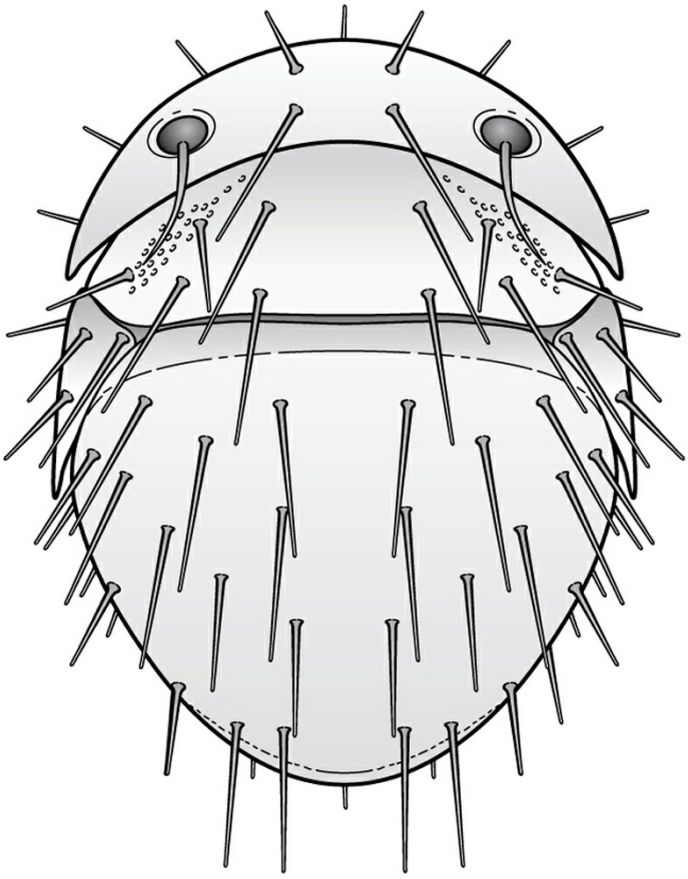


Rhamphorhynchus (arriba) y Anhanguera (abajo)

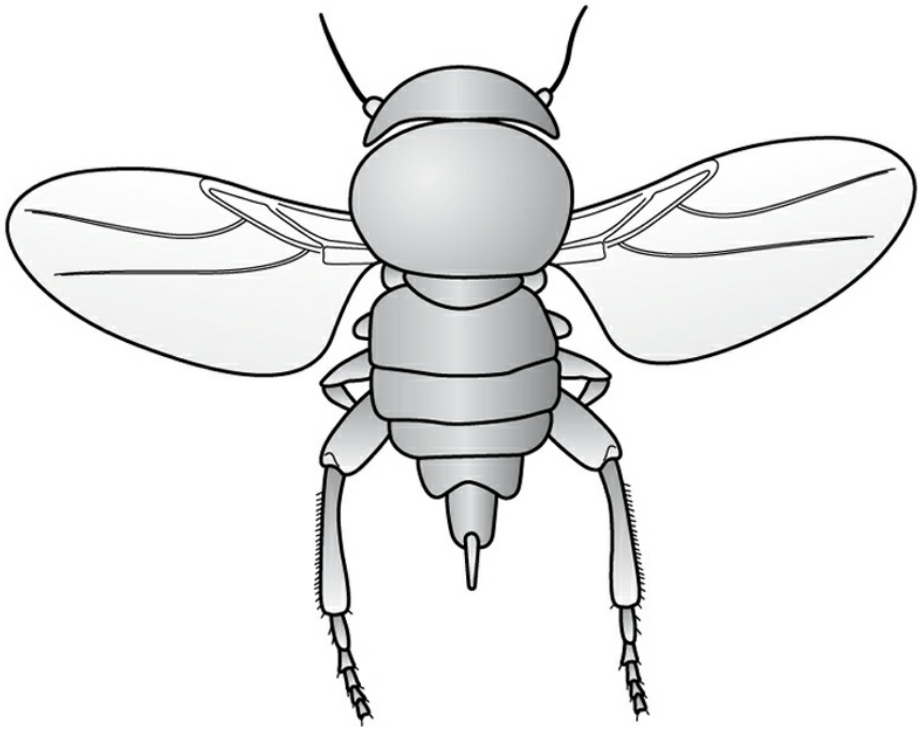
Imagen 77 (Ilusraciones en el texto) Imagen 77 (Créditos Individuales)

Las hormigas obreras han perdido sus alas, pero no la capacidad de desarrollarlas. Su historia alada todavía acecha dentro de ellas. Lo sabemos porque las hormigas reina (y los machos) tienen alas, y las obreras son hembras que podrían haber sido reinas pero que, por razones del entorno, no genéticas, no llegaron a serlo [73]. Probablemente las obreras perdieron sus alas en la evolución porque eran una molestia y estorbaban bajo tierra. Testimonio conmovedor de ello lo proporcionan las reinas, que utilizan sus alas una sola vez, para salir volando del nido natal, encontrar un macho y luego establecer un nuevo nido cavando un agujero. Cuando comienzan su nueva vida bajo tierra, lo primero que hacen es perder las alas, en algunos casos arrancándoselas literalmente a mordiscos: dolorosa (quizá; ¿quién sabe?) evidencia de que las alas son un estorbo bajo tierra. No sorprende, por tanto, que las obreras nunca desarrollen alas.

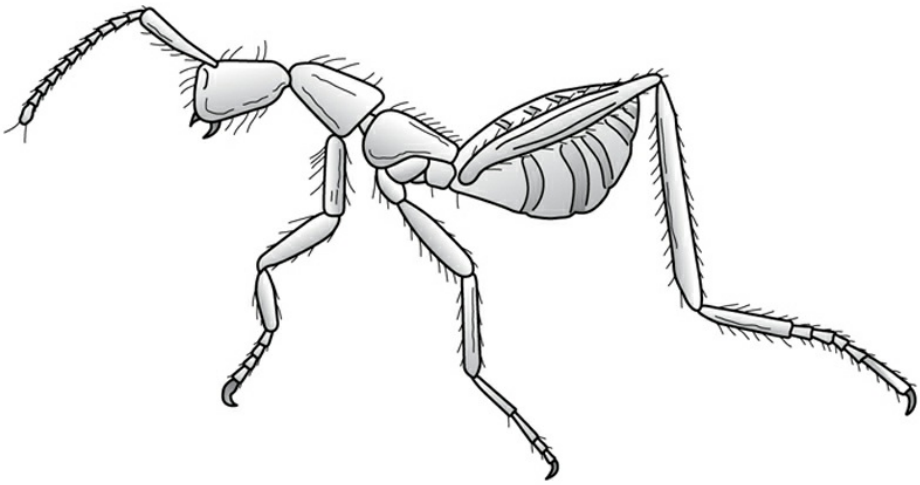
Los nidos de las hormigas y los de las termitas son el hogar de una horda de parásitos de muchos tipos diferentes, que se alimentan de las ricas sobras desperdigadas por las siempre susurrantes hileras de hormigas que vuelven de buscar comida. Y, probablemente por razones similares, las alas son tanto estorbo para ellos como lo son para las hormigas. ¿Quién podría creer que la monstruosidad de la primera imagen de la página siguiente es una mosca? Sabemos, a partir de un estudio cuidadoso y detallado de su anatomía, que no solo es una mosca, sino que este parásito de los nidos de termitas pertenece a una familia en particular de moscas, las *Phoridae*. En la siguiente ilustración se puede ver un miembro más normal de esta familia, que probablemente recuerda algo a los antepasados alados de la extraña criatura de arriba, aunque es también un parásito de los insectos sociales —las abejas en este caso—. Se puede apreciar la similitud con la cabeza en forma de hoz del extraño monstruo de arriba. Y las alas atrofiadas del monstruo son visibles como pequeños triángulos a cada lado.



Mosca parasitaria de la familia Phoridae



Otra mosca de la familia Phoridae



Escarabajo «disfrazado» de hormiga

Existe una razón adicional para la ausencia de alas en esta turba de merodeadores y ocupas de los nidos de hormigas y termitas. Muchos de ellos (no las moscas *Phoridae)* han asumido a lo largo del tiempo evolutivo un parecido protector con las hormigas, bien para engañarlas, bien para defenderse de posibles depredadores que, de otro modo, los elegirían a ellos en lugar de a las menos sabrosas y mejor protegidas hormigas. ¿Quién, echando solo un vistazo rápido, se daría cuenta de que el tercero de estos insectos, que vive en los nidos de las hormigas, no es una hormiga sino un escarabajo? Una vez más, ¿cómo lo sabemos? A partir de parecidos profundos y detallados con los escarabajos, que superan ampliamente en número las características superficiales por las que el insecto se parece a una hormiga: exactamente de la misma forma por la que sabemos que un delfín es un mamífero y no un pez. Esta criatura tiene su linaje de escarabajo escrito en ella, excepto (de nuevo como los delfines) en aquellas características que definen su parecido superficial, como la ausencia de alas y su perfil de tipo hormiga.

OJOS PERDIDOS

De la misma forma que las hormigas y sus acompañantes subterráneos perdieron sus alas bajo tierra, muchos tipos diferentes de animales que viven en las profundidades de oscuras cuevas donde no hay luz han reducido o perdido sus ojos y son, como el mismo Darwin advirtió, completamente —o casi completamente— ciegos. La palabra «troglobita» [74] ha sido acuñada para referirse a un animal que solo vive en las partes más oscuras de las cuevas, y está tan especializado que no puede vivir en ningún otro sitio. Entre los troglobitas hay salamandras, peces, gambas, cangrejos de río, miriápodos, arañas, grillos y muchos otros animales. A menudo son blancos, por haber perdido todo el pigmento, y ciegos. Normalmente mantienen vestigios de ojos, y esa es la razón por la que los menciono aquí. Los ojos vestigiales son una evidencia de la evolución. Dado que una salamandra de cueva vive en permanente oscuridad y no necesita los ojos, ¿por qué un creador divino la dotaría, a pesar de todo, con ojos de imitación, claramente relacionados con los ojos pero no funcionales?

Los evolucionistas, por su parte, necesitan llegar a una explicación para la pérdida de los ojos cuando ya no se necesitan. ¿Por qué no mantenerlos, cabría preguntarse, aun cuando nunca se usen? ¿No podrían resultar útiles en algún momento en el futuro? ¿Por qué «preocuparse» por deshacerse de ellos? Observe, por cierto, lo difícil que es resistirse al lenguaje de la intención, el propósito y la personificación. Estrictamente hablando, no debería utilizar la palabra «preocuparse», ¿verdad? Debería haber dicho algo del tipo: «¿Cómo beneficia la pérdida de los ojos a una salamandra de cueva, de tal forma que tiene más probabilidades de sobrevivir y reproducirse que una salamandra rival que mantiene un par de ojos perfectos, aun cuando nunca los usa?».

Bien, lo que es casi seguro es que los ojos no son gratuitos. Dejando a un lado los costes económicos discutiblemente bajos de fabricar un ojo, una cuenca de ojo húmeda que tiene que estar abierta al mundo para acomodar la pivotante bola ocular con su superficie transparente podría ser vulnerable a una infección. Por lo que una salamandra de cueva que sellara sus ojos detrás de la piel fuerte del cuerpo podría sobrevivir mejor que una salamandra rival que mantuviera sus ojos.

Pero hay otra forma de responder a la pregunta y, de forma instructiva, no requiere utilizar el lenguaje de las ventajas, y mucho menos el propósito o la personificación. Cuando hablamos de selección natural,

pensamos en términos de mutaciones raras beneficiosas, que aparecen y son favorecidas positivamente por la selección. Pero la mayoría de las mutaciones son perjudiciales, aunque solo sea porque son aleatorias y hay muchas más formas de empeorar que de mejorar [75]. La selección natural penaliza las mutaciones negativas. Los individuos que las tienen presentan más posibilidades de morir y menos de reproducirse, y esto, automáticamente, elimina las mutaciones del acervo genético. Cada genoma de animal y planta está expuesto a un bombardeo constante de mutaciones dañinas: una granizada de desgaste. Es un poco como la superficie de la Luna, que está llena de cráteres debido al constante bombardeo de meteoritos. Con raras excepciones, cada vez que un gen relacionado con un ojo, por ejemplo, es alcanzado por una mutación perniciosa, el ojo se hace menos funcional, un poco menos capaz de ver, un poco menos merecedor del nombre de ojo. En un animal que vive a la luz y utiliza el sentido de la vista, estas mutaciones dañinas (la mayoría) son eliminadas rápidamente del acervo genético por selección natural.

Pero en la oscuridad total, las mutaciones perniciosas que bombardean los genes que fabrican los ojos no son penalizadas. La visión es imposible en cualquier caso. El ojo de una salamandra de cueva es como la Luna, llena de cráteres mutacionales que nunca se han eliminado. El ojo de una salamandra diurna es como la Tierra, golpeada por mutaciones al mismo ritmo que los ojos de las moradoras de las cuevas; pero en este caso cada mutación perniciosa (cráter) es eliminada por la selección natural (erosión). Por supuesto, la historia del ojo de los moradores de cuevas no es solo negativa: la selección positiva también toma parte, para favorecer el crecimiento de la piel protectora sobre las vulnerables cuencas oculares de los ojos en deterioro óptico.

Entre las reliquias históricas más interesantes están las que se utilizan para algo (y por tanto no son vestigios en el sentido de que han sobrevivido a su propósito), pero parece que están muy mal diseñadas para ese propósito. En el mejor de los casos, el ojo de los vertebrados —por ejemplo, el ojo de un halcón o el ojo humano— es un instrumento soberbio de precisión, capaz de proezas de alta resolución que rivalizan con lo mejor que Zeiss o Nikon pueden proporcionar. Si no fuera así, Zeiss y Nikon estarían desperdiciando su tiempo al producir imágenes de alta resolución para que nuestros ojos las vieran. Por otro lado, Hermann von Helmholtz, el gran científico alemán del siglo XIX (podríamos decir que

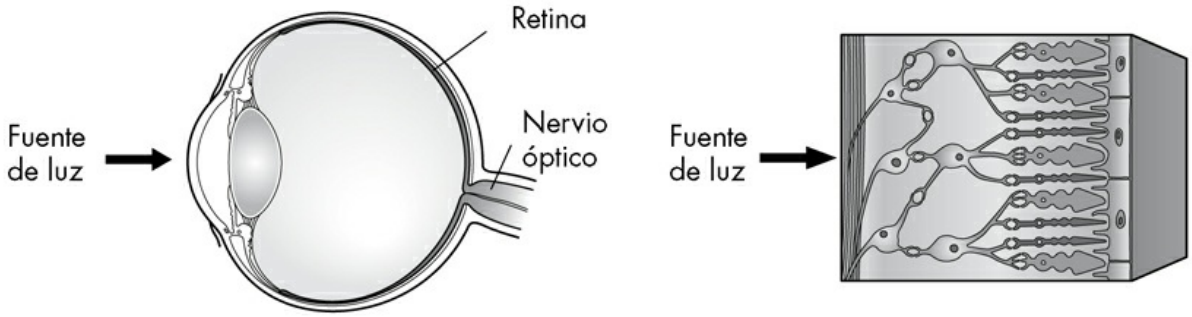
era un físico, pero sus contribuciones a la biología y a la psicología fueron incluso mayores), dijo del ojo: «Si un óptico quisiera venderme un instrumento que tuviera todos estos defectos, me creería con toda la razón para acusarle de negligencia y devolvérselo». Una razón por la que el ojo parece mejor de lo que habría juzgado Helmholtz, el físico, es que el cerebro hace un trabajo impresionante para limpiar después las imágenes, como si fuera algún tipo de Photoshop ultrasofisticado. En lo que se refiere a la óptica, el ojo humano consigue calidad Zeiss o Nikon solo en la fóvea, la parte central de la retina que utilizamos para leer. Cuando capturamos una escena, movemos la fóvea sobre diferentes partes, mirando a cada una de ellas con el máximo detalle y precisión, y las herramientas del Photoshop del cerebro nos engañan para hacernos pensar que estamos viendo toda la escena con la misma precisión. Una lente de gran calidad Zeiss o Nikon realmente *muestra* toda la escena con una claridad casi igual.

Por tanto, lo que le falta al ojo en la parte óptica, el cerebro lo fabrica con un sofisticado *software* de simulación de imágenes. Pero todavía no he mencionado el ejemplo más deslumbrante de imperfección en la parte óptica: la retina está situada al revés.

Imagínese a un Helmholtz en sus últimos años, al que un ingeniero le muestra una cámara digital con su pantalla de minúsculas fotocélulas, preparada para capturar imágenes y proyectarlas directamente sobre la superficie de esa pantalla. Esto tiene sentido, y obviamente cada fotocélula tiene un cable que la conecta a un dispositivo computacional de algún tipo, donde se integran las imágenes. También tiene sentido. Helmholtz no la habría devuelto.

Pero ahora suponga que le digo que las «fotocélulas» de los ojos están mirando hacia atrás, apuntando hacia el lado contrario al de la escena. Los «cables» que conectan las fotocélulas al cerebro pasan por la superficie de la retina, por lo que los rayos de luz tienen que pasar a través de un denso entramado de cables antes de alcanzar las fotocélulas. Esto no tiene sentido —y de hecho aún se complica más—. Una consecuencia de que las fotocélulas estén mirando hacia atrás es que los cables que transportan los datos tienen que pasar de alguna forma a través de la retina y volver al cerebro. Lo que ocurre en el ojo de los vertebrados es que todos esos nervios convergen en un agujero en la retina a través del cual pasan al otro lado. El agujero repleto de nervios se llama «punto ciego», porque es

ciego, pero «punto» es un nombre demasiado halagador, ya que es bastante grande, más parecido a un *parche* ciego que, de nuevo, no nos molesta gracias al *software* «Photoshop automático» que tiene el cerebro. Una vez más, debemos rechazarlo. No solo es un mal diseño, es el diseño de un completo idiota.



Ojo humano (izquierda) y el detalle de los conos y los conectores de las fotocélulas

Imagen 82

¿O no lo es? Si lo fuera, el ojo sería fatal para ver, y no es así. De hecho es muy bueno. Es bueno porque la selección natural, trabajando como una limpiadora de innumerables pequeños detalles, consiguió arreglar el gran error original de instalar la retina hacia atrás y logró recuperar el instrumento de precisión de alta calidad. Esto me recuerda la historia del telescopio espacial Hubble. Seguro que recordará que, cuando fue puesto en órbita en 1990, se descubrió que el Hubble tenía una gran fallo. Debido a un error de calibración que no fue detectado en el aparato cuando estaba siendo pulido, el espejo principal quedó ligera pero seriamente deformado. El telescopio fue puesto en órbita y luego se descubrió que era defectuoso. Favorecida por la existencia de gran cantidad de recursos, se adoptó la resolución de enviar astronautas al telescopio y lograron colocarle lo que resultaron ser unas gafas. A partir de entonces el telescopio funcionó muy bien, y se realizaron nuevas mejoras tres veces más en misiones tripuladas. Lo que estoy sugiriendo es que cabe la posibilidad de que un fallo importante de diseño —incluso uno garrafal — sea corregido mediante arreglos posteriores, cuya ingeniosidad y complejidad pueden, en las circunstancias apropiadas, compensar perfectamente el error inicial. Generalmente, las grandes mutaciones en la evolución, incluso si causan mejoras en la dirección apropiada, requieren

muchos ajustes posteriores, una operación de limpieza realizada por muchas mutaciones pequeñas que llegan después y son favorecidas por la selección, porque suavizan los ásperos bordes dejados por la gran mutación inicial. Esta es la razón por la que los humanos y los halcones vemos tan bien, a pesar del error garrafal en el diseño inicial. De nuevo citando a Helmholtz:

> El ojo tiene todos los posibles defectos que se pueden encontrar en un instrumento óptico, e incluso algunos propios que solo él tiene. Pero todos están tan bien compensados que la inexactitud de la imagen que resulta de su presencia excede muy poco, bajo las condiciones ordinarias de iluminación, los límites fijados para la exquisitez de la sensación por las dimensiones de los conos retinales. Pero tan pronto como hacemos nuestras observaciones bajo condiciones diferentes, nos damos cuenta de la aberración cromática, el astigmatismo, los puntos ciegos, las sombras de las venas, la transparencia imperfecta del medio y todos los otros defectos de los que he hablado.

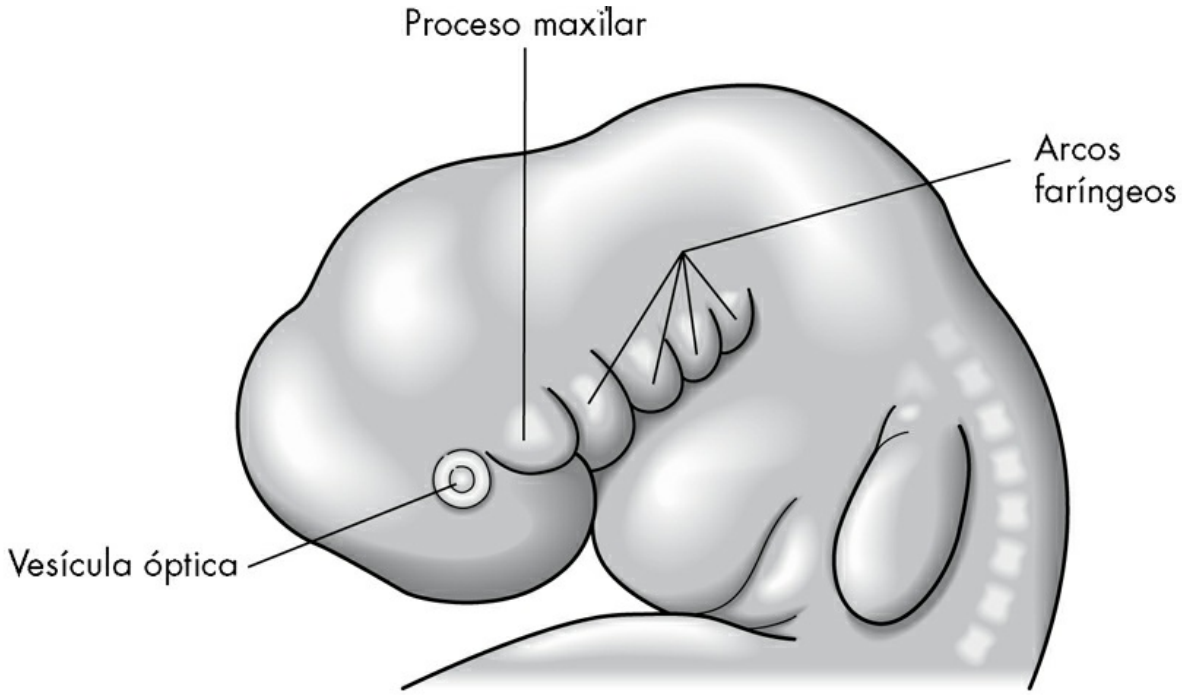
Diseño nada inteligente

Este patrón de errores de diseño importantes, compensados por arreglos posteriores, es exactamente lo que no deberíamos esperar si realmente hubiera un diseñador trabajando. Esperaríamos errores desafortunados, como la aberración esférica del espejo del Hubble, pero no una estupidez obvia, como que la retina esté instalada al revés. Los errores garrafales de este tipo no provienen de un diseño pobre, sino de la *historia.*

Uno de mis ejemplos favoritos, desde que me lo contó el profesor J. D. Currey cuando era mi tutor en la universidad, es el nervio laríngeo recurrente [76]. Se trata de una rama de uno de los nervios craneales, los que van directamente al cerebro en lugar de pasar por la médula espinal. Uno de los nervios craneales, el vago, tiene varias ramas, dos de las cuales llegan al corazón y otras dos van a cada lado de la laringe (la caja de resonancia de los mamíferos). En cada lado del cuello, una de las ramas del nervio laríngeo va sin rodeo alguno a la laringe, siguiendo una ruta directa como la que habría elegido un diseñador. El otro va a la laringe trazando una desviación sorprendente. Baja hacia el pecho, da la vuelta

alrededor de una de las arterias principales que sale del corazón (son arterias diferentes en el lado izquierdo y en el derecho, pero el principio es el mismo) y luego se dirige hacia el cuello para llegar a su destino.

Si piensa en esto como en el resultado de un diseño, se dará cuenta de que el nervio laríngeo recurrente es un desastre. Helmholtz habría tenido todavía más razones para devolverlo que las que tuvo con el ojo. Pero, como ocurre con el ojo, todo se explica a la perfección en el momento en que se olvida el diseño y, en su lugar, se piensa en la historia. Para entenderlo, necesitamos volver al tiempo en que nuestros antepasados eran peces. Los peces tienen un corazón con dos cavidades, a diferencia del nuestro, que tiene cuatro. El corazón bombea sangre hacia delante por una gran arteria llamada «aorta ventral». La aorta ventral se bifurca en (un máximo de) seis pares de ramas que conducen a seis agallas en cada lado. La sangre pasa a través de las agallas, donde se carga de oxígeno. Por encima de las agallas es recogida por otros seis pares de vasos sanguíneos que confluyen en otro gran vaso denominado «aorta dorsal», la cual alimenta al resto del cuerpo. Los seis pares de arterias de las agallas son una evidencia del plano corporal *segmentado* de los vertebrados, que es más claro y más obvio en los peces que en nosotros. Es fascinante lo obvio que resulta en los *embriones* humanos, cuyos «arcos faríngeos» derivan claramente de las agallas ancestrales, como se puede ver al observar detalladamente la anatomía. Por supuesto que no funcionan como agallas, pero los embriones humanos de cinco semanas se pueden ver como pequeños peces rosas, con agallas. No puedo evitar preguntarme, una vez más, por qué las ballenas y los delfines, los dugongos y los manatíes no han reevolucionado para recuperar agallas funcionales. El hecho de que, como todos los mamíferos, tengan en los arcos faríngeos el andamio embrionario para desarrollar agallas sugiere que no debería ser muy difícil hacerlo. No sé por qué no lo han hecho, pero estoy bastante seguro de que hay una buena razón, y alguien la conoce o sabe cómo investigarla.



Arcos faríngeos en un embrión humano

Imagen 83

Todos los vertebrados tienen un plano corporal segmentado, pero en los mamíferos adultos, a diferencia de los embriones, solo es evidente en la región espinal, donde las vértebras y las costillas, los vasos sanguíneos, los bloques musculares (miotomas) y los nervios siguen un patrón de repetición modular desde la parte frontal hacia la espalda. Cada segmento de la columna vertebral tiene dos grandes nervios que salen de la médula espinal a cada lado, llamados «raíz dorsal» y «raíz ventral». Estos nervios se dedican principalmente a su tarea, la que quiera que sea, en la proximidad de las vértebras de las cuales brotan, pero algunos se adentran hasta las piernas y algunos otros hasta los brazos.

La cabeza también sigue ese mismo plano segmentado, pero es más difícil de discernir, incluso en los peces, porque los segmentos, en lugar de estar situados claramente en una disposición longitudinal como lo están en la columna vertebral, han acabado todos revueltos a lo largo del tiempo evolutivo. Uno de los triunfos de la anatomía comparativa y la embriología del siglo XIX y principios del XX fue discernir las huellas fantasmagóricas de los segmentos en la cabeza. Por ejemplo, el primer arco branquial en los peces sin mandíbula, como las lampreas, (y en embriones de vertebrados

con mandíbula) se corresponde con la mandíbula en aquellos vertebrados que la tienen (esto es, todos los vertebrados modernos excepto las lampreas y los mixines).

Los insectos también tienen, junto con otros artrópodos como los crustáceos, tal como vimos en el capítulo 10, un plano corporal segmentado. Y fue un triunfo similar descubrir que la cabeza de los insectos contiene —de nuevo todo revuelto— los primeros seis segmentos de lo que, en sus antepasados remotos, habría sido un tren de módulos igual que el resto del cuerpo. Otro triunfo de la embriología y la genética de finales del siglo XX fue mostrar que las segmentaciones de los insectos y de los vertebrados, lejos de ser independientes entre sí como a mí me enseñaron, están controladas por conjuntos paralelos de genes, los llamados «genes hox», que son reconocibles en los insectos y en los vertebrados, y en muchos otros animales, ¡y que incluso los genes están dispuestos en el orden correcto secuencial en los cromosomas! Esto es algo que ninguno de mis profesores habría soñado cuando yo era un estudiante de grado y aprendía que la segmentación de los vertebrados y los insectos es completamente distinta. Los animales de filos diferentes (por ejemplo, los insectos y los vertebrados) están mucho más cerca de lo que solíamos pensar. Y eso también es debido a un linaje compartido. El plano hox fue ya esbozado en el gran antepasado de todos los animales con simetría bilateral. Todos los animales son parientes mucho más cercanos entre sí de lo que solíamos pensar.

Volviendo a la cabeza de los vertebrados: se cree que los nervios craneales son descendientes desfigurados de los nervios segmentales que, en nuestros ancestros primitivos, constituyeron la parte frontal de una serie continuada de raíces dorsales y ventrales, igual que las que todavía surgen de nuestra médula espinal. Y los vasos sanguíneos principales de nuestro pecho son las reliquias y remanentes de los vasos sanguíneos claramente segmentados que alimentaban las agallas. Podríamos decir que el pecho de los mamíferos ha desbaratado el patrón de segmentación de las agallas de pez ancestrales, de la misma forma que, antes, el pez había desbaratado el patrón de segmentación de sus antepasados todavía más remotos.

Los embriones humanos también tienen vasos sanguíneos que alimentan sus «agallas», que son muy similares a las de los peces. Hay dos aortas ventrales, una en cada lado, con arcos segmentales aórticos, uno para cada «agalla» de cada lado, que conectan con las aortas dorsales

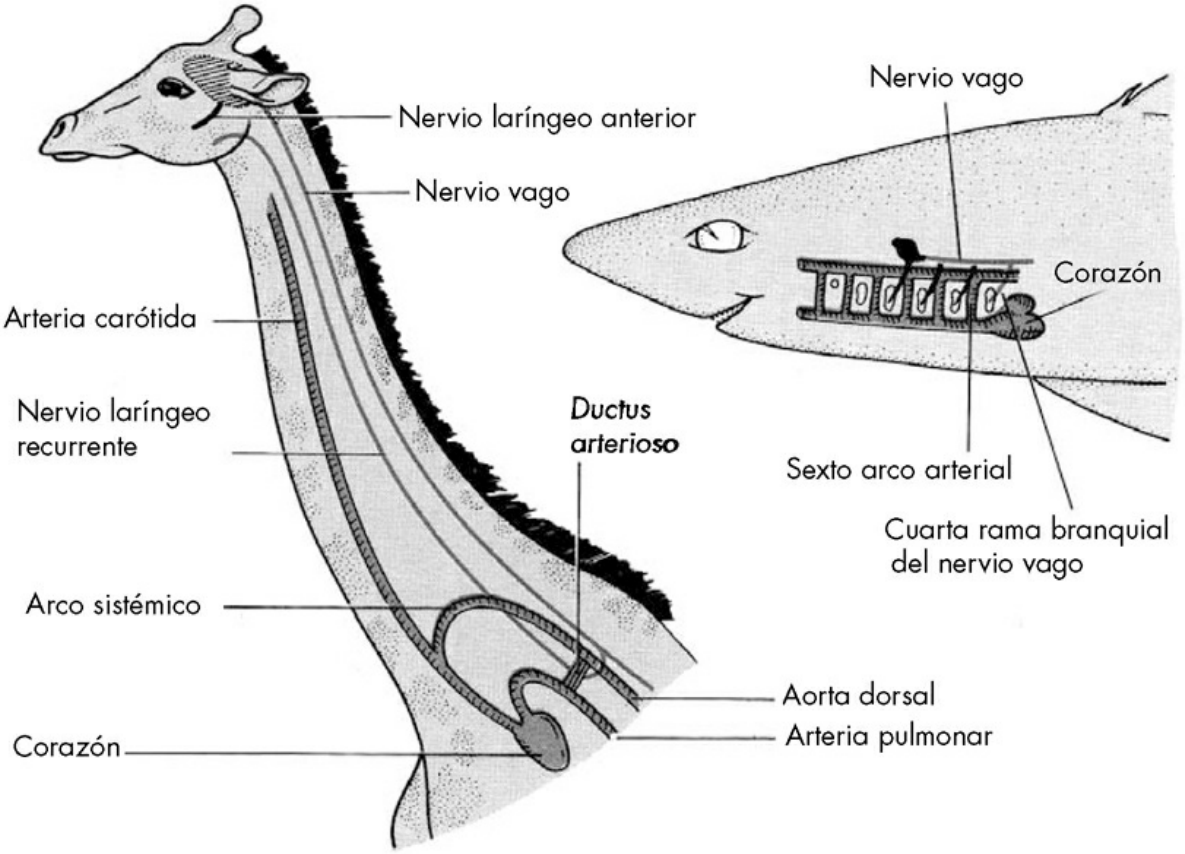
correspondientes. La mayoría de estos vasos sanguíneos desaparecen al final del desarrollo embrionario, pero se puede ver cómo el patrón en el adulto está derivado del plano embrionario, y también del ancestral. Si observáramos un embrión humano unos veintiséis días después de la concepción, podríamos ver que el suministro sanguíneo a las «agallas» se parece mucho al suministro sanguíneo segmental de las agallas de los peces. En las siguientes semanas de gestación, el patrón de los vasos sanguíneos se simplifica paso a paso y pierde su simetría original, y, cuando el niño ya ha nacido, su sistema circulatorio se ha desviado claramente hacia la izquierda —a diferencia de la clara simetría que presenta el joven embrión con aspecto de pez—.

No entraré aquí en los detalles turbios de cuáles de nuestras grandes arterias del pecho son supervivientes de las seis arterias de las branquias. Todo lo que necesitamos saber para comprender la historia de nuestros nervios laríngeos recurrentes es que, en los peces, el nervio vago tiene ramificaciones que alcanzan a las tres últimas de las seis agallas, y que es natural para ellos, por tanto, pasar detrás de las arterias correspondientes de las agallas. No hay nada «recurrente» en estas ramificaciones: buscan sus órganos finales, las agallas, por la ruta más directa y lógica.

Durante la evolución de los mamíferos, sin embargo, el cuello se alargó (los peces no tienen cuello) y las agallas desaparecieron, convirtiéndose algunas en cosas útiles, como la tiroides y la paratiroides, y en partes y componentes que se combinan para formar la laringe. Esas otras partes útiles, incluidas las que forman la laringe, recibían su suministro de sangre y sus conexiones nerviosas de los descendientes evolutivos de los vasos sanguíneos y nervios que, alguna vez, alimentaron las agallas en una secuencia ordenada. A medida que los antepasados de los mamíferos evolucionaron más y más a partir de sus ancestros, los nervios y los vasos sanguíneos fueron estirados y empujados en distintas direcciones, lo que distorsionó sus relaciones espaciales relativas. El pecho y el cuello de los vertebrados acabaron siendo un gran lío, a diferencia de la repetitividad clara y simétrica de las agallas de los peces. Y los nervios laríngeos recurrentes fueron víctimas muy exageradas de esta distorsión.

La imagen siguiente, extraída de un libro de 1986 escrito por Berry y Hallam, muestra cómo el nervio laríngeo carece de desvíos en un tiburón. Para ilustrar el desvío en un mamífero, Berry y Hallam eligieron —¿qué otro ejemplo podría haber más impactante?— una jirafa.

En una persona, el desvío que toma el nervio laríngeo recurrente supone un rodeo de unos pocos centímetros. Pero en una jirafa llega a ser de, quizá, hasta cinco metros en un adulto de gran tamaño. El día siguiente al día de Darwin de 2009 (su ducentésimo cumpleaños), tuve el privilegio de pasarlo con un equipo de anatomistas comparativos y patólogos veterinarios del Royal Veterinary College, cerca de Londres, diseccionando una jirafa joven que, lamentablemente, había muerto en el zoo. Fue un día memorable, para mí casi una experiencia surrealista. El escenario de operaciones era literalmente un teatro, con una enorme mampara de cristal separando el «escenario» de las filas de asientos donde los estudiantes de veterinaria observaban durante horas. A lo largo del día —debió de ser una experiencia fuera de lo normal en sus vidas como estudiantes— estuvieron sentados en el teatro en penumbra, observando a través del cristal la escena brillantemente iluminada y escuchando las palabras del equipo de disección, en el que todos llevaban micrófonos de garganta, igual que yo y el equipo de producción de televisión que estaba filmando un documental para Channel Four. La jirafa estaba tumbada sobre la gran mesa de disección inclinada, con una pata sujeta en el aire mediante un gancho y una polea, y su enorme y vulnerable cuello quedaba expuesto a las brillantes luces. Todos los que estábamos en el mismo lado del cristal que la jirafa teníamos órdenes estrictas de vestir batas de color naranja y botas blancas, lo que de alguna forma ensalzaba el carácter onírico que ya tenía la jornada.



Nervio laríngeo en la jirafa y en el tiburón

Imagen 84

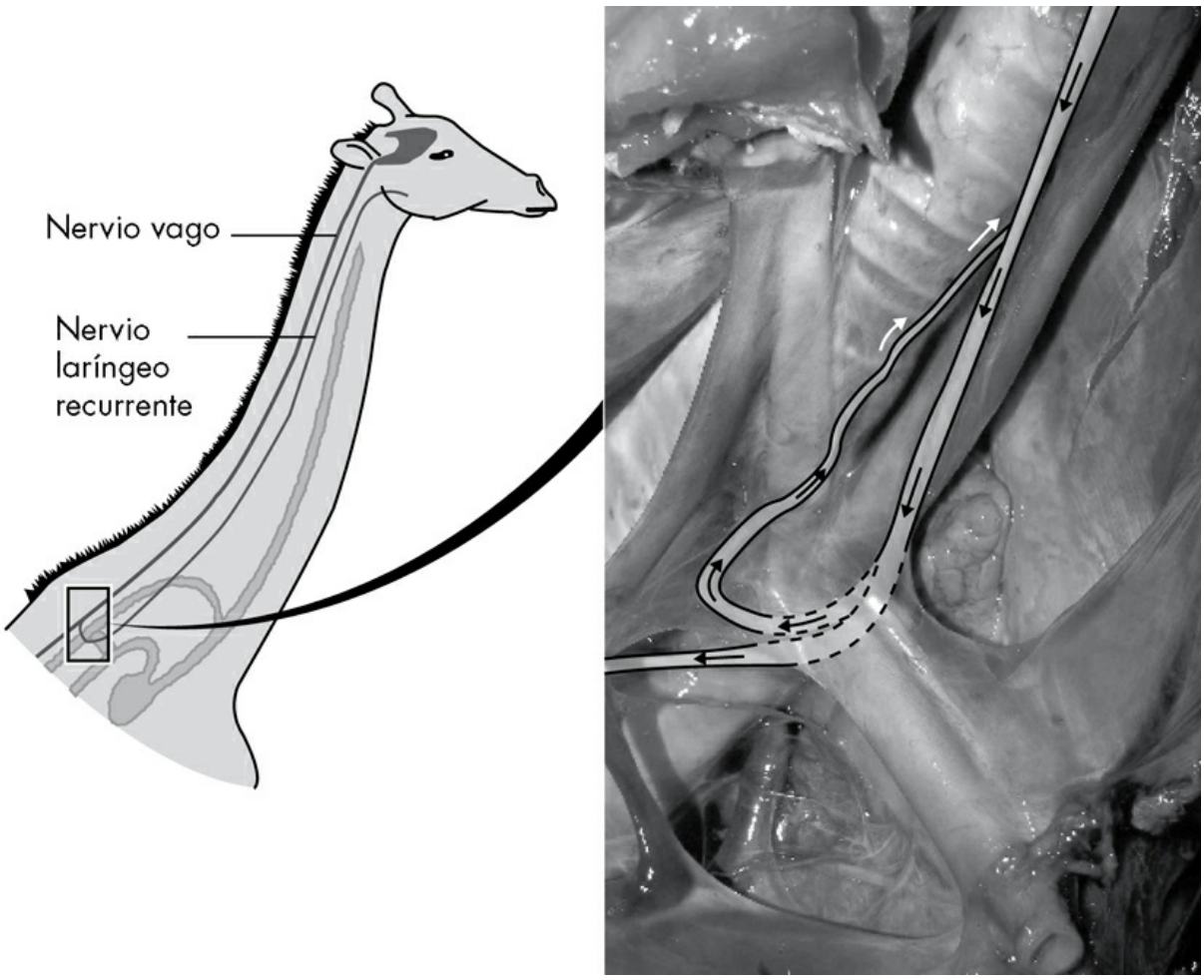
Como testimonio de la longitud de la desviación que toma el laríngeo recurrente, varios miembros del equipo de anatomistas trabajaban simultáneamente en diferentes partes del nervio —la laringe cerca de la cabeza, la recurrencia misma cerca del corazón y todos los estadios intermedios—, sin estorbarse y apenas sin necesidad de comunicarse entre sí. Pacientemente liberaron todo el curso del nervio laríngeo recurrente: una tarea difícil que no se había logrado, hasta donde yo sé, desde que Richard Owen, el gran anatomista victoriano, lo hiciera en 1837. Fue complicado porque el nervio es muy estrecho, casi como un hilo en la parte recurrente (supongo que lo debería haber sabido, pero a pesar de todo fue una sorpresa cuando lo vi), y se pierde fácilmente en la red de membranas y músculos que rodean la tráquea. En su trayecto, el nervio (en este punto está unido al nervio vago, de mayor tamaño) pasa a pocos centímetros de la laringe, que es su destino final. Luego sigue hacia abajo durante toda la longitud del cuello antes de girar en redondo y recorrer

hacia arriba todo el camino de nuevo. Estaba muy impresionado con la habilidad de los catedráticos Graham Mitchell y Joy Reidenberg, y de los demás expertos que practicaban la disección, y descubrí cómo aumentaba mi respeto hacia Richard Owen (un enemigo implacable de Darwin). El creacionista Owen, sin embargo, no llegó a la conclusión correcta. Cualquier diseñador inteligente habría eliminado el camino descendente del nervio laríngeo, cambiando un trayecto de muchos metros por uno de unos pocos centímetros.

Aparte del desperdicio de recursos que supone construir ese gran nervio, no puedo evitar preguntarme si las vocalizaciones de la jirafa están sujetas a retardo, como si fuera un corresponsal en el extranjero hablando a través de un enlace de satélite. Una autoridad en la materia ha dicho: «A pesar de poseer una laringe bien desarrollada y una naturaleza gregaria, la jirafa solo puede emitir gemidos y balidos de baja intensidad». Una jirafa tartamuda es una imagen interesante, pero no seguiré con eso aquí. El tema importante es que toda esta historia del desvío es un ejemplo espléndido de lo lejos que están las criaturas vivas de un buen diseño. Y, para un evolucionista, la cuestión importante es por qué la selección natural no trabaja como lo haría un ingeniero: volver al tablero de dibujo y rehacer las cosas para que funcionen mejor. Es la misma pregunta que nos encontramos una y otra vez en este capítulo, y que he intentado responder de varias formas. El laríngeo recurrente conduce a una respuesta en términos de lo que los economistas llaman el «coste marginal».

A medida que el cuello de la jirafa fue prolongándose lentamente a lo largo del tiempo evolutivo, el coste de una desviación —ya sea el coste económico o el coste en términos de «tartamudeo»— aumentó gradualmente, y quiero resaltar la palabra «gradualmente». El coste *marginal* de cada milímetro de aumento es *pequeño*. Una vez que el cuello de la jirafa comenzó a acercarse a su impresionante longitud, el coste *total* de la desviación podría haber comenzado a aproximarse al punto en que —hipotéticamente— un individuo mutante habría sobrevivido mejor si las fibras descendentes de su nervio laríngeo se hubieran apartado del nervio vago y recorrido la pequeña distancia que hay hasta la laringe. Pero la mutación que se necesitaba para conseguir este «salto mortal» hubiera provocado un cambio de gran magnitud —incluso un trastorno— en el desarrollo embrionario. Muy probablemente, la mutación necesaria nunca se ha llegado a producir. Incluso si lo hizo, podría haber tenido desventajas

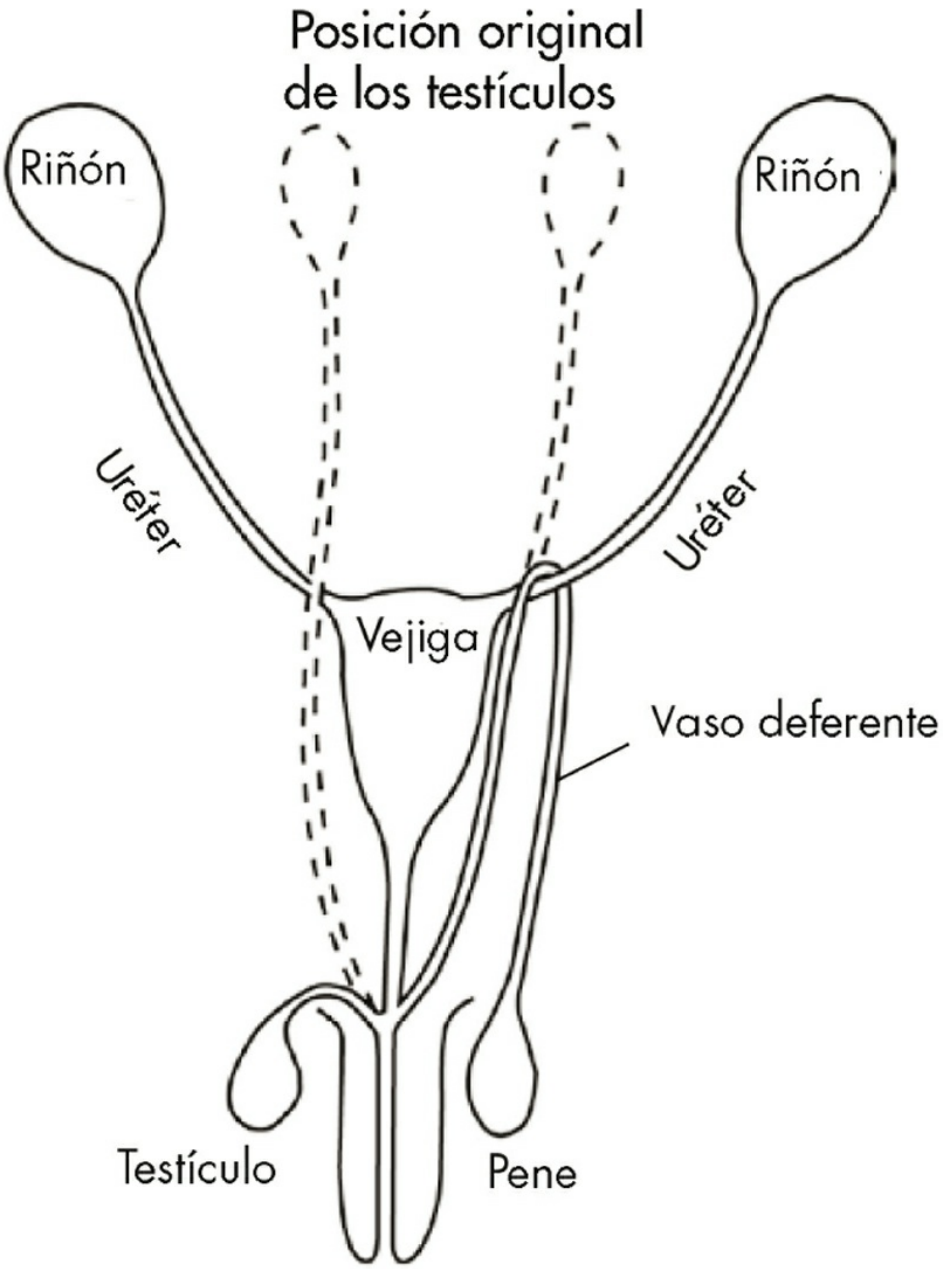
—inevitables en cualquier trastorno importante durante el desarrollo de un proceso sensible y delicado—. E incluso si estas desventajas pudieran haber sido finalmente superadas por las ventajas de puentear la desviación, el coste *marginal* de cada milímetro de *aumento* en la desviación, *comparado con la desviación existente*, es pequeño. Es más, si se pudiera haber planteado una solución obtenida «volviendo al tablero de dibujo», la mejora necesaria sería pequeña en comparación con el desvío existente, y el coste *marginal* de esta pequeña mejora habría sido pequeño. Más pequeño, y estoy haciendo una conjetura, que el coste del «gran trastorno» que se requeriría para llegar a la solución más elegante.



Desvío tomado por el nervio laríngeo en una jirafa

Imagen 85

Todo esto nos separa del tema principal, que es que el nervio laríngeo recurrente en cualquier mamífero es una buena evidencia en contra de un diseñador. ¡Y en la jirafa pasa de buena a espectacular! Esta desviación absurdamente larga —bajando por el cuello de la jirafa y ascendiendo de nuevo— es exactamente el tipo de cosa que esperamos de la evolución por selección natural, y exactamente el tipo de cosa que *no* esperamos de un diseñador inteligente.



Ruta del vaso deferente desde los testículos hasta el pene

Imagen 86

George C. Williams es uno de los biólogos evolutivos estadounidenses más reconocidos (su discreción y sus marcadas facciones recuerdan a uno de los presidentes estadounidenses más respetados —que casualmente nació el mismo día que Charles Darwin y fue también tenido por discreto—). Williams llamó la atención sobre otro desvío, similar al tomado por el nervio laríngeo, pero en el otro extremo del cuerpo. El vaso deferente es el conducto que lleva el esperma desde los testículos al pene. La ruta más directa es la que se muestra en la parte izquierda del dibujo siguiente. La ruta real que sigue el vaso deferente se muestra en la parte derecha del dibujo. Existe un desvío ridículo alrededor del uréter, el tubo que lleva la orina desde el riñón hasta la vejiga. Si hubiera sido diseñado, nadie podría negar seriamente que el diseñador había cometido un error. Pero, como ocurre con el nervio laríngeo recurrente, todo se aclara cuando miramos la historia evolutiva. La posición original de los testículos se marca en el dibujo con la línea de puntos. Cuando, durante la evolución de los mamíferos, los testículos descendieron a su posición actual en el escroto (por razones que no están claras pero que se piensa están relacionadas con la temperatura), el vaso deferente se quedó, desafortunadamente, colgando de forma equivocada sobre la uretra. En lugar de redirigir el conducto, como habría hecho cualquier ingeniero razonable, la evolución simplemente lo mantuvo, alargándolo —una vez más, el coste marginal de cada pequeño aumento de la longitud en el desvío habría sido, a su vez, pequeño—. Y, de nuevo, es un ejemplo maravilloso de un error inicial compensado a posteriori, en lugar de corregido adecuadamente sobre el tablero de dibujo. Los ejemplos como este menoscaban, con seguridad, la posición de aquellos que anhelan el «diseño inteligente».

El cuerpo humano está repleto de lo que, en cierto sentido, llamamos imperfecciones, pero, desde otra perspectiva, deberían ser vistas como compromisos ineludibles que resultan de nuestra larga historia ancestral como descendientes de otros tipos de animales. Las imperfecciones son inevitables cuando la «vuelta al tablero de dibujo» deja de ser una opción —cuando las mejoras se pueden alcanzar solo con modificaciones *ad hoc* sobre lo que ya está ahí—. Imagine el desastre que sería el motor a reacción si sir Frank Whittle y el doctor Hans von Ohain, sus dos inventores independientes, se hubieran visto obligados a acatar una regla

que dijera: «No les está permitido comenzar con una hoja en blanco en su tablero de dibujo. Tienen que comenzar con un motor de explosión y modificarlo, pieza por pieza, tornillo a tornillo, remache a remache, desde el motor de explosión "ancestral" hasta su "descendiente", el motor a reacción». Y lo que es peor, todos los modelos intermedios tienen que volar y cada uno de los que integra la cadena tiene que incluir una ligera mejora sobre su predecesor. Podemos ver fácilmente que el motor resultante estaría lleno de todo tipo de reliquias históricas y de anomalías e imperfecciones. Y cada imperfección sería parcheada con un conjunto añadido de cachivaches compensatorios, cada uno de los cuales intentaría suplir lo mejor posible la desafortunada prohibición que impide volver al tablero de dibujo.

El argumento está planteado, pero una mirada más cercana a la innovación biológica podría proporcionar una analogía diferente a la del caso del motor de explosión/reacción. Sería probable que una innovación importante (el motor a reacción en nuestra analogía) evolucionase no de un órgano antiguo que hiciera el mismo trabajo (el motor de explosión en este caso), sino de algo completamente distinto, que realizara una función totalmente diferente. Valga un buen ejemplo: cuando nuestros antepasados peces comenzaron a respirar aire, no modificaron sus agallas para crear los pulmones (tal como hicieron algunos de los peces modernos que respiran aire, como la perca trepadora *Anabas);* en lugar de eso, modificaron una bolsa del intestino. Y más tarde, por cierto, los teleósteos —lo que quiere decir casi cualquier pez que nos podamos encontrar, excepto los tiburones y los de su clase— modificaron el pulmón (que había evolucionado previamente en antepasados que ocasionalmente respiraban aire) para convertirlo en otro órgano vital, que no tiene nada que ver con la respiración: la vejiga natatoria.

La vejiga natatoria es quizá la clave más importante para el éxito de los teleósteos, y bien merece un paréntesis para explicarla. Es una vejiga interna llena de gas que puede ser ajustada para mantener al pez en equilibrio hidrostático a cualquier profundidad deseada. Si alguna vez jugó al «buzo cartesiano» siendo niño, reconocerá el principio, pero un pez teleósteo utiliza una variante interesante. Un buzo cartesiano es un juguete cuya parte más reseñable es un pequeño recipiente vertical que contiene una burbuja de aire, y que flota en equilibrio en una botella de agua. El número de moléculas de aire en la burbuja es fijo, pero se puede disminuir

el volumen (y aumentar la presión, siguiendo la ley de Boyle) [77] al presionar hacia abajo el corcho de la botella. O se puede aumentar el volumen de aire (y disminuir la presión de la burbuja) levantando el corcho. Como mejor se consigue el efecto es con uno de esos tapones a rosca gruesos que se ponen en las botellas de sidra. Cuando bajas o subes el tapón, el buzo se mueve hacia arriba o hacia abajo hasta que alcanza su nuevo punto de equilibrio hidrostático. Se puede subir y bajar al buzo en la botella mediante pequeños ajustes del tapón y, por tanto, de la presión.

Un pez es un buzo cartesiano con una pequeña diferencia. La vejiga natatoria es su «burbuja» y funciona de la misma forma, salvo que el número de moléculas de gas en la vejiga no es fijo. Cuando el pez quiere subir a un nivel más alto en el agua, libera moléculas de gas desde la sangre hasta la vejiga, aumentando su volumen. Cuando quiere hundirse, absorbe esas moléculas desde la vejiga hasta la sangre, disminuyendo así el volumen de la vejiga. La vejiga natatoria significa que el pez no tiene que realizar trabajo muscular, como le ocurre al tiburón, para mantenerse a la profundidad deseada. Está en equilibrio hidrostático a cualquier profundidad. La vejiga natatoria realiza esa función, liberando así los músculos para dedicarlos a la propulsión activa. Los tiburones, por el contrario, tienen que mantenerse nadando todo el tiempo, si no lo hacen se hunden hacia el fondo, aunque muy despacio porque tienen sustancias de baja densidad en sus tejidos que les dan una cierta flotabilidad. La vejiga natatoria es, por tanto, un pulmón adaptado, que constituye a su vez una bolsa del intestino adaptada (no, como habríamos esperado, una cámara de agallas adaptada). Y en algunos peces, la vejiga natatoria ha sido readaptada otra vez como órgano auditivo, una especie de tímpano. La historia está escrita por todo el cuerpo, no solo una vez, sino de forma repetida, en un exuberante palimpsesto.

Hemos sido animales terrestres durante unos cuatrocientos millones de años, y hemos caminado sobre nuestras extremidades posteriores durante el 1% de ese tiempo, aproximadamente. El 99% de nuestro tiempo sobre la tierra, hemos tenido una columna vertebral más o menos horizontal y hemos caminado sobre cuatro patas. No sabemos con seguridad qué ventajas selectivas se presentaron ante los primeros individuos que se levantaron y caminaron sobre sus patas traseras, y voy a dejar este asunto de lado. Jonathan Kingdon ha escrito todo un libro sobre este tema *(Lowly Origin* [Lento origen]) y yo he tratado el asunto con

cierto detalle en *El cuento del antepasado*. Quizá no fue un gran cambio cuando sucedió, porque otros primates como los chimpancés, algunos monos y los encantadores lémures sifaka de Verreaux lo hacen de vez en cuando. Caminar habitualmente sobre dos patas como solo lo hacemos nosotros tiene, sin embargo, implicaciones de gran alcance por todo el cuerpo, que requieren muchos ajustes compensatorios. Se puede argumentar que ni un solo músculo o hueso del cuerpo, en cualquier posición que ocupe, ha ignorado la necesidad de cambiar para reconciliar algún detalle, por oscuro que sea, por lejano que parezca y por poca y débil conexión que pueda tener, con un cambio importante en el modo de caminar. Un reajuste similar debe seguir a cada cambio importante que se haya hecho en la forma de vida: el paso de la tierra al agua, del agua a la tierra, al aire o al espacio subterráneo. No se pueden separar los cambios obvios del cuerpo y tratarlos de forma aislada. Decir que hay implicaciones en cada cambio es decir poco. Hay cientos, miles de implicaciones que se ramifican, formando ramificaciones de ramificaciones. La selección natural está siempre retocando, cambiando la forma, «toqueteando», tal como lo expresa el gran biólogo molecular francés François Jacob.

Veamos otra forma de entenderlo. Cuando hay un cambio importante en el clima, digamos una edad del hielo, lo lógico sería esperar que la selección natural ajustara los animales a ese cambio —con el desarrollo de una capa más gruesa de pelo, por ejemplo—. Pero el clima *externo* no es el único tipo de «clima» que tenemos que considerar. Sin que haya un cambio externo, si aparece una nueva mutación y es favorecida por la selección natural, todos los otros genes del genoma lo experimentarán como un cambio en el «clima genético» interno. Este es un cambio al que se tienen que ajustar igual que a un cambio en el clima. La selección natural tiene que llegar luego con ajustes para compensar un cambio importante en el «clima genético», exactamente como lo haría si hubiera ocurrido un cambio en el clima externo. El desplazamiento inicial del modo de caminar de cuatro a dos patas podría haber sido generado «internamente», en lugar de haberse debido a una presión del entorno exterior. En cualquier caso, habría iniciado una complicada cascada de consecuencias, cada una de las cuales habría necesitado ajustes compensatorios.

«El diseño no inteligente» habría sido un buen título para este capítulo. También podría ser, de hecho, un buen título para un libro entero que versara sobre las imperfecciones de la vida, como un indicador convincente de la ausencia de un plan deliberado, y más de un autor lo ha aprovechado en sus obras. De entre todos ellos, y ya que a mí me gusta la sana irreverencia del inglés australiano («Entonces ¿de dónde surgió el diseño inteligente, como un forúnculo en el culo?»), elegí el delicioso libro de Robyn Williams, decano de los divulgadores científicos de Sidney. Después de quejarse de la agonía a la que su espalda le somete cada mañana, en términos que no le sentarían mal al típico llorón (no me malinterpreten, yo simpatizo con él profundamente), Williams continúa diciendo «casi todas las espaldas podrían hacer una reclamación de garantía, si la hubiese. Si [Dios] *fuera* responsable del diseño de la espalda, deberíamos aceptar que no fue uno de sus mejores momentos, y se le debió de juntar un montón de trabajo al final de los Seis Días». El problema, por supuesto, es que nuestros antepasados caminaron durante millones de años con la columna vertebral más o menos horizontal, y a ella no le hace ninguna gracia el reajuste repentino impuesto en los últimos pocos millones de años. Y el asunto, una vez más, es que un diseñador real de un primate que camina erguido habría vuelto al tablero de dibujo y hecho el trabajo correctamente, en lugar de comenzar con un cuadrúpedo y realizar un montón de ajustes.

Williams menciona después la bolsa de ese animal icónico australiano, el koala, que se abre hacia abajo —y no es una gran idea en un animal que pasa la mayor parte del día aferrado a los troncos de los árboles — en lugar de hacia arriba como en el canguro. Una vez más la razón es el legado de la historia. Los koalas descienden de un antepasado parecido al wombat. Los wombats son grandes cavadores:

> … moviendo hacia atrás sus grandes patas llenas de tierra como una excavadora horadando un túnel. Si la bolsa de su antepasado hubiera apuntado hacia arriba, sus bebés tendrían los ojos y los dientes siempre llenos de tierra. Así que apunta hacia atrás y, cuando un día la criatura suba a un árbol, quizá para explotar una fuente de alimento fresco, el «diseño», demasiado complicado de cambiar, seguirá siendo así.

Igual que ocurre con el nervio laríngeo recurrente, podría ser teóricamente posible cambiar la embriología del koala para darle la vuelta a la bolsa. Pero —supongo— el trastorno embriológico responsable de ese gran cambio convertiría a los individuos intermedios en peores koalas que los que ahora tienen que lidiar con las cosas tal como están.

Otra consecuencia de nuestro propia transición de cuadrúpedos a bípedos se relaciona con los senos de la cara, que tanto dolor producen a muchos de nosotros (incluyéndome a mí mientras escribo), porque su agujero de drenaje está realmente en el último lugar que un diseñador sensato habría elegido. Williams cita a un colega australiano, el profesor Derek Denton [78]: «Los grandes senos o cavidades maxilares están detrás de las mejillas a cada lado de la cara. Tienen su agujero de drenaje en la parte de arriba, lo que no es muy buena idea en términos de aprovechamiento de la gravedad para ayudar al drenaje de los fluidos». En un cuadrúpedo, la «parte de arriba» no es la parte de arriba, sino la parte frontal, y la posición del agujero de drenaje tiene mucho más sentido: el legado de la historia, una vez más, está escrito en nosotros.

Williams cita después a otro colega australiano, que comparte con él el Premio Nacional por haber acuñado una buena frase sobre las avispas icneumónidas, cuyo diseñador, si hubo alguno, «debe de haber sido un sádico bastardo». Aunque había visitado Australia cuando era joven, Darwin expresó el mismo sentimiento en un tono más formal: «No puedo creer que un Dios omnipotente y benefactor pudiera haber creado mediante diseño las *Ichneumonidae* con la intención expresa de que se alimentasen dentro de los cuerpos vivos de las orugas». La crueldad legendaria de las avispas icneumónidas (también emparentadas con las avispas excavadoras y las avispas tarántula) es un *leitmotiv* al que volveremos en los dos capítulos finales del libro.

Encuentro difícil de articular lo que estoy a punto de decir, pero es algo en lo que he estado pensando durante un tiempo, y se me ocurrió en ese día memorable de la disección de la jirafa. Cuando miramos a los animales desde fuera, nos quedamos irresistiblemente impresionados por la elegante ilusión del diseño: una jirafa observando, un albatros zambulléndose, un vencejo volando, un halcón descendiendo en picado, un dragón de mar foliado invisible entre las algas, un guepardo esprintando en máxima extensión después de un quiebro, una gacela brincando —la ilusión del diseño tiene tanto sentido intuitivo que requiere un esfuerzo

real, obligarse a pensar críticamente y superar las seducciones de la intuición espontánea e ingenua—. Hay que reconocer que existe una *impresión* de diseño elegante en los diagramas simplificados de los libros de texto, dibujados y coloreados hábilmente como el plano de un ingeniero. Pero la realidad que te impacta al ver un animal abierto en canal sobre una mesa de disección es muy diferente. Creo que sería un ejercicio instructivo pedirle a un ingeniero que dibujara una versión mejorada de, digamos, las arterias que salen del corazón. Imagino que el resultado sería algo parecido al colector de escape de un coche, con una línea clara de tubos salientes formando una hilera ordenada, en lugar del barullo desordenado que vemos realmente cuando abrimos el pecho de un animal.

Mi propósito al pasar un día con los anatomistas diseccionando una jirafa era estudiar el nervio laríngeo recurrente como un ejemplo de la imperfección evolutiva. Pero pronto me di cuenta de que, en lo que se refiere a la imperfección, el laríngeo recurrente es solo la punta del iceberg. El hecho de que tome esa gran desviación apoya al argumento con una fuerza peculiar. Este es el aspecto que haría que Helmholtz lo devolviese. Pero la impresión irresistible que se obtiene de explorar cualquier parte del interior de un animal es ¡que es un desastre! No solo es que un diseñador nunca habría cometido un error como el de la desviación del nervio. Un diseñador razonable nunca habría perpetrado *ninguno* de los desastres que constituyen el entrecruzamiento de arterias, venas, nervios, intestinos, revoltijos de grasa y músculo, mesenterios y otros elementos. Citando al biólogo estadounidense Colin Pittendrigh, «todo esto no es otra cosa que un mosaico de piezas provisionales enganchadas unas con otras, obtenidas de lo que había disponible cuando surgió la oportunidad y aceptadas a posteriori, sin previsión alguna, por la selección natural».

12

CARRERAS ARMAMENTISTAS Y TEODICIDAD EVOLUTIVA

Los ojos y los nervios, los conductos de esperma, los senos y la espalda están mal diseñados desde el punto de vista del bienestar individual, pero las imperfecciones pueden tener sentido a la luz de la evolución. Lo mismo es aplicable a la economía a gran escala en la naturaleza. Se podría esperar de un creador inteligente que hubiera diseñado no solo cuerpos de animales y plantas, sino también especies completas, ecosistemas enteros. Se podría esperar de la naturaleza que fuese una economía planificada, diseñada cuidadosamente para eliminar la extravagancia y el desperdicio. Pero no lo es, y este capítulo lo mostrará.

LA ECONOMÍA SOLAR

La economía natural está alimentada por el Sol. Durante el día los fotones del Sol «llueven» sobre toda la superficie del planeta. Muchos fotones no hacen nada más que calentar las rocas y las playas de arena. Unos pocos encuentran su camino hasta un ojo —el suyo o el mío, o el ojo compuesto de una gamba o el ojo parabólico reflector de una vieira—. Puede que algunos caigan en un panel solar —uno hecho por el hombre, como esos que, en un ataque de fervor ecologista, acabo de instalar en mi tejado para obtener agua caliente, o una hoja verde, que es un panel solar natural—. Las plantas usan la energía solar para realizar síntesis químicas «cuesta arriba», fabricando combustibles orgánicos, fundamentalmente azúcares. «Cuesta arriba» significa que la síntesis de azúcar necesita energía para poder realizarse; por la misma razón, el azúcar puede ser más tarde «quemado» en una reacción «cuesta abajo» que libera de nuevo (una fracción de) la energía para poder hacer algún trabajo útil, por ejemplo

trabajo muscular, o el trabajo de construir un gran tronco. La analogía de ir «cuesta abajo» o «cuesta arriba» se hace con el agua que fluye hacia abajo al salir de un depósito elevado y mueve una noria para hacer un trabajo útil; o que es bombeada energéticamente hacia arriba, hacia el depósito, para que pueda volver a mover más tarde la noria, al fluir de nuevo hacia abajo. En cada estadio de la economía de la energía, bien sea cuesta arriba o cuesta abajo, se pierde algo de energía —ninguna transacción energética es perfectamente eficiente—. Esta es la razón por la que las oficinas de patentes no necesitan detenerse en diseños de máquinas de movimiento perpetuo: son, de manera implacable y para siempre, imposibles. No es posible utilizar la energía «cuesta abajo» de una noria para bombear de nuevo la misma cantidad de agua hacia arriba, de tal forma que haga moverse a la noria. Siempre tiene que haber una cantidad de energía aportada desde el exterior para compensar la pérdida —y ahí es donde entra el Sol—. En el capítulo 13 retomaré este importante asunto.

Una buena parte de la superficie de la Tierra está cubierta por hojas verdes que constituyen un sistema multicapa de captura de fotones. Si un fotón no es capturado por una hoja, hay muchas posibilidades de que lo capture otra de una capa inferior. En un bosque denso no son demasiados los fotones que llegan hasta el suelo sin ser capturados; esta es la razón por la que los bosques maduros son sitios oscuros indicados para el paseo. La mayoría de los fotones que constituyen la pequeña fracción de rayos solares correspondiente a nuestro planeta se golpea con el agua, y las capas superficiales del mar bullen con plantas verdes unicelulares que los capturan. Ya sea en el mar o en la tierra, el proceso en el que se atrapan los fotones y se usan para llevar a cabo reacciones químicas «cuesta arriba» —que consumen energía—, fabricando convenientemente moléculas como los azúcares y el almidón que almacenan esa energía, se llama fotosíntesis. Fue inventada hace más de mil millones de años por las bacterias, y las bacterias verdes todavía realizan la mayoría de la fotosíntesis. Puedo decir esto porque los cloroplastos —diminutos motores verdes fotosintéticos que llevan a cabo la tarea de la fotosíntesis en todas las hojas— son los descendientes directos de las bacterias verdes. De hecho, debido a que aún pueden reproducirse autónomamente, del mismo modo que ellas, dentro de las células de las plantas, podemos decir que todavía son bacterias, aunque muy dependientes de las hojas que los alojan y a las que dan su color.

Parece que las bacterias originales que vivían libres fueron secuestradas dentro de las células de las plantas, donde después evolucionaron hasta lo que ahora llamamos «cloroplastos».

Y es un hecho claramente simétrico que, igual que la química «cuesta arriba» de la vida está tomada en su mayoría de las bacterias verdes que prosperan dentro de las células de las plantas, también la química «cuesta abajo» del metabolismo —la combustión lenta de los azúcares y otros combustibles para liberar energía en células de animales y plantas— es una habilidad especial de otra clase de bacterias que una vez vivieron libres pero ahora se reproducen dentro de células más grandes, donde se las conoce como «mitocondrias». Las mitocondrias y los cloroplastos descienden de tipos diferentes de bacterias, cada una de las cuales desarrolló su magia química —complementaria de la otra— miles de millones de años antes de la existencia de cualquier organismo vivo detectable a simple vista. Ambas fueron más tarde seleccionadas por sus habilidades químicas, y hoy se multiplican en el interior líquido de células mucho más grandes y complejas correspondientes a criaturas con tamaño suficiente como para que nosotros las veamos y las toquemos —las células de las plantas en el caso de los cloroplastos, las células de las plantas y de los animales en el caso de las mitocondrias—.

La energía solar capturada por los cloroplastos en las plantas está en la base de complejas cadenas alimentarias, en las que la energía pasa de las plantas, a los herbívoros, que pueden ser insectos, a los carnívoros, que pueden ser insectos o insectívoros, así como lobos y leopardos, a los carroñeros, como los buitres y los escarabajos del estiércol y, finalmente, a agentes de degradación como hongos y bacterias. En cada etapa de estas cadenas alimentarias, parte de la energía se desperdicia en forma de calor a medida que se transmite, mientras que otra se utiliza para mantener procesos biológicos como la contracción muscular. Ninguna energía se añade después a la que inicialmente se tomó del Sol. Con pocas pero interesantes excepciones, como los habitantes de las «fumarolas» del océano profundo, cuya energía proviene de fuentes volcánicas, toda la energía que sostiene la vida viene en última instancia de la luz solar, capturada por las plantas.

Contemple un árbol erguido, orgulloso en medio de una zona despejada. ¿Por qué es tan alto? ¡No para estar más cerca del Sol! Ese largo tronco podría ser acortado hasta que la cruz del árbol estuviera a ras

de suelo, sin que se perdieran fotones y con un enorme ahorro en el coste de creación. Entonces, ¿por qué todo ese gasto de empujar la copa del árbol hacia el cielo? La respuesta no aparece hasta que nos damos cuenta de que el hábitat natural del árbol es el bosque. Los árboles son altos para ser más altos que los árboles rivales —de la misma especie y de otras—. No debemos confundirnos cuando, en una zona despejada de un jardín o en un campo, vemos un árbol con ramas llenas de hojas hasta el suelo. Tiene esa forma bien redondeada porque *está* aislado. Lo estamos viendo fuera de su hábitat natural, que es un bosque denso. Su perfil natural en el bosque es alto, con el tronco desnudo, y con la mayoría de las ramas cerca de la copa —en esa suerte de dosel forestal que recibe la lluvia de fotones —. Y ahora, un pensamiento extraño. Si todos los árboles del bosque llegaran a un acuerdo —como un acuerdo sindical— para no crecer más alto de, digamos, tres metros, todos se beneficiarían. Toda la comunidad —todo el ecosistema— podría aprovecharse del ahorro en madera y energía necesarias para construir esos troncos enormes y costosos.

La dificultad para que se den estos acuerdos de contención mutua es bien conocida, incluso en asuntos humanos en los que podríamos utilizar la ventaja de la predicción. Un ejemplo habitual es el acuerdo para sentarse, en lugar de estar de pie, cuando se ve un espectáculo como una carrera de caballos. Si todos los espectadores estuvieran sentados, los altos seguirían teniendo una mejor visión que los bajos, justo igual que cuando todo el mundo está de pie, pero con la ventaja de que estar sentado es más cómodo. Los problemas comienzan cuando una persona bajita sentada detrás de dos personas altas se levanta para ver mejor. Inmediatamente, la persona sentada detrás de ella se levanta para ver algo. Una ola de gente incorporándose barre el campo, hasta que todo el público está de pie. Al final, todo el mundo está peor de lo que estaría si se hubiera quedado sentado.

En un bosque maduro típico, el dosel puede verse como un prado, como una pradera ondulada alzada sobre zancos. El dosel recoge la energía solar al mismo ritmo que lo haría la pradera. Pero una proporción importante de la energía se «desperdicia» en dar de comer a los zancos, que no hacen nada más que elevar la pradera en el aire, donde recoge exactamente la misma cantidad de fotones que recogería —a mucho menor coste— si estuviera sobre el suelo.

Y esto nos pone cara a cara con la diferencia entre una economía planificada y una economía evolutiva. En una economía diseñada no habría árboles, o al menos no árboles muy altos: no habría bosques, ni dosel. Los árboles son un desperdicio. Los árboles son extravagantes. Los troncos de los árboles son monumentos erigidos a la competición fútil —fútil si pensamos en términos de economía planificada—. Pero la economía natural no está planificada. Las plantas compiten con otras plantas, de la misma o de otras especies, y el resultado es que crecen más y más alto, mucho más alto de lo que recomendaría ningún planificador. No indefinidamente más alto, sin embargo. Se llega a un punto en el que seguir creciendo más, aunque confiere una ventaja competitiva, tiene un coste tan elevado que el árbol individual que lo hace termina peor que sus rivales que renunciaron a ese metro extra. Lo que finalmente determina la altura hasta la que tienen que crecer es un equilibrio entre los costes y los beneficios para los árboles individuales, no los beneficios que un planificador racional podría calcular para los árboles en su conjunto. Y por supuesto, el equilibrio encuentra un máximo diferente en bosques diferentes. Las secuoyas rojas de la costa del Pacífico (véalas antes de morirse) probablemente nunca han sido superadas.

Imagine el destino de un hipotético bosque —llamémosle el Bosque de la Amistad— en el cual, por algún acuerdo misterioso, todos los árboles se las han arreglado para conseguir el deseable objetivo de reducir la altura del dosel a tres metros. La cobertura tiene el mismo aspecto que la de cualquier otro bosque, excepto porque solo posee tres metros de altura en lugar de treinta. Desde el punto de vista de la economía planificada, el Bosque de la Amistad es más eficiente *como bosque* que los altos bosques a los que estamos acostumbrados, porque los recursos no se han dedicado a producir troncos enormes que no tienen ninguna utilidad, excepto para competir con otros árboles.

Pero ahora, supongamos que un árbol mutante sobresaliera en medio del Bosque de la Amistad. Este árbol tan pícaro crece un poco más que la norma «acordada» de tres metros. Inmediatamente, este mutante dispone de una ventaja competitiva. Hay que reconocer que tendría que pagar el precio de la longitud extra de su tronco. Pero eso está más que compensado, *siempre y cuando todos los demás árboles obedezcan la ordenanza de autocontrol,* porque los fotones extra que le llegan cubren de sobra el coste extra de la longitud de su tronco. Por tanto, la selección

natural favorece la tendencia genética a romper la ordenanza de autocontrol y crecer un poco más alto, digamos que tres metros y medio. Según pasan las generaciones, más y más árboles rompen el «acuerdo» sobre la altura. Cuando finalmente todos los árboles del bosque tienen tres metros y medio, todos están mucho peor de lo que estaban antes: todos están pagando el coste de crecer ese medio metro extra. Pero no están obteniendo fotones extra por ese coste. Y ahora la selección natural favorece cualquier tendencia mutante a crecer, pongamos que hasta los cuatro metros. Y de esa forma los árboles siguen creciendo más y más. ¿Acabará alguna vez esta fútil carrera hacia el Sol? ¿Por qué no árboles de un kilómetro de alto, por qué no las judías mágicas del cuento? El límite está en la altura en la que el coste marginal de crecer otro metro supera a la ganancia en fotones por crecer ese metro extra.

Estamos hablando de costes y beneficios individuales. El bosque tendría un aspecto muy diferente si su economía hubiera sido diseñada para el beneficio del bosque *en su conjunto*. De hecho, lo que realmente vemos es un bosque en el que cada especie de árbol evoluciona por selección natural, y esta favorece a los árboles *individuales* que ganan a otros árboles rivales, sean o no de su misma especie. Todo este asunto de los árboles es compatible con la opinión de que no fueron diseñados —a menos, por supuesto, que lo hubieran sido para suministrarnos madera, o para regalarnos los ojos y halagar a nuestras cámaras fotográficas en el otoño de Nueva Inglaterra—. Y no son pocos aquellos que creen justo eso, por lo que volvamos a un caso paralelo, donde los beneficios para la humanidad son más difíciles de alegar: la carrera armamentista entre cazadores y cazados.

CORRIENDO PARA QUEDARSE EN EL MISMO SITIO

Los cinco corredores más rápidos entre las especies de mamíferos son el guepardo, el berrendo (también llamado «antílope» en Estados Unidos, aunque no está cercanamente emparentado con los «verdaderos» antílopes de África), el ñu (un antílope verdadero, aunque no se les parece mucho), el león y la gacela de Thomson (otro antílope verdadero, que sí se parece a

un antílope estándar, a uno pequeño). Entre estos corredores de élite se mezclan cazados y cazadores, y lo que defiendo es que esto no es un accidente.

Se dice que los guepardos son capaces de acelerar de 0 a 100 km/h en tres segundos, lo que les sitúa a la altura de un Ferrari, un Porsche o un Tesla. Los leones tienen también una aceleración formidable, incluso mejor que las gacelas, que poseen más resistencia y la habilidad de hacer quiebros. Los felinos generalmente están diseñados para esprintar y saltar sobre presas a las que cogen desprevenidas; los perros, como el perro salvaje africano o el lobo, para la resistencia, para cansar a su presa. Las gacelas y otros antílopes tienen que lidiar con estos dos tipos de depredadores, y quizá tienen que buscar un compromiso. Su aceleración no es tan buena como la de los grandes felinos, pero su resistencia es mejor. Con sus quiebros, una gacela de Thomson puede zafarse de un guepardo, posponiendo el asunto hasta que el guepardo pasa de la fase de máxima aceleración a estar exhausto, y su resistencia limitada empieza a pesarle. Las cacerías exitosas de los guepardos terminan normalmente muy poco tiempo después de empezar. En estos casos, los guepardos se basan en la sorpresa y la aceleración. Las cacerías que fracasan también terminan pronto, con el guepardo abandonando la carrera para ahorrar energía cuando su *sprint* inicial falla. Todos los guepardos cazan. En otras palabras, ¡son breves!

No nos preocupemos ahora por los detalles de las velocidades y aceleraciones máximas, la resistencia y los quiebros, la sorpresa y las prolongadas persecuciones. El hecho destacable es que entre los animales más rápidos se incluyen ambos grupos, los que cazan y los que son cazados. La selección natural lleva a las especies depredadoras a hacerse cada vez mejores en la captura de sus presas y, simultáneamente, lleva a las especies cazadas a ser mejores escapando de los cazadores. Los depredadores y las presas están envueltos en una carrera armamentista evolutiva, que ocurre en tiempo evolutivo. El resultado ha sido una escalada en la cantidad de recursos económicos que los animales, de ambos bandos, han gastado en esta carrera, a costa de otros departamentos de la economía de su cuerpo. Los cazadores y los cazados consiguen cada vez un mejor equipamiento para superar (sorprender, burlar, etc.) a la otra parte. Pero de la mejora del equipamiento para ganar no se deriva de forma obvia un aumento del éxito —por la sencilla razón de que la otra parte de

la carrera armamentista también está actualizando su equipo: esto es lo que distingue una carrera armamentista—. Podríamos decir, como dijo la Reina Roja a Alicia, que tienen que correr tan deprisa como puedan para seguir estando en el mismo sitio.

Darwin estaba al tanto de las carreras armamentistas, aunque no utilizó ese término. Mi colega John Krebs y yo publicamos un artículo sobre el tema en 1979, en el que atribuimos la expresión «carrera armamentista» al biólogo británico Hugh Cott. Quizá por eso, en 1940, en plena Segunda Guerra Mundial, Cott publicó lo siguiente en su libro *Adaptive Coloration in Animals* [Coloración adaptativa en animales]:

> Antes de afirmar que la apariencia engañosa de un grillo o de una mariposa es innecesariamente detallada, primero debemos averiguar cuáles son los poderes de percepción y de discriminación en los enemigos naturales de los insectos. Si no se hace así, es como afirmar que el blindaje de un crucero es demasiado pesado, o que el alcance de sus cañones es demasiado grande, sin informarse acerca de la naturaleza y efectividad del armamento de su enemigo. El hecho es que, tanto en las luchas primigenias en la jungla como en los refinamientos de la guerra civilizada [79], vemos en desarrollo una carrera evolucionista de armamento —cuyos resultados, para la defensa, se manifiestan en propiedades como la velocidad, la atención, el blindaje, las espinas, la capacidad de cavar, secreciones venenosas, sabor nauseabundo y coloraciones de camuflaje, amenazantes y miméticas; y para el ataque, en propiedades como la velocidad, la sorpresa, las emboscadas, la seducción, la agudeza visual, las garras, los dientes, los aguijones, los colmillos con veneno y la coloración de camuflaje y seductiva—. De igual forma que se ha desarrollado una mayor velocidad para la huida en respuesta al incremento de velocidad en el perseguidor, o un blindaje defensivo en respuesta a armas ofensivas, también se ha desarrollado la perfección en los mecanismos de ocultación en respuesta a un aumento de los poderes perceptivos.

La carrera armamentista se desarrolla en el tiempo evolutivo. No hay que confundirla con la carrera entre un cierto guepardo y, por ejemplo, una gacela, que tiene lugar en tiempo «real». La carrera en el tiempo evolutivo es una carrera para desarrollar equipamiento para las carreras en tiempo real. Y lo que eso significa en realidad es que los genes para desarrollar ese equipamiento destinado a vencer o superar a la otra parte se acumulan en los acervos genéticos de ambas partes. Además —y este es el asunto

que Darwin tan bien conocía—, el equipamiento para correr rápido se utiliza para superar a los *rivales* de la misma especie, que están huyendo del mismo depredador. El conocido chiste, que es casi como una fábula de Esopo, sobre las zapatillas de deporte y el oso resume la idea perfectamente [80].

Ahora que he introducido la terminología de la carrera armamentista, podemos ver que también los árboles del bosque están involucrados en una. Cada árbol corre hacia el sol, en competencia con sus vecinos más próximos del bosque. Esta carrera es particularmente reñida cuando un árbol viejo muere y deja un sitio vacante en la cubierta. El eco que produce un árbol viejo al caerse es el pistoletazo de salida de una carrera, en tiempo real (aunque a un tiempo más lento de lo que los animales estamos acostumbrados), entre los árboles jóvenes que han estado esperando justo esa oportunidad. Y el ganador será probablemente un árbol bien equipado, con genes que prosperaron a través de carreras armamentistas ancestrales en el tiempo evolutivo, para crecer rápido y alto.

La carrera armamentista entre las especies de los bosques es una carrera simétrica. Ambos lados están intentando conseguir la misma cosa: un lugar en la cubierta forestal. La carrera armamentista entre depredadores y presas es una carrera asimétrica: una carrera entre armas de ataque y armas de defensa. Lo mismo ocurre con las carreras armamentistas entre machos y hembras dentro de las especies, y entre los padres y su descendencia.

Un aspecto que podría preocupar a los entusiastas del diseño inteligente es la gran dosis de futilidad que arrastran estas carreras. Si vamos a postular un diseñador para los guepardos, entonces debemos admitir que ha puesto cada gramo de sus conocimientos de diseño en la tarea de perfeccionar a un asesino superlativo. Una mirada a esa magnífica máquina de correr elimina cualquier duda. El guepardo, si es que vamos a hablar de diseño, está magníficamente diseñado para cazar gacelas. Pero el mismo diseñador ha puesto el máximo empeño en diseñar una gacela que está extraordinariamente equipada para escapar de esos guepardos. Por el amor de Dios, ¿de qué lado está el diseñador? Cuando observamos los músculos tensos del guepardo y su flexible columna vertebral, debemos concluir que el diseñador quiere que el guepardo gane la carrera. Pero cuando miramos a la gacela esprintando, haciendo quiebros, saltando, llegamos exactamente a la misma conclusión. ¿Sabía la mano izquierda del

diseñador lo que estaba haciendo su mano derecha? ¿Es un sádico que disfruta del deporte espectáculo y está siempre subiendo la apuesta en ambos lados para aumentar la emoción de la captura? Él, que creó al cordero, ¿te creó a ti?

¿Es realmente parte del plan divino que el leopardo deba dormir con el niño, y que el león coma paja como el buey? En ese caso, ¿por qué invertir en los formidables molares carniceros, las garras asesinas del león y del leopardo? ¿De dónde salen la sobrecogedora velocidad y el arte de huir del antílope y de la cebra? No hace falta decir que estos problemas no surgen en la interpretación evolutiva de lo que está pasando. Cada bando está peleando para superar al otro porque, en ambos lados, los individuos que tienen éxito transmiten automáticamente los genes que contribuyeron a su éxito. Las ideas de «futilidad» y «desperdicio» aparecen en nuestras mentes porque somos humanos y capaces de ver el bienestar de todo el ecosistema. La selección natural se preocupa solo de la supervivencia y de la reproducción de los genes individuales.

Es como los árboles del bosque. De la misma forma que cada árbol tiene una economía en la que los recursos que se invierten en los troncos ya no están disponibles para las frutas o las hojas, los guepardos y las gacelas tienen su propia economía interna. Correr deprisa es costoso, no solo en términos de la energía obtenida del Sol, sino también de los materiales que se usan en la fabricación de los músculos, los huesos y los tendones —la maquinaria de la velocidad y la aceleración—. La comida en forma de plantas que ingiere una gacela es finita. Lo que se consuma en fabricar músculos y largas patas para correr se tiene que quitar de otros departamentos de la vida, como la cría de hijos, en la que, idealmente, el animal podría «preferir» invertir sus recursos. Existe un compromiso de equilibrio extremadamente complicado que debe ser microgestionado. No podemos conocer todos los detalles, pero sabemos (es una ley inquebrantable de la economía) que es posible gastar *demasiado* en un departamento de la vida, tomando recursos de otro departamento de la vida. Un individuo que invierta una cantidad de recursos mayor que la ideal en correr puede salvar la piel. Pero en el juego darwiniano sería superado por otro individuo rival de la misma especie que escatime un poco en correr, y por tanto asuma un mayor riesgo de ser comido, pero que consiga el equilibrio adecuado y logre tener más descendientes a los que transmitir sus genes.

No son solo energía y materiales caros los que deben ser equilibrados adecuadamente. También hay un riesgo: y el riesgo tampoco es algo extraño en los cálculos de los economistas. Las patas largas y estrechas son buenas para correr. Inevitablemente, también son propensas a romperse. Con demasiada frecuencia los caballos de carreras se rompen una pata durante el fragor de la carrera, y normalmente son sacrificados poco después. Como vimos en el capítulo 3, la razón por la que son tan vulnerables es porque han sido criados selectivamente para ser rápidos, a expensas de todo lo demás. Las gacelas y los guepardos también han sido seleccionados en aras de la velocidad —seleccionados naturalmente, no artificialmente—, y también serían vulnerables a fracturas si la naturaleza los hubiera sobreseleccionado para ser veloces. Pero la naturaleza nunca sobreselecciona nada. La naturaleza consigue el equilibrio adecuado. El mundo está lleno de genes para obtener el equilibrio adecuado, y ¡esa es la razón por la que están ahí! Lo que esto significa en la práctica es que los individuos con una tendencia genética a desarrollar patas excepcionalmente largas y delgadas, que son sin duda superiores para correr, tienen menos probabilidad de transmitir sus genes, en promedio, que individuos ligeramente más lentos cuyas patas menos frágiles se rompen con menor frecuencia. Esto es solo un ejemplo hipotético de los muchos cientos de compromisos con los que todos los animales y plantas tienen que lidiar. Lidian con riesgos y lidian con compromisos económicos. Pero no son los animales y plantas individuales los responsables de este compromiso y equilibrio. Son los números relativos de genes alternativos en los acervos genéticos los que son compensados y equilibrados por la selección natural.

Como cabría esperar, el compromiso óptimo no es fijo. En las gacelas, el compromiso entre la velocidad y otras demandas dentro de la economía del cuerpo desplazará su punto óptimo dependiendo de la preponderancia de los carnívoros en la zona. Es la misma historia que la de los guppies del capítulo 5. Si hay pocos depredadores en su entorno, la longitud óptima de la pata se reducirá: los individuos con más éxito serán aquellos predispuestos por sus genes a reservar algo de energía y material de las patas para dedicarlos, por ejemplo, a criar hijos o a acumular grasa para el invierno. Estos serán también individuos menos propensos a romperse las patas. Por otra parte, si el número de depredadores aumenta, el equilibrio óptimo se desplazará hacia conseguir unas patas más largas,

con mayor riesgo de fracturas y con menos energía y materiales dedicados a aquellos aspectos de la economía del cuerpo que no están relacionados con la facultad de correr.

Y los mismos tipos de cálculos implícitos equilibrarán los compromisos óptimos de los depredadores. Una guepardo con una pata rota morirá, sin duda, de inanición, y también sus cachorros. Pero dependiendo de cómo sea de difícil encontrar comida, el riesgo de no obtener suficiente alimento si corre despacio puede ser mayor que el riesgo de romperse una pata por estar equipado con los medios para correr demasiado rápido.

Los depredadores y sus presas están atrapados en una carrera armamentista en la que cada parte presiona incesantemente a la otra para que desplace su punto óptimo —en los compromisos económicos y de riesgo de la vida— más y más en la misma dirección, bien literalmente en la misma dirección, por ejemplo, hacia un aumento de la velocidad en carrera, o en la misma dirección en el sentido más laxo de estar dirigido hacia la carrera armamentista entre depredador y presa, en lugar de hacia otro departamento de la vida, como la producción de leche. Dado que ambas partes tienen que equilibrar los riesgos de, digamos, correr demasiado deprisa (rompiéndose las patas o escatimando en otras partes de la economía del cuerpo) frente a correr demasiado despacio (fracasando en la captura de las presas o en la huida, respectivamente), cada parte empuja a la otra en la misma dirección, en una suerte de inexorable *folie à deux*.

Bueno, quizá *folie* (‘locura’) no haga justicia a la seriedad del asunto, ya que el castigo por fallar en cualquiera de los dos bandos es la muerte —asesinato en el caso de la presa, inanición en el del depredador—. Pero *à deux* capta bien el sentimiento de que, si el cazador y el cazado se sentaran juntos y llegaran a un acuerdo razonable, todo el mundo estaría mejor. Igual que en el caso de los árboles en el Bosque de la Amistad, es evidente el beneficio de este pacto si se pudiera mantener. El mismo sentido de futilidad que encontramos en el bosque domina la carrera armamentista entre el depredador y la presa. A lo largo del tiempo evolutivo, los depredadores se hicieron mejores para capturar presas, lo que provocó que las presas se hicieran mejores evadiendo la captura. Ambos bandos mejoran en paralelo su *equipamiento* para sobrevivir, pero ninguno sobrevive necesariamente mejor —porque la otra parte está mejorando también su equipamiento—.

Por otro lado, es fácil ver cómo un planificador central que se preocupara por el bienestar de toda la comunidad podría arbitrar un acuerdo, siguiendo las líneas del Bosque de la Amistad. Hagamos que ambas partes «lleguen a un acuerdo» para reducir su armamento: ambos bandos dedicarán recursos a otros departamentos de la vida y como resultado todos mejorarán. Lo mismo puede ocurrir en una carrera armamentista humana. No necesitaríamos nuestros cazas si los otros no tuvieran bombarderos. No necesitaríamos nuestros misiles si los otros no tuvieran los suyos. Ambos podríamos ahorrar miles de millones si redujéramos a la mitad el gasto en armamento y pusiéramos el dinero en el fondo Ploughshares [81]. Y ahora, tras haber dividido por dos nuestro presupuesto armamentístico y habiendo alcanzado un empate, volvamos a dividirlo por dos. El truco es hacerlo de forma sincronizada, para que cada parte se mantenga exactamente igual de bien equipada para contrarrestar el presupuesto armamentístico decreciente de la otra parte. Esta escalada inversa tiene que ser justo así: planificada. Y, una vez más, la planificación no forma parte de la evolución. Igual que en el caso de los árboles de un bosque, la escalada es inevitable, justo hasta el momento en que a un individuo típico ya no le merece la pena seguir con ella más allá. La evolución, a diferencia de un diseñador, nunca se para a reconsiderar si podría haber habido un camino mejor —un camino compartido— que interese a todos, en lugar de la escalada bilateral guiada por la ventaja egoísta: una ventaja que se acaba neutralizando precisamente porque la escalada *es* mutua.

La tentación de pensar como un planificador se ha extendido desde hace tiempo entre los «ecologistas pop», e incluso los ecologistas académicos algunas veces se acercan a ello peligrosamente. La tentadora noción de «depredadores prudentes», por ejemplo, ha sido inventada no por un *abrazaárboles* de poco juicio, sino por un distinguido ecologista norteamericano.

La idea de «depredadores prudentes» es esta: todo el mundo sabe que, desde el punto de vista de la humanidad en su conjunto, estaríamos mejor si dejáramos de sobreexplotar hasta la extinción algunas especies comestibles importantes, como el bacalao. Esa es la razón por la que los gobiernos y las ONG se reúnen en cónclaves solemnes para pactar cuotas y restricciones. Esa es la razón por la que los gobiernos establecen por decreto el tamaño exacto de las redes de pesca, y es también la razón por la

que las patrulleras recorren las costas persiguiendo pesqueros de arrastre que no cumplen estos criterios. Los humanos, en nuestros días buenos y cuando se nos vigila adecuadamente, somos «depredadores prudentes». Por tanto —o al menos así piensan algunos ecologistas—, ¿no deberíamos esperar que los depredadores salvajes, como los lobos o los leones, sean también «depredadores prudentes»? La respuesta es no. No. No. No. Y merece la pena entender por qué, ya que es una cuestión interesante para la que nos han preparado los bosques de árboles y todo este capítulo.

Un planificador —un diseñador de ecosistemas preocupado por el bienestar de toda la comunidad de animales salvajes— podría calcular una política de caza selectiva óptima que los leones, por ejemplo, deberían adoptar idealmente. No se debe capturar más de una cierta cuota de cualquiera de las especies de antílope. No se atacan hembras preñadas ni jóvenes adultos en pleno potencial reproductivo. Se debe evitar comer miembros de especies raras, que podrían estar en peligro de extinción y que podrían ser útiles en el futuro, si cambian las condiciones. ¿No sería maravilloso si los leones de la sabana estuvieran de acuerdo en seguir las normas y respetar las cuotas, tan cuidadosamente calculadas para ser «sostenibles»? Y tan razonable. ¡Si quisieran!

Bien, eso sería razonable y es lo que un diseñador recomendaría, al menos si estuviera preocupado por el bienestar del ecosistema en su conjunto. ¡Pero no es lo que la selección natural recomendaría (sobre todo porque la selección natural, al carecer de la capacidad de predecir, no *recomienda* nada) y no es lo que ocurre! Veamos por qué, y es la misma historia que la de los árboles en el bosque. Imagine que, por alguna rareza de la diplomacia leonina, la gran mayoría de los leones del área se han organizado para ponerse de acuerdo y limitar su caza hasta niveles sostenibles. Pero ahora suponga que, en esta población que busca el bien público y que acepta restricciones, surge un gen mutante que provoca que un león en particular rompa el acuerdo y explote la población de presas hasta el límite, incluso con el riesgo de llevar a esas especies a la extinción. ¿Penalizaría la selección natural al gen egoísta rebelde? Lamentablemente, no. La descendencia del león rebelde, los propietarios del gen rebelde, superarían y se reproducirían más que sus rivales en la población de leones. En unas pocas generaciones, el gen rebelde se

extendería por la población y no quedaría nada del amigable pacto original. El [82] que se lleva la mejor parte transmite los genes que le permitieron llevársela.

Pero el entusiasta de la planificación protestará cuando todos los leones se comporten de forma egoísta y sobreexploten las especies que cazan hasta el punto de la extinción, ya que todo el mundo *pierde*, incluso los leones que mejor cazan. Al final, si todas las presas se extinguen, la población entera de leones también se extinguirá. ¿No tomaría parte la selección natural para detener lo que está ocurriendo?, insiste el planificador. Una vez más, y una vez más lamentablemente, no. El problema es que la selección natural no piensa en el futuro [83], y la selección natural no elige entre grupos rivales. Si lo hiciera, habría una oportunidad de que la depredación prudente fuera favorecida. La selección natural, como Darwin intuyó con mucha más claridad que muchos de sus sucesores, elige entre rivales dentro de una población. Incluso si toda la población está dirigiéndose a la extinción, conducida por la competición individual, la selección natural todavía favorecería a los individuos más competitivos, justo hasta el momento en que el último muriera. La selección natural puede conducir a la población a la extinción, mientras favorece implacablemente, a pesar del amargo final, aquellos genes competitivos destinados a ser los últimos en extinguirse. El planificador hipotético que he imaginado es una cierta clase de economista, un economista del bienestar que calcula una estrategia óptima para toda la población, o para un ecosistema completo. Si tenemos que hacer analogías económicas, deberíamos pensar entonces en la «mano invisible» de Adam Smith.

¿TEODICIDAD EVOLUTIVA?

Pero ahora quiero dejar de lado la economía. Debemos quedarnos con la idea de un planificador, un diseñador, pero nuestro planificador será un filósofo de la moral, más que un economista. Un diseñador bondadoso podría intentar —así cabría pensarlo— minimizar el sufrimiento. Esto no es incompatible con el bienestar económico, pero el sistema resultante diferiría en los detalles. Y, una vez más, esto, desafortunadamente, no

ocurre en la naturaleza. ¿Por qué debería ocurrir? Terrible pero cierto, el sufrimiento entre los animales salvajes es tan estremecedor que los espíritus sensibles no deberían contemplarlo. Darwin sabía de lo que hablaba cuando le dijo en una carta a su amigo Hooker: «Qué libro escribiría el capellán del diablo sobre los trabajos tan burdos, derrochadores, torpes y horriblemente crueles de la naturaleza». La expresión memorable «capellán del diablo» me proporcionó el título de un libro anterior y, en otro, lo expresé así:

> La naturaleza no es amable ni hostil. No está en contra del sufrimiento, ni a favor. La naturaleza no está interesada en el sufrimiento de ninguna forma, a menos que afecte a la supervivencia del ADN. Es fácil imaginar un gen que, por ejemplo, tranquilice a las gacelas cuando van a recibir el mordisco final. ¿Sería un gen así favorecido por la selección natural? No, a menos que el acto de tranquilizarlas mejorase la probabilidad de que el gen se propagara a generaciones futuras. Es difícil ver por qué esto tiene que ser así, y nosotros podemos adivinar que las gacelas sufren un dolor y un pánico horribles cuando las persiguen hasta la muerte —como les acaba pasando a la mayoría de ellas—. La cantidad total de sufrimiento por año en el mundo natural está más allá de cualquier consideración aceptable. Durante el minuto que tardo en construir esta frase, miles de animales están siendo comidos vivos, otros corren intentando salvar sus vidas, gimoteando con miedo, otros están siendo devorados lentamente desde el interior por molestos parásitos, miles de animales de todas las especies están muriendo de hambre, sed y enfermedades. Así debe ser. Si hay una época de plenitud, ese mismo hecho provocará automáticamente un aumento en la población hasta que se restaure el estado natural de hambre y miseria.

Los parásitos probablemente causan aún más sufrimiento que los depredadores, y entender su lógica evolutiva aumenta, más que mitiga, el sentido de futilidad que experimentamos cuando los contemplamos. Yo arremeto contra ellos cada vez que tengo un resfriado (como el que tengo ahora). Quizá es solo un inconveniente menor, ¡pero es tan *absurdo!* Al menos si estás siendo comido por una anaconda puedes sentir que has contribuido al bienestar de uno de los señores de la vida. Cuando estás siendo devorado por un tigre, quizá el último pensamiento podría ser: «¿Qué ojo o mano inmortal es responsable de esta aterradora simetría? (¿En qué profundidades o cielos distantes ardió el fuego de sus ojos?)».

¡Pero con un virus! Un virus tiene una futilidad absurda escrita en su ADN —en realidad, ARN, en el caso del virus común del resfriado, aunque el principio es el mismo—. Un virus existe con el único propósito de fabricar más virus. Bien, lo mismo se cumple en última instancia para los tigres y las serpientes, pero eso no *parece* tan fútil. El tigre y la serpiente pueden ser máquinas de replicar ADN, pero son máquinas maravillosas, elegantes, complicadas y caras. Yo he donado dinero para preservar al tigre, pero ¿quién pensaría en donar dinero para preservar el resfriado común? Es esa futilidad la que me afecta, mientras me sueno de nuevo la nariz y jadeo buscando aire.

¿Futilidad? Qué tontería. Tonterías humanas, sentimentales. La selección natural es *completamente* fútil. Su objeto es la supervivencia de las instrucciones autorreplicantes para la autorreplicación. Si una variante del ADN sobrevive cuando una anaconda me traga entero o una variante del ARN sobrevive haciéndome estornudar, eso es todo lo que necesitamos como explicación. Los virus y los tigres son construidos mediante instrucciones codificadas cuyo último mensaje es, como un virus de computador, «Duplícame». En el caso de un virus, la instrucción se ejecuta directamente. El ADN de un tigre es también un programa del tipo «Duplícame», pero contiene una digresión formidablemente grande como parte esencial de la ejecución eficiente de su mensaje fundamental. La digresión es un tigre completo, con sus colmillos, sus músculos para correr, sus instintos de acechar y saltar. El ADN del tigre dice: «Duplícame por la circunvalación de construir un tigre primero». Al mismo tiempo, el antílope dice: «Duplícame por la circunvalación de construir un antílope primero, completo, con patas largas y músculos rápidos». El sufrimiento es un subproducto de la evolución por selección natural, una consecuencia inevitable que nos puede afectar en nuestros momentos más receptivos, pero que no podemos esperar que afecte a un tigre —incluso si se pudiera decir de un tigre que sufre— y, ciertamente, no podemos esperar que preocupe a sus genes.

Los teólogos se preocupan por los problemas del sufrimiento y el mal, hasta el punto de que han inventado un nombre, «teodicidad» (literalmente, ‘justicia de Dios’), para la tarea de intentar reconciliarlo con la supuesta bondad divina. Los biólogos evolutivos no ven el problema, porque el mal y el sufrimiento no cuentan para nada, de una forma o de

otra, en el cálculo de la supervivencia de los genes. Sin embargo, necesitamos considerar el problema del dolor. ¿De dónde viene, desde el punto de vista evolutivo?

El dolor, como todo lo relacionado con la vida, suponemos, es un artefacto darwiniano que funciona para mejorar la supervivencia del sufridor. Los cerebros están construidos con una regla general del tipo: «Si experimentas la sensación de dolor, detén cualquier cosa que estés haciendo y no la hagas otra vez». Queda como objeto de una discusión interesante el hecho de por qué tiene que ser tan horriblemente doloroso. Teóricamente, cabría suponer la posibilidad de que en algún lugar del cerebro pudiera ser alzado el equivalente a una pequeña bandera roja indolora cuando el animal hiciera algo que lo lastimara: coger un ascua al rojo vivo, quizá. Una amonestación imperativa del tipo «¡No hagas eso otra vez!», o un cambio no doloroso en el diagrama de conexión del cerebro de tal forma que impidiera que el animal lo volviera a hacer, parecería suficiente. ¿Por qué la abrasadora agonía, una agonía que puede durar días y de la cual la memoria puede que nunca se libere? Quizá pelear con esta cuestión es la versión evolutiva de la teodicidad. ¿Por qué es tan doloroso? ¿Qué está mal en esa pequeña bandera roja?

No tengo una respuesta concluyente. Una posibilidad inquietante es esta: ¿qué pasaría si el cerebro estuviera sujeto a deseos e impulsos opuestos, y hubiera algún tipo de lucha interna entre ellos? Subjetivamente, conocemos bien la sensación. Podemos estar en conflicto entre, digamos, el hambre y el deseo de estar delgados. O podemos tener un conflicto entre el enfado y el miedo. O entre el deseo sexual y un tímido temor al rechazo o una conciencia que inste a la fidelidad. Literalmente podemos sentir el tira y afloja dentro de nosotros, mientras nuestros deseos en conflicto batallan entre sí. Ahora, volvamos al dolor y su posible superioridad sobre una «bandera roja». Igual que el deseo de estar delgado puede superar al hambre, es claramente posible superar el deseo de evitar el dolor. Las víctimas de tortura pueden acabar sucumbiendo, pero a menudo pasan por una fase previa en la que soportan bastante dolor en lugar de, por ejemplo, traicionar a sus camaradas o a su país o su ideología. En la medida en que se puede decir que la selección natural «quiere» algo, la selección natural no quiere que los individuos se sacrifiquen a sí mismos por amor al país, o en aras de una ideología o un partido o un grupo. La selección natural está «en contra» de que los

individuos se salten las sensaciones de aviso que produce el dolor. La selección natural «quiere» que sobrevivamos, o más específicamente, que nos reproduzcamos y que estemos unidos a nuestros camaradas, nuestra nación o nuestra ideología. Por lo que respecta a la selección natural, las pequeñas banderas rojas serán favorecidas solo si nunca son ignoradas.

Ahora, a pesar de las dificultades filosóficas, creo que los ejemplos en los que el dolor se había ignorado por razones no darwinianas —razones de lealtad al país, ideología, etc.— serían más frecuentes si tuviéramos una «bandera roja» en lugar de un dolor real, lleno, intolerable. Supongamos que aparecen unos mutantes genéticos que no puedan sentir la espantosa agonía del dolor, sino que dependieran de un sistema de «bandera roja» para mantenerse a salvo del daño físico. Sería sencillo para ellos resistirse a la tortura, y serían reclutados enseguida como espías. El problema es que resultaría tan fácil reclutar espías que resistieran la tortura, que esta dejaría pronto de ser un método de extorsión. Pero, en un estado salvaje, ¿sobrevivirían estos mutantes de bandera roja, libres de dolor, mejor que los individuos rivales cuyos cerebros sí sienten el dolor? ¿Sobrevivirían para transmitir los genes a los nuevos sustitutos de bandera roja? Incluso dejando de lado la circunstancia especial de la tortura, y las circunstancias especiales de la lealtad a las ideologías, creo que podemos ver que la respuesta sería «no».

Como cuestión interesante, hay individuos que no pueden sentir dolor y normalmente terminan mal. La «insensibilidad congénita al dolor con anhidrosis» (CIPA) es una anormalidad congénita extraña en la que el paciente carece de células receptoras del dolor en la piel (y tampoco —eso es la anhidrosis— suda). Aunque es cierto que los pacientes con CIPA no tienen un sistema interno de bandera roja para compensar la deficiencia de su sistema de dolor, cabría pensar que podrían aprender a estar alerta, cognitivamente, ante la necesidad de evitar el daño físico —un sistema de bandera roja aprendido—. En todas las circunstancias, los pacientes de CIPA sucumben a una gran variedad de consecuencias desagradables derivadas de su incapacidad para sentir dolor, por ejemplo quemaduras, roturas, cicatrices múltiples, infecciones, apendicitis sin tratar y arañazos en los ojos. Es todavía más sorprendente que también sufren daños serios en las articulaciones, porque, a diferencia de nosotros, no cambian la

postura cuando han estado sentados o tumbados en una misma posición durante mucho tiempo. Algunos pacientes se ponen alarmas para avisarse de que deben cambiar de posición frecuentemente a lo largo del día.

Incluso si pudiera hacerse efectivo un «sistema de bandera roja», no parece que exista ninguna razón por la que la selección natural lo favoreciera positivamente, por encima de un sistema real de dolor, solo porque es menos desagradable. A diferencia de nuestro diseñador hipotéticamente bondadoso, la selección natural es indiferente a la intensidad del sufrimiento —excepto si afectase a la supervivencia y la reproducción—. Y como esperaríamos si la supervivencia del más adaptado, en lugar del diseño, fuera el elemento subyacente en la naturaleza del mundo, el mundo de la naturaleza en absoluto parece dar pasos para reducir la suma total de sufrimiento. Stephen Jay Gould reflexionaba sobre estos asuntos en un interesante ensayo sobre «La naturaleza no moral». Aprendí de él que el famoso comentario de Darwin sobre los icneumónidos, que cité al final del capítulo anterior, no era ni mucho menos excepcional entre los pensadores victorianos.

Las avispas icneumónidas, con su hábito de paralizar pero no matar a sus víctimas antes de insertarles un huevo con la promesa de una larva que ha de roerlas desde dentro, y en general la crueldad de la naturaleza eran preocupaciones importantes de la teodicidad victoriana. Es fácil ver por qué. Las avispas hembras ponen sus huevos en insectos vivos, como las orugas, pero no antes de haber buscado, pinchando cuidadosamente con su aguijón, cada ganglio nervioso, de tal forma que la presa queda paralizada pero viva. Debe ser mantenida viva para proporcionar carne fresca a la larva que crece dentro. Y la larva, por su parte, se preocupa de comer las partes internas en el orden adecuado. Comienza con los cuerpos grasos y los órganos digestivos, dejando el sistema nervioso y el corazón, vitales, para el final —son necesarios para mantener viva a la oruga—. Como Darwin se preguntó de forma tan pertinente, ¿qué tipo de diseñador bondadoso podría haber imaginado *eso?* No sé si las orugas pueden sentir dolor. Espero fervientemente que no. Pero lo que sé es que la selección natural nunca haría nada para mitigarlo, si la tarea se pudiera hacer de forma más económica: paralizando sencillamente sus movimientos.

Gould cita al reverendo William Buckland, un geólogo del siglo XIX, que encontró consuelo en el giro optimista que consiguió conferir al sufrimiento causado por los carnívoros:

La cita con la muerte por la acción de los carnívoros, como terminación ordinaria de la existencia animal, parece ser por sus resultados principales una dispensación de benevolencia que elimina gran parte del enorme dolor de la muerte universal; abrevia y casi elimina, mediante la creación de las bestias, la miseria de la enfermedad y de las heridas accidentales, y de la decadencia prolongada; e impone una limitación tan saludable en el aumento excesivo de individuos que el suministro de comida mantiene siempre un ratio justo con la demanda. El resultado es que la superficie de la tierra y las profundidades de las aguas están cubiertas con miles de seres vivos, cuyos placeres vitales están en relación con su duración, y que, a lo largo del diminuto día de existencia que se les ha asignado, disfrutan con placer las funciones para las cuales fueron creados.

Bueno, ¡no está tan mal!

13

HAY GRANDIOSIDAD EN ESTA VISIÓN DE LA VIDA

A diferencia de su abuelo evolucionista Erasmus, cuyo verso científico era (sorprendentemente, debo decir) admirado por Wordsworth y Coleridge, Charles Darwin no destacó como poeta, pero en el último párrafo de *El origen de las especies* se animó con un *crescendo* lírico:

> De esa forma, a partir de la guerra de la naturaleza, de la hambruna y la muerte [84], surge directamente el objeto más elevado que somos capaces de concebir, es decir, la producción de los animales superiores. Hay grandiosidad en esta visión de la vida, con sus diferentes fuerzas, habiendo sido alentada originalmente en unas pocas formas o en una sola, y, mientras este planeta ha estado girando de acuerdo a la ley fija de la gravedad, desde un principio tan simple han evolucionado, y están evolucionando, un sinfín de formas hermosas y maravillosas.

Hay mucho mensaje comprimido en este famoso párrafo, y quiero despedirme recorriéndolo línea a línea.

«A PARTIR DE LA GUERRA DE LA NATURALEZA, DE LA HAMBRUNA Y LA MUERTE»

Con las ideas claras como siempre, Darwin reconoció la paradoja moral que hay en el fondo de su gran teoría. No se anduvo con rodeos —pero ofreció la reflexión mitigada de que la naturaleza no tiene malas

intenciones—. Las cosas simplemente se derivan de «las leyes que actúan alrededor de nosotros», por citar una frase anterior del mismo párrafo. Había dicho algo similar al final del capítulo 7 de la obra:

> ... puede no ser una deducción lógica, pero para mi imaginación es más que satisfactorio observar instintos como el del joven cuco expulsando a sus hermanos adoptivos, las hormigas haciendo esclavos, las larvas de icneumónidas alimentándose desde el interior de los cuerpos de las orugas, no como instintos creados o adquiridos especialmente, sino como pequeñas consecuencias de una ley general que conduce al avance de todos los seres vivos, que es multiplicarse, variar, dejar que el más fuerte sobreviva y que muera el débil.

Ya mencioné la repugnancia de Darwin —ampliamente compartida por sus contemporáneos— ante el hábito de la hembra de la avispa icneumónida de picar a su víctima para paralizarla sin matarla, y de esta forma mantener la carne fresca para que su larva se coma a la presa desde el interior. Darwin, no lo olvide, no pensó que un creador bondadoso pudiera concebir ese comportamiento. Pero con la selección al frente de las riendas, todo se aclara, se entiende y se hace razonable. A la selección natural no le preocupa el bienestar. ¿Por qué debería preocuparle? Para que algo ocurra en la naturaleza, el único requisito es que ese mismo suceso en tiempos ancestrales ayudara a la supervivencia de los genes que lo promovieron. La supervivencia de los genes es una explicación suficiente para la crueldad de las avispas y la cruel indiferencia de la naturaleza: suficiente —y satisface al intelecto, aunque quizá no a la compasión humana—.

Sí, hay grandiosidad en esta visión de la vida, e incluso un tipo de grandiosidad en la serena indiferencia de la naturaleza ante el sufrimiento que sigue inexorablemente a este principio conductor, la supervivencia del más adaptado. Los teólogos pueden estremecerse ante este eco de una argucia familiar en teodicidad, según la cual el sufrimiento se ve como un correlato inevitable del libre albedrío. Los biólogos, por su parte, de ningún modo encontrarán el término «inexorablemente» demasiado fuerte cuando reflexionen —quizá siguiendo la línea de mi meditación acerca de la «bandera roja» del capítulo anterior— sobre la función biológica de la

capacidad para sufrir. Si los animales no están sufriendo, alguien no está trabajando lo suficientemente duro en el negocio de la supervivencia de los genes.

Los científicos son humanos, y tienen el mismo derecho que cualquiera a denunciar la crueldad y aborrecer el sufrimiento. Pero los buenos científicos como Darwin reconocen que las verdades sobre el mundo real, por muy desagradables que sean, tienen que ser asumidas. Más aún, si vamos a admitir consideraciones subjetivas, hay fascinación en la lógica descarnada que llena toda la vida, incluidas las avispas que buscan los ganglios nerviosos por todo el cuerpo de su presa, los cucos que expulsan a sus hermanos adoptados («El asesino del alcaudón en la rama» [85]), las hormigas esclavistas y la indiferencia al sufrimiento mostrada por todos los parásitos y depredadores. Darwin buscaba desesperadamente consuelo cuando terminó su capítulo sobre la lucha por la supervivencia con estas palabras:

> Todo lo que podemos hacer es mantener en la cabeza la idea de que cada ser vivo está luchando para aumentar su número siguiendo una proporción geométrica; que cada uno en algún periodo de su vida, durante alguna estación del año, durante cada generación o a intervalos, tiene que luchar por su vida y sufrir una gran devastación. Cuando reflexionamos sobre esta lucha, nos podemos consolar con la creencia plena de que la guerra de la naturaleza no es incesante, que no se siente miedo [86], que la muerte es normalmente súbita y que el vigoroso, el saludable y el feliz sobreviven y se multiplican.

Matar al mensajero es una de las debilidades humanas más estúpidas y subyace en buena parte de la oposición a la evolución que mencioné en el prólogo. «Enseñen a los niños que son animales y se comportarán como animales». Incluso si fuera cierto que la evolución, o la enseñanza de la evolución, propicia la inmoralidad, eso no implicaría que la teoría de la evolución fuera falsa. Es bastante sorprendente ver cuánta gente no puede entender este simple razonamiento lógico. La falacia es tan común que incluso tiene un nombre, el *argumentum ad consequentiam:* X es verdadero (o falso) en función de cuánto me agraden (o desagraden) sus consecuencias.

«EL OBJETO MÁS ELEVADO QUE SOMOS CAPACES DE CONCEBIR»

¿Es «la producción de los animales superiores» realmente «el objeto más elevado que somos capaces de concebir»? ¿El más elevado? ¿Realmente? ¿No hay otros objetos más elevados? ¿El arte? ¿La espiritualidad? *¿Romeo y Julieta?* ¿La Sinfonía Coral? ¿La Capilla Sixtina? ¿El amor?

Tenemos que recordar que, a pesar de su modestia personal, Darwin tenía ambiciones elevadas. En su visión del mundo, todo lo referente a la mente humana, todas nuestras emociones y pretensiones espirituales, todas las artes y las matemáticas, la filosofía y la música, todas las hazañas del intelecto y del espíritu son productos del mismo proceso que dio lugar a los animales superiores. No es solo que sin cerebros evolucionados la espiritualidad y la música serían imposibles. Específicamente, los cerebros fueron seleccionados naturalmente para aumentar en capacidad y potencia por razones utilitaristas, hasta que esas facultades superiores del intelecto y del espíritu emergieron como un subproducto y florecieron en el entorno cultural proporcionado por la vida en grupo y el lenguaje. La visión darwiniana del mundo no menosprecia las facultades humanas superiores, no las «reduce» a un plano de indignidad. Ni siquiera pretende explicarlas al tipo de nivel que parecería particularmente satisfactorio. Lo que sí reivindica, sin embargo, es haber erradicado el misterio impenetrable —que ni siquiera merecía la pena intentar penetrar— que había perseguido obstinadamente todos los esfuerzos predarwinianos por entender la vida.

Pero Darwin no necesita ninguna defensa por mi parte, y dejaré de lado la cuestión de si la producción de los animales superiores es el objeto más elevado que podemos concebir, o solo un objeto muy elevado. Sin embargo, ¿qué pasa con el predicado? ¿Se deriva la producción de los animales superiores directamente de la guerra de la naturaleza, de la hambruna y la muerte? Bien, sí, lo hace. Se deriva directamente si entendemos el razonamiento de Darwin, pero nadie lo entendió hasta el siglo XIX. Y muchos todavía no lo entienden, o quizá son reacios a entenderlo. No es difícil ver por qué. Cuando pensamos en ello, nuestra propia existencia, junto con su explicabilidad posdarwiniana, es una

candidata al hecho más sorprendente que cualquiera de nosotros está llamado a contemplar, en toda nuestra vida, nunca. Llegaré a eso enseguida.

«Habiendo sido alentada originalmente»

He perdido la cuenta de las cartas iracundas que he recibido de lectores de un libro anterior, echándome en cara —así lo piensan los remitentes— la omisión del sintagma vital «por el Creador». ¿No estoy distorsionando gratuitamente la intención de Darwin? Estos celosos corresponsales olvidan que el gran libro de Darwin tuvo seis ediciones. En la primera edición, la frase aparece como yo la he escrito aquí. Probablemente debido a la presión religiosa, Darwin insertó «por el Creador» en la segunda edición y en las sucesivas. A menos que haya una gran razón para hacer lo contrario, cuando cito *El origen de las especies* siempre cito la primera edición. Esto es en parte porque un ejemplar de esa histórica edición de 1.250 libros es una de mis posesiones más preciadas, que me regaló mi benefactor y amigo Charles Simonyi. Pero también porque la primera edición es históricamente la más importante. Es la que golpeó el plexo solar victoriano y ventiló el aire rancio de siglos. Además, posteriores ediciones, especialmente la sexta, ceden a algo más que la presión pública. En un intento por responder a varios ilustrados —pero errados— críticos de la primera edición, Darwin dio marcha atrás e incluso modificó su postura en no pocos puntos en los que había acertado en su primera interpretación. Por tanto, es «habiendo sido alentada originalmente», sin mención alguna a ningún Creador.

Parece que Darwin lamentó haber cedido a la opinión religiosa. En una carta de 1863 a su amigo el botánico Joseph Hooker, dijo: «Pero me he arrepentido de haberme sometido a la opinión pública y haber utilizado el término pentateucal de “creación”, con el que yo quería realmente decir “apareció” por algún proceso global desconocido». El «término pentateucal» al que se refiere Darwin aquí es la palabra «creación». El contexto, como explica Francis Darwin en su edición de 1887 de las cartas de su padre, era que Darwin estaba escribiendo para agradecer a Hooker el préstamo de una revisión de un libro de Carpenter, en el que el revisor

anónimo había hablado de una «fuerza creativa [...] que Darwin solo podía expresar en términos pentateucales como la forma primordial "en la que la vida había sido originalmente concebida"». Actualmente podríamos incluso prescindir de «alentada originalmente». ¿Qué es eso que se supone que ha dado aliento a qué? Probablemente la referencia sugerida era algún tipo de aliento de la vida [87], pero ¿qué significa eso? Cuanto más examinamos la frontera entre la vida y la no-vida, más difícil se torna la distinción. A la vida, lo animado, se le suponía algún tipo de cualidad vibrante, punzante, una esencia vital —que suena todavía más misteriosa cuando se deja caer en francés: *élan vital* [88]—. La vida, al parecer, estaba hecha de una sustancia especial viva, un brebaje de brujas llamado «protoplasma». El profesor Challenger de Conan Doyle, un personaje de ficción aún más absurdo que Sherlock Holmes, descubrió que la Tierra era una especie de erizo gigante, cuya concha era la corteza que veíamos y cuyo núcleo consistía en protoplasma puro. Hasta la mitad del siglo XX, se pensaba que la vida estaba cualitativamente más allá de la física y de la química. Ya no. La diferencia entre la vida y la no-vida es una cuestión no de sustancia, sino de *información.* Las cosas vivas contienen cantidades prodigiosas de información. La mayoría de la información está codificada digitalmente en el ADN y hay una cantidad considerable codificada de otras formas, como veremos a continuación.

En el caso del ADN, entendemos bastante bien cómo el contenido de información se va construyendo a lo largo del tiempo geológico. Darwin lo llamó selección natural, y ahora podemos expresarlo de forma más precisa: la supervivencia no aleatoria de información que codifica recetas embrionarias para esa supervivencia. De forma autoevidente se espera que las recetas para la propia supervivencia tiendan a sobrevivir. Lo que es especial en el ADN es que sobrevive no en su propio material, sino en forma de una serie indefinida de copias. Debido a los errores ocasionales en el proceso de copia, las variantes nuevas pueden sobrevivir incluso mejor que sus predecesoras, por lo que la base de datos de recetas que codifican información para la supervivencia mejorará con el paso del tiempo. Estas mejoras se manifestarán en forma de cuerpos mejores y otros ingenios y dispositivos para la preservación y propagación de la información codificada. En la práctica, la preservación y propagación de la información del ADN significará normalmente la supervivencia y reproducción de los cuerpos que lo contienen. Darwin trabajó al nivel de

los cuerpos, de su supervivencia y su reproducción. La información codificada dentro de ellos estaba implícita en su visión del mundo, y no se hizo explícita hasta el siglo XX.

La base de datos genética se convertirá en un almacén de información sobre los entornos del pasado, entornos en los que los antepasados sobrevivieron y transmitieron los genes que les ayudaron a hacerlo. En la medida en que los entornos presentes y futuros se parezcan a los del pasado (y en su mayor parte lo hacen), este «Libro genético de la muerte» resultará ser un manual útil para la supervivencia en el presente y el futuro. El repositorio de esa información residirá, en un momento cualquiera, en los cuerpos de los individuos, pero a largo plazo, donde la reproducción es sexual y el ADN se entremezcla de un cuerpo a otro, la base de datos de las instrucciones de supervivencia será el acervo genético de las especies.

Cada genoma individual, en cualquier generación, será una muestra de la base de datos de la especie. Especies diferentes tendrán bases de datos diferentes debido a sus mundos ancestrales diferentes. La base de datos del acervo genético de los camellos contendrá información sobre los desiertos y sobre cómo sobrevivir en ellos. El ADN del acervo genético de los topos contendrá instrucciones y trucos para sobrevivir en la oscuridad, en el suelo húmedo. El ADN de los acervos genéticos de los depredadores contendrá cada vez más información sobre las presas, sus trucos de evasión y cómo burlarlos. El ADN de los acervos genéticos de las presas contendrá información sobre los depredadores y sobre cómo escapar de ellos. El ADN de cualquier acervo genético contendrá información sobre parásitos y cómo resistirse a su perniciosa invasión.

La información sobre cómo manejar el presente para poder sobrevivir en el futuro se adquiere necesariamente del pasado. La supervivencia no aleatoria del ADN en los cuerpos ancestrales es la forma obvia en la que la información del pasado se graba para su uso en el futuro, y esta es la ruta por la cual se construye la base de datos primaria del ADN. Pero hay tres formas más en las que la información sobre el pasado se archiva, de tal manera que se puede utilizar para mejorar las posibilidades futuras de supervivencia. Son el sistema inmunitario, el sistema nervioso y la cultura. Junto con las alas, los pulmones y todos los otros aparatos de supervivencia, cada uno de estos tres sistemas secundarios para integrar información fue configurado por el primario: la selección natural del ADN. Podríamos llamarlos las cuatro «memorias».

La primera memoria es el repositorio de ADN de técnicas de supervivencia ancestrales, escrita sobre la pantalla en movimiento que es el acervo genético de las especies. De la misma forma que la base de datos heredada del ADN registra los detalles recurrentes de los entornos ancestrales y de cómo sobrevivir en ellos, el sistema inmunitario, la «segunda memoria», hace lo mismo para las enfermedades y otros ataques al cuerpo durante la vida del individuo. Esta base de datos de enfermedades pasadas y de cómo sobrevivir a ellas es única para cada individuo, y está escrita en el repertorio de proteínas que llamamos anticuerpos —una población de anticuerpos para cada patógeno (organismo que causa una enfermedad), ajustada con precisión por la experiencia «pasada» con las proteínas que caracterizan al patógeno—. Como muchos niños de mi generación, tuve sarampión y varicela. Mi cuerpo «recuerda» la «experiencia», la memoria queda embebida en los anticuerpos, junto con el resto de mi base de datos personal de invasores previamente derrotados. Afortunadamente nunca tuve polio, pero la ciencia médica ha desarrollado inteligentemente la técnica de vacunación para insertar falsas memorias de enfermedades nunca sufridas. Nunca contraeré polio, porque mi cuerpo «piensa» que ya la tuvo antes, y la base de datos de mi sistema inmune está equipada con los anticuerpos apropiados, tras haber sido «engañada» para crearlos con una inyección de una versión inocua del virus. Es fascinante que, como mostraron varios científicos ganadores del Premio Nobel, la base de datos del sistema inmunitario se ha construido a sí misma por un proceso cuasidarwiniano de variación aleatoria y de selección no aleatoria. Pero en este caso la selección no aleatoria es la selección no de los cuerpos por su capacidad para sobrevivir, sino de las proteínas por su capacidad para envolver o neutralizar a las proteínas invasoras.

La «tercera memoria» es en la que pensamos normalmente cuando utilizamos la palabra: la memoria que reside en el sistema nervioso. Mediante mecanismos que todavía no comprendemos del todo, nuestros cerebros retienen un compendio de experiencias pasadas que es paralelo a la «memoria» de los anticuerpos de enfermedades anteriores y a la «memoria» del ADN (en tanto que lo consideremos así), de muertes y éxitos ancestrales. En su forma más simple, la tercera memoria funciona por un proceso de prueba y error que puede verse como otra analogía más con la selección natural. Cuando busca comida, un animal puede «probar»

varias estrategias. Aunque no busca estrictamente al azar, esta etapa de prueba es análoga —razonablemente— con la mutación genética. La analogía con la selección natural reside en el «refuerzo», el sistema de premios (refuerzo positivo) y castigos (refuerzo negativo). Una acción como dar la vuelta a las hojas (prueba) deja al descubierto larvas de escarabajo y cochinillas ocultas debajo de las mismas (premio). El sistema nervioso tiene una regla que dice: «Cualquier acción de prueba que es seguida de un refuerzo debe ser repetida. Cualquier acción de prueba a la que no siga nada, o peor aún, a la que siga un castigo, por ejemplo, dolor, no debe ser repetida».

Pero la memoria del cerebro va mucho más allá de este proceso cuasidarwiniano de supervivencia no aleatoria de las acciones premiadas y de eliminación de las acciones castigadas del repertorio animal. La memoria (no hacen falta las comillas aquí, porque es el primer significado de la palabra) del cerebro es, al menos en el caso de los cerebros humanos, a la vez vasta y vívida. Contiene escenas detalladas representadas en una versión interna de los cinco sentidos; listas de caras, lugares, canciones, costumbres sociales, reglas, palabras. Lo conocemos bien desde dentro, por lo que no dedicaré muchas palabras a evocarlo, excepto para destacar el sorprendente hecho de que el léxico a mi disposición para escribir y el idéntico, o al menos bastante coincidente, a disposición del lector residen en la misma vasta base de datos neuronal, junto con el aparato sintáctico para reordenarlo en frases y descifrarlas.

Además, la tercera memoria, la que está en el cerebro, ha dado lugar a una cuarta. La base de datos de mi cerebro contiene más que el mero registro de los sucesos y sensaciones de mi vida personal —aunque ese era el límite cuando los cerebros evolucionaron—. Nuestro cerebro incluye memorias colectivas heredadas no genéticamente de generaciones pasadas, transmitidas de boca en boca o mediante la escritura o, ahora, por Internet. El mundo en el que vivimos es mucho más rico gracias a quienes estuvieron antes y escribieron sus impresiones en la base de datos de la cultura humana: Newton y Marconi, Shakespeare y Steinbeck, Bach y los Beatles, Stephenson y los hermanos Wright, Jenner y Salk, Curie y Einstein, Von Neumann y Berners-Lee. Y por supuesto, Darwin.

Las cuatro memorias son parte, o manifestaciones, de la vasta superestructura del aparato de supervivencia que fue construido, originalmente y en primer lugar, por los procesos darwinianos de la

supervivencia no aleatoria del ADN.

«En unas pocas formas o en una sola»

Darwin hizo bien en cubrirse las espaldas, pero hoy estamos bastante seguros de que todas las criaturas vivas de este planeta descienden de un único antepasado. La evidencia, como vimos en el capítulo 10, es que el código genético es universal, pero no idéntico, en todos los animales, plantas, hongos, bacterias, arqueas y virus. El diccionario de sesenta y cuatro palabras mediante el cual palabras de tres letras de ADN se traducen en veinte aminoácidos y un signo de puntuación, que significa «comenzar a leer aquí» o «dejar de leer aquí», es el mismo diccionario de sesenta y cuatro palabras, se mire por donde se mire, en todos los reinos de la vida (con una o dos excepciones demasiado menores como para menoscabar la generalización). Si, por ejemplo, se descubriera que unos microbios extraños, llamados «harumscariotas», no utilizan el ADN en absoluto, o no utilizan proteínas, o utilizan proteínas pero las enlazan entre sí a partir de un conjunto diferente de aminoácidos de los veinte habituales, o que usan ADN pero no un código de tripletes, o un código de tripletes pero no el mismo diccionario de sesenta y cuatro palabras, si se diera alguna de estas condiciones, podríamos sugerir que la vida se ha originado dos veces: una vez para los harumscariotas y otra para el resto. Según lo que Darwin sabía —de hecho, según lo que cualquiera sabía antes del descubrimiento del ADN—, algunas criaturas podrían haber tenido estas propiedades que he atribuido aquí a los harumscariotas, en cuyo caso la expresión «en unas pocas formas» habría estado justificada.

¿Sería posible que dos orígenes independientes de la vida hubieran coincidido en el mismo código de sesenta y cuatro palabras? Es muy poco probable. Para que hubiera sido así, el código existente tendría que haber tenido ventajas importantes sobre códigos alternativos, y tendría que haber una rampa gradual de mejora hacia él, una rampa por la que debería ascender la selección natural. Pero estas condiciones son poco probables. Francis Crick sugirió que el código genético era un «accidente congelado» y que, habiendo ya ocurrido, resultaba muy difícil o imposible de cambiar. El razonamiento es interesante. Cualquier mutación en el código genético

mismo (en contraposición a las mutaciones en los genes que codifica) habría tenido al instante un efecto catastrófico, no solo en un área, sino en todo el organismo. Si cualquier palabra en el diccionario de sesenta y cuatro palabras cambiara su significado, pasando a designar un aminoácido diferente, prácticamente cualquier proteína del cuerpo cambiaría al instante, es probable que en muchos lugares. A diferencia de una mutación ordinaria, que podría, digamos, alargar ligeramente una pata, acortar un ala u oscurecer un ojo, un cambio en el código genético cambiaría todo a la vez, por todo el cuerpo, y esto originaría un desastre. Varios teóricos han propuesto sugerencias ingeniosas sobre formas singulares en las cuales podría evolucionar el código genético: formas en las que, por citar alguno de estos artículos, el accidente congelado podría «descongelarse». Aunque son interesantes, creo que estamos casi seguros de que todas las criaturas vivas cuyo código genético ha sido estudiado descienden de un antepasado común. No importa cuán elaborados y diversos sean los programas de alto nivel que subyacen en las diferentes formas de vida, todos están, al final, escritos en el mismo lenguaje máquina.

Por supuesto que no podemos excluir la posibilidad de que hayan existido otros lenguajes máquina en criaturas ya extinguidas —el equivalente de mis harumscariotas—. Y el físico Paul Davies ha hecho una conjetura razonable en relación a que no hemos buscado con demasiado ahínco para ver si hay algún harumscariota (él no utiliza esta palabra, por supuesto) que no esté extinguido y siga escondido en algún extremo remoto del planeta. Él admite que no es muy probable, pero sugiere —siguiendo un poco la línea del hombre que busca sus llaves bajo una farola en lugar de donde las perdió— que es mucho más fácil y barato buscar en nuestro planeta que viajar a otros planetas y buscar allí. Mientras tanto, no me importa revelar la esperanza personal de que el profesor Davies no encuentre nada, y que todas las formas de vida supervivientes en este planeta utilicen el mismo código máquina y desciendan todas de un mismo antepasado.

«MIENTRAS ESTE PLANETA HA ESTADO GIRANDO DE ACUERDO A LA LEY FIJA DE LA GRAVEDAD»

Los humanos percibían los ciclos que gobiernan nuestras vidas mucho antes de llegar a entenderlos. El ciclo más obvio es el del día y la noche. Los objetos que flotan en el espacio, o que orbitan alrededor de otros objetos por la ley de la gravedad, tienen una tendencia natural a girar respecto a su propio eje. Hay excepciones, pero nuestro planeta no es una de ellas. Su periodo de rotación es ahora de veinticuatro horas (solía girar más deprisa), y lo experimentamos cuando la noche sucede al día.

Debido a que vivimos sobre un cuerpo relativamente masivo, pensamos que la gravedad es una fuerza que tira de todo hacia el centro de ese cuerpo, lo que identificamos como «abajo». Pero la gravedad, como Newton fue el primero en entender, tiene un efecto ubicuo, que es mantener los cuerpos del Universo en órbita semipermanente alrededor de otros cuerpos. Lo experimentamos como el ciclo de las estaciones según nuestro planeta orbita en torno al Sol [89]. Debido a que el eje respecto al que gira nuestro planeta está inclinado con relación al eje de rotación alrededor del Sol, disfrutamos de días más largos y noches más cortas durante la mitad del año, cuando el hemisferio en el que vivimos está inclinado hacia el Sol, periodo que tiene su clímax en verano. Y experimentamos días más cortos y noches más largas durante la otra mitad del año, el periodo que, en su momento extremo, llamamos invierno. Durante el invierno de nuestro hemisferio, los rayos de Sol, cuando nos alcanzan, lo hacen menos directamente. La inclinación del ángulo hace que el rayo invernal, más tenue, se extienda sobre un área mayor que la que el mismo rayo cubriría en verano. En el extremo donde incide con menos fotones por centímetro cuadrado, hace más frío. Menos fotones por hoja de árbol significan menos fotosíntesis. Días más cortos y noches más largas tienen el mismo efecto. Invierno y verano, día y noche, nuestras vidas están gobernadas por ciclos, como dijo Darwin —y el Génesis antes que él: «Mientras la Tierra permanezca, la siembra y la cosecha, el frío y el calor, el verano y el invierno, y el día y la noche, no cesarán»—.

La gravedad interviene en otros ciclos que también afectan a la vida, aunque son menos obvios. A diferencia de los planetas que tienen muchos satélites, a menudo relativamente pequeños, la Tierra tiene un único y gran satélite que llamamos Luna. Es suficientemente grande como para ejercer un efecto gravitacional por sí mismo. Esto lo experimentamos principalmente en el ciclo de las mareas: no solo el ciclo relativamente rápido de las mareas que suben y bajan a diario, sino el ciclo mensual, más

lento, de las mareas vivas y muertas, que son causadas por interacciones entre el efecto gravitacional del Sol y el de la orbitación mensual de la Luna. Estos ciclos de las mareas son especialmente importantes para los organismos marinos y costeros, y hay quien se ha preguntado, de forma poco plausible, si sobrevive algún tipo de memoria de nuestro linaje marino en nuestros ciclos reproductivos mensuales. Puede que sea un poco exagerado, pero es una cuestión interesante especular sobre cómo de diferente habría sido la vida si no hubiéramos tenido una luna en órbita. Se ha sugerido, de nuevo de forma poco admisible en mi opinión, que la vida sin la Luna sería imposible.

¿Qué pasaría si nuestro planeta no girara sobre su eje? Si mantuviera permanentemente una cara mirando hacia el Sol, como hace la Luna con nosotros, la mitad de la Tierra con un día permanente sería un infierno abrasador, mientras la mitad con una noche permanente sería insufriblemente fría. ¿Podría la vida sobrevivir en la penumbra de entre ambas mitades o, quizá, oculta en las profundidades de la tierra? Dudo que se pudiera haber originado en esas condiciones tan poco amables, pero si la Tierra se ralentizase gradualmente hasta pararse, habría mucho tiempo para buscar acomodo, y no sería descabellado pensar que algunas bacterias tendrían éxito.

¿Qué pasaría si la Tierra girase, pero sobre un eje que no estuviera inclinado? Dudo que esto hubiera evitado la vida. No habría ciclo de verano-invierno. Las condiciones de verano e invierno serían una consecuencia de la latitud, no del tiempo. El invierno sería la estación permanente que experimentarían las criaturas que viviesen cerca de los polos, o en las montañas. No veo por qué esto tendría que excluir la vida, pero la vida sin estaciones sería menos interesante. No habría incentivos para migrar o para preferir una época del año en particular para aparearse, o para tirar las hojas o para mudar de plumas o para hibernar.

Si el planeta no estuviera en órbita alrededor de una estrella, la vida sería completamente imposible. La única alternativa a orbitar en torno a una estrella es vagar por el vacío —oscuro, cercano a la temperatura del cero absoluto, solos y lejos de la fuente energética que permite a la vida avanzar corriente arriba, temporal y localmente, contra el torrente termodinámico—. La frase de Darwin «girando de acuerdo a la ley fija de la gravedad» es más que un recurso poético para expresar el incesante e inimaginablemente extenso paso del tiempo.

Orbitar en torno a una estrella es la única forma en que un cuerpo puede mantenerse a una distancia relativamente fija de la fuente de energía. En la proximidad de cualquier estrella —y nuestro Sol es una— hay una zona finita bañada por el calor y la luz, donde es posible la evolución de la vida. Según nos movemos alejándonos de una estrella hacia el espacio, esta zona habitable se reduce rápidamente, siguiendo la famosa ley del cuadrado inverso. Esto es, la luz y el calor disminuyen no en proporción directa a la distancia a la estrella, sino en proporción al cuadrado de la distancia. Es fácil ver por qué esto debe ser así. Imaginemos esferas concéntricas de radio creciente centradas en la estrella. La energía que se irradia de la estrella hacia afuera cae en el interior de una esfera y es «compartida» uniformemente por cada centímetro cuadrado del área interna de la esfera. El área superficial de una esfera es proporcional al cuadrado del radio. Por lo que si la esfera A está dos veces más lejos de la estrella que la esfera B, el mismo número de fotones tiene que ser «compartido» en un área cuatro veces más grande. Esta es la razón por la que Mercurio y Venus, los planetas interiores de nuestro Sistema Solar, son abrasadores, mientras que los exteriores, como Neptuno y Urano, son fríos y oscuros, aunque no tan fríos y oscuros como el espacio profundo.

La segunda ley de la termodinámica dice que, aunque la energía no puede ser creada ni destruida, sí puede —debe, en un sistema cerrado— volverse menos potente para realizar trabajo útil: esto es lo que quiere decir que la «entropía» aumenta. El «trabajo» incluye cosas como bombear agua hacia arriba o —el equivalente químico— extraer carbono del dióxido de carbono de la atmósfera y utilizarlo para fabricar los tejidos de las plantas. Estas dos hazañas se pueden conseguir solo si se inyecta energía al sistema, por ejemplo energía eléctrica para hacer funcionar la bomba de agua, o energía solar para activar la síntesis de azúcar y almidón en una planta verde. Una vez que el agua se ha bombeado hasta la cima de la montaña, tiende luego a ir cuesta abajo, y parte de la energía de este flujo descendente puede utilizarse para hacer girar una noria, que puede generar electricidad, capaz, a su vez, de hacer girar un motor eléctrico para bombear una parte del agua hacia arriba otra vez: ¡pero solo una parte! Parte de la energía siempre se pierde —aunque nunca se destruye—. Las máquinas de movimiento perpetuo (lo podemos decir dogmáticamente) son imposibles.

En la química de la vida, el carbono extraído del aire por las reacciones químicas «cuesta arriba» en las plantas puede quemarse para liberar parte de la energía. Podemos quemarlo, literalmente, en forma de carbón, que cabría imaginar como una forma de energía solar almacenada, puesta ahí por los «paneles solares» de plantas muertas hace mucho tiempo, en el Carbonífero y en otras épocas pasadas. O bien la energía puede liberarse de una forma más controlada que la combustión. Dentro de las células vivas, ya sea de las plantas o de los animales que comen plantas, o de los animales que comen animales que comen plantas (etcétera), los compuestos de carbono creados por el Sol se «queman lentamente». En lugar de arder literalmente en llamas, liberan su energía en un flujo utilizable que se emplea de forma controlada para activar «cuesta arriba» reacciones químicas. Es inevitable que parte de esta energía se pierda en forma de calor —si no lo hiciera, tendríamos una máquina de movimiento perpetuo, que es (nunca se dice demasiadas veces) imposible—.

Casi toda la energía que hay en el Universo está siendo degradada constantemente desde formas capaces de realizar un trabajo a formas incapaces de hacerlo. Hay una nivelación, una mezcla, hasta que eventualmente todo el Universo termine en una «muerte térmica» (literalmente) uniforme y sin sucesos. Pero mientras el Universo en su conjunto se precipita hacia abajo enfilando esa inevitable muerte térmica, hay tiempo para que pequeñas cantidades de energía activen sistemas locales en la dirección opuesta. El agua del mar se eleva en el aire en forma de nubes, que más tarde depositan su agua en la cima de las montañas, desde donde corre hacia abajo en riachuelos y ríos, pudiendo hacer girar norias o estaciones hidroeléctricas. La energía para elevar el agua (y, por tanto, para hacer girar las turbinas y las centrales hidroeléctricas) procede del Sol. La energía del Sol está haciendo algo similar en las hojas verdes, activa reacciones químicas localmente «cuesta arriba» para fabricar azúcar y almidón y celulosa y tejidos vegetales. En algún momento las plantas mueren o son comidas por animales. La energía solar atrapada tiene la oportunidad de deslizarse «cuesta abajo», atravesando múltiples cascadas y a través de cadenas alimentarias largas y complejas que culminan en la degradación de las plantas por las bacterias y los hongos. O algunas de ellas pueden ser secuestradas bajo tierra, primero como turba y luego como carbón. Pero la tendencia universal

hacia la muerte térmica final nunca se invierte. En cada eslabón de la cadena alimentaria, y a través de cada cascada descendente dentro de cada célula, parte de la energía se degrada haciéndose inútil. Las máquinas de movimiento perpetuo son... de acuerdo, de acuerdo, ya lo hemos dicho suficientes veces, pero *no* me disculparé por citar, como he hecho en al menos un libro anterior, el maravilloso comentario de sir Arthur Eddington sobre el tema:

> Si alguien te dice que tu teoría de juguete sobre el Universo está en desacuerdo con las ecuaciones de Maxwell, tanto peor para las ecuaciones de Maxwell. Si resulta que es contradicha por la observación, bien, estos experimentalistas meten la pata a veces. Pero si se descubre que tu teoría va contra la segunda ley de la termodinámica, no puedo darte esperanza; no hay otra alternativa más que derrumbarse en la más profunda humillación.

Cuando los creacionistas dicen, como suelen hacer a menudo, que la teoría de la evolución contradice la segunda ley de la termodinámica, nos están diciendo que no comprenden dicha ley (ya sabíamos que no comprenden la evolución). No hay contradicción, ¡gracias al Sol!

El sistema completo, si hablamos sobre la vida, o sobre elevar agua a las nubes y que caiga otra vez, es finalmente dependiente de un flujo constante de energía procedente del Sol. Sin desobedecer las leyes de la física y de la química —y ciertamente nunca desobedeciendo la segunda ley—, la energía del Sol alimenta la vida, estirando las leyes de la física y de la química para que se alcancen logros evolutivos prodigiosos de complejidad, diversidad, belleza, y una ilusión misteriosa de improbabilidad estadística y diseño deliberado. Esta ilusión es tan convincente que engañó a nuestras mentes más grandes durante siglos, hasta que Charles Darwin entró en escena. La selección natural es una bomba de improbabilidad: un proceso que genera lo estadísticamente improbable. Aprovecha sistemáticamente esa minoría de los cambios aleatorios que tienen lo que hace falta para la supervivencia, y los acumula, pasito a pasito, a lo largo de escalas de tiempo inimaginables, hasta que la evolución finalmente escala montañas de improbabilidad y diversidad, picos cuya altura y alcance parecen no tener límites, la montaña metafórica que llamé «Monte improbable». La bomba de improbabilidad de la selección natural, que dirige la complejidad de lo

vivo hacia el «Monte improbable», es un tipo de equivalente estadístico de la energía del Sol elevando el agua hasta la cima de una montaña convencional [90]. La vida evoluciona hacia mayor complejidad solo porque la selección natural la dirige localmente lejos de lo estadísticamente probable y hacia lo improbable. Y esto es posible solo gracias al incesante suministro de energía del Sol.

«Desde un principio tan simple»

Sabemos mucho sobre cómo ha funcionado la evolución desde que empezó, mucho más de lo que Darwin sabía. Pero no sabemos más de lo que Darwin sabía sobre cómo comenzó en primer lugar. Este es un libro sobre la evidencia, y no tenemos evidencia sobre el evento memorable que dio lugar a la evolución en este planeta. Podría haber sido un evento de suprema rareza. Solo tenía que ocurrir una vez, y por lo que sabemos, solo ocurrió una vez. Es incluso posible que solo ocurriera una vez en todo el Universo, aunque lo dudo. Una cosa que sí podemos decir sobre la base de la lógica pura, en lugar de la evidencia, es que Darwin fue prudente al decir «desde un principio tan simple». Lo contrario a simple es estadísticamente improbable. Las cosas estadísticamente improbables no comienzan a existir espontáneamente: eso es lo que *significa* estadísticamente improbable. El principio tuvo que ser simple y la evolución por selección natural es todavía el único proceso que conocemos en el que un comienzo simple puede dar lugar a resultados complejos.

Darwin no discutió cómo comenzó la evolución en *El origen de las especies*. Pensó que el problema estaba más allá de la ciencia de su época. En la carta a Hooker que cité antes, Darwin continuaba: «Es una tontería pensar ahora sobre el origen de la vida; también podríamos pensar sobre el origen de la materia». No descartó la posibilidad de que el problema se resolviera finalmente (de hecho, el problema del origen de la materia estaba en gran medida resuelto), pero solo en un futuro lejano: «Pasará algún tiempo antes de que veamos “limo, protoplasma, etc.” generando un nuevo animal».

En ese punto de la edición de las cartas de su padre, Francis Darwin insertó una nota al pie diciéndonos:

> Mi padre escribió sobre el mismo tema en 1871: «A veces se dice que todas las condiciones para la primera producción de un organismo vivo están presentes ahora, que podrían haberlo estado siempre. Pero si (y ¡oh, qué gran «si»!) pudiéramos imaginar una pequeña charca templada, con todo tipo de sales de amoniaco y de fósforo, luz, calor, electricidad, etcétera, presentes, donde un compuesto de proteína se formara químicamente y estuviera en disposición de seguir sufriendo cambios más complejos, en el día de hoy esa materia sería instantáneamente devorada o absorbida, cosa que no habría pasado antes de que se formaran las criaturas vivas».

Charles Darwin estaba haciendo dos cosas diferentes. Por un lado estaba presentando su especulación particular sobre cómo se podría haber originado la vida (el famoso pasaje de la «pequeña charca»). Por otro lado, estaba desengañando a la ciencia actual de la esperanza de ver alguna vez el evento replicado delante de nuestros ojos. Incluso si «las condiciones para la primera producción de un organismo vivo» estuvieran todavía presentes, cualquier producción sería «instantáneamente devorada o absorbida» (presumiblemente por bacterias, podríamos añadir nosotros con buen criterio), «lo que no habría pasado antes de que se formaran las criaturas vivas».

Darwin escribió esto siete años después de que Louis Pasteur hubiera dicho, en una conferencia en la Sorbona: «Nunca la doctrina de la generación espontánea se recuperará del golpe mortal asestado por este sencillo experimento». El experimento sencillo fue aquel en el que Pasteur mostró, en contra de la expectación popular de su época, que el caldo de cultivo sellado para evitar el acceso de los microorganismos no se estropeaba.

Los creacionistas citan a veces demostraciones como la de Pasteur como evidencia a su favor. Este falso silogismo se plantea así: «La generación espontánea nunca se observa actualmente. Por tanto, el origen de la vida es imposible». El comentario de Darwin de 1871 fue diseñado precisamente como una réplica a este tipo de conclusión ilógica. Evidentemente, la generación espontánea de la vida es un evento muy raro, pero debió de ocurrir al menos una vez, y eso es cierto independientemente de si creemos que la generación espontánea original fue un suceso natural o sobrenatural. La cuestión de cómo es de improbable un evento que originase la vida es interesante y volveré sobre ella.

Los primeros intentos serios de pensar sobre cómo se podría haber originado la vida, los de Oparin en Rusia y (de forma independiente) Haldane en Inglaterra, comenzaron sugiriendo que la atmósfera temprana debió de ser muy diferente de la actual. En particular, no habría habido oxígeno libre, y la atmósfera habría sido, por tanto, —como los químicos la llamarían misteriosamente— una atmósfera «reductora». Ahora sabemos que todo el oxígeno libre de la atmósfera es producto de la vida, específicamente de las plantas, no una parte de las condiciones previas al surgimiento de la vida. El oxígeno inundó la atmósfera como un contaminante, incluso como un veneno, hasta que la selección natural dio forma a las cosas vivas para que prosperaran con ese material y, de hecho, para que se asfixiaran sin él. La atmósfera «reductora» inspiró la aproximación experimental más famosa al problema del origen de la vida, el matraz lleno de ingredientes simples de Stanley Miller, que burbujeó y chisporroteó durante solo una semana antes de proporcionar aminoácidos y otros precursores de la vida.

La «pequeña charca templada» de Darwin, junto con la pócima de brujo inventada por Miller y que aquel inspiró, suelen rechazarse actualmente como preámbulo para introducir alternativas preferidas. La verdad es que no hay un consenso abrumador. Se han sugerido varias ideas prometedoras y no hay una evidencia decisiva que señale inequívocamente a una. En libros anteriores he analizado varias posibilidades interesantes, incluyendo la teoría de los cristales inorgánicos de Graham Cairns-Smith y —más de moda actualmente— la de que las condiciones bajo las que surgió la vida eran similares a las del hábitat hadeano de las bacterias «termópilas» actuales, algunas de las cuales prosperan y se reproducen en corrientes cálidas que están literalmente hirviendo. Hoy día, una gran mayoría de biólogos se está desplazando hacia la «teoría del mundo de ARN», por una razón que encuentro bastante convincente.

No tenemos evidencia sobre cuál fue el primer paso en la creación de la vida, pero sabemos el *tipo* de paso que tuvo que ser. Tuvo que ser lo que fuera que se necesitase para iniciar la selección natural. Hasta que se dio ese paso, el tipo de mejoras que la selección natural puede conseguir eran imposibles. Y eso significa que el paso clave fue el surgimiento, por algún proceso que nos es desconocido, de una entidad autorreplicante. Debido a que ningún proceso de copia es perfecto, se habría llegado inevitablemente a crear una cierta variedad en la población, y si existe la variedad en una

población de replicantes, aquellos que tengan lo necesario para alcanzar el éxito llegarán a predominar. Esto es la selección natural, y no pudo haber empezado hasta que la primera entidad replicante comenzara a existir.

Darwin, en el párrafo de su «pequeña charca», especuló sobre que el evento clave en el origen de la vida podría haber sido el surgimiento espontáneo de una proteína, pero resulta ser menos prometedor que la mayoría de sus ideas. No es que neguemos que las proteínas son importantes para la vida. Vimos en el capítulo 8 que tienen una propiedad especial para plegarse formando objetos tridimensionales, cuya forma exacta está especificada por la secuencia unidimensional de sus constituyentes, los aminoácidos. También vimos que esta misma forma exacta les confiere la habilidad de catalizar reacciones químicas con gran especificidad, acelerando ciertas reacciones hasta un billón de veces. La especificidad de las enzimas hace posible la química biológica, y las proteínas parecen casi indefinidamente flexibles en cuanto a la variedad de formas que pueden tomar. Eso es lo que las proteínas hacen bien. Son muy, muy, buenas haciéndolo, y Darwin tenía razón al mencionarlo. Pero hay algo que las proteínas hacen extraordinariamente mal, y eso es lo que Darwin pasó por alto. Son del todo incapaces de replicarse. No pueden fabricar copias de ellas mismas. Esto significa que el paso clave en el origen de la vida no pudo haber sido el surgimiento espontáneo de una proteína. Entonces, ¿cuál fue?

La molécula que mejor se replica entre las que conocemos es el ADN. En las formas avanzadas de vida que nos resultan familiares, el ADN y las proteínas se complementan con elegancia. Las moléculas de proteínas son enzimas brillantes y desastrosas replicantes. El ADN es justo lo contrario. No se pliega en estructuras tridimensionales y, por tanto, no funciona como una enzima. En lugar de plegarse, mantiene su forma abierta, lineal, y esto hace que sea ideal como replicante y como especificador de secuencias de aminoácidos. Las moléculas de proteína, precisamente porque se pliegan en formas «cerradas», no «exponen» su información secuencial, de manera que puedan ser copiadas o «leídas». La información de secuencia está inaccesiblemente oculta dentro de la proteína plegada. Pero en la larga cadena de ADN, la información secuencial está expuesta y disponible para funcionar como un molde.

El «Catch-22» [91] del origen de la vida es el siguiente. El ADN se puede replicar, pero necesita enzimas para poder catalizar el proceso. Las proteínas pueden catalizar la formación de ADN, pero necesitan especificar la secuencia correcta. ¿Cómo podrían las moléculas de la Tierra temprana romper este círculo vicioso y permitir que comenzara la selección natural? Llega el ARN.

El ARN pertenece a la misma familia de moléculas que el ADN, los polinucleótidos. Es capaz de transportar el equivalente al código de cuatro «letras» del ADN, y lo hace en las células vivas, transportando información del ADN donde quiera que se pueda utilizar. El ADN actúa como un molde para construir secuencias de ARN. Y luego se construyen secuencias de proteínas utilizando ARN, no ADN, como molde. Algunos virus no tienen ADN en absoluto. El ARN es su molécula genética, responsable única de transportar información de generación en generación.

Y ahora llegamos al aspecto clave de la teoría del mundo de ARN sobre el origen de la vida. Además de tener una forma que le permite transmitir información de secuencias, el ARN es también capaz de autoensamblarse, como nuestro collar magnético del capítulo 8, en formas tridimensionales que tienen actividad enzimática. Existen enzimas de ARN. No son tan eficientes como las enzimas de proteínas, pero hacen su trabajo. La teoría del mundo de ARN sugiere que el ARN era suficientemente bueno como para emular su función hasta que las proteínas evolucionasen y se hicieran cargo del trabajo enzimático, y que el ARN era también suficientemente buen replicante como para arreglárselas con ese trabajo hasta que evolucionó el ADN.

Yo encuentro plausible la teoría del mundo de ARN, y creo que los químicos probablemente lograrán simular en el laboratorio, en las próximas décadas, una reconstrucción completa de los hechos que lanzaron la selección natural a su memorable camino hace cuatro mil millones de años. Ya se han dado algunos pasos fascinantes en esa dirección.

Antes de dejar este asunto, sin embargo, debo repetir el aviso que he dado en libros anteriores. Realmente no necesitamos una teoría plausible sobre el origen de la vida, y podríamos incluso preocuparnos si se descubriera una teoría demasiado plausible. Esta curiosa paradoja surge de la famosa pregunta «¿Dónde está todo el mundo?», que fue planteada por el físico Enrico Fermi. Aunque la pregunta suena muy enigmática, los

colegas de Fermi, físicos del Laboratorio de Los Alamos, estaban suficientemente al corriente como para entender lo que quería decir a la perfección. ¿Por qué no nos han visitado las criaturas vivas de otros lugares del Universo? Si no en primera persona, al menos a través de señales de radio (lo que es mucho más probable).

Actualmente es posible estimar que hay más de mil millones de planetas en nuestra galaxia, y alrededor de mil millones de galaxias. Esto significa que, aunque es posible que seamos el único planeta que alberga vida en la galaxia, para que eso sea cierto la probabilidad de que surja la vida en un planeta tendría que ser no mucho mayor que uno entre mil millones. La teoría que buscamos sobre el origen de la vida en este planeta, ¡seguro que *no* podría ser una teoría plausible! Si lo fuera, la vida debería ser común en la galaxia. Quizá es común, en cuyo caso una teoría plausible es lo que necesitamos. Pero no tenemos evidencia de que exista la vida fuera de nuestro planeta, y al menos tenemos derecho a conformarnos con una teoría no plausible. Si nos planteamos seriamente la pregunta de Fermi, e interpretamos la ausencia de visitas como una evidencia de que la vida es extraordinariamente rara en la galaxia, deberíamos dar un paso hacia adelante y esperar que no exista una teoría plausible de la vida. Desarrollé este argumento con más profundidad en *El relojero ciego,* por lo que termino aquí esta elucubración. Mi apuesta, por lo que pueda valer (no mucho, porque hay demasiadas incógnitas), es que la vida es muy rara, pero que el número de planetas es tan grande (se descubren más de forma continua) que probablemente no estemos solos, y puede haber millones de islas de vida en el Universo. Sin embargo, incluso millones de islas podrían estar tan separadas que no tendrían ninguna oportunidad de encontrarse, ni siquiera a través de la radio. Desde un punto de vista práctico, podríamos perfectamente estar solos.

«HAN EVOLUCIONADO, Y ESTÁN EVOLUCIONANDO, UN SINFÍN DE FORMAS HERMOSAS Y MARAVILLOSAS»

No estoy seguro de lo que quería decir Darwin con «sinfín». Podría haber sido solo un término ponderativo, utilizado para adornar a «más hermosas y maravillosas». Quizá fuese así. Pero quiero pensar que Darwin

pretendía decir algo más específico con «sinfín». Al mirar hacia atrás en la historia de la vida, vemos un cuadro de novedad sin fin, novedad que siempre rejuvenece. Los individuos mueren; las especies, las familias, los órdenes e incluso las clases se extinguen. Pero el proceso evolutivo parece salvarse a sí mismo y retomar su actividad recurrente, con renovada frescura, con intacta juventud, a medida que un ciclo da lugar a otro ciclo.

Déjeme volver brevemente a los modelos de ordenador de la selección artificial que describí en el capítulo 2: el «safari park» de los biomorfos computacionales, incluidos los artromorfos y los conchomorfos que mostraban cómo podría haber evolucionado el gran número de conchas de moluscos. En ese capítulo introduje esas criaturas computacionales como una ilustración de cómo funciona la selección artificial y cómo es de potente si se le dan suficientes generaciones. Ahora quiero utilizar estos modelos de ordenador para un propósito diferente.

Mientras miraba a la pantalla del ordenador y a los biomorfos evolucionando, ya fuesen de color o negros, o cuando los artromorfos evolucionaban, la impresión irresistible era que nunca se hacía aburrido. Había una sensación de extrañeza sin fin. El programa nunca parecía «cansarse» y tampoco lo hacía el jugador. Lo contrario que sucedía con el programa de D'Arcy que describí brevemente en el capítulo 10, aquel en el que los «genes» tiraban matemáticamente de las coordenadas de una hoja virtual de goma sobre la que se había dibujado al animal. Cuando se hace selección artificial con el programa de D'Arcy, el usuario siente, según pasa el tiempo, que se aleja más y más del punto de referencia en el que las cosas tienen sentido, adentrándose en una tierra de nadie con formas perdidas carentes de elegancia, donde el sentido parece disminuir más cuanto más nos alejamos del punto de partida. Ya sugerí una razón para explicar esto. En los programas de los biomorfos, artromorfos y conchomorfos teníamos el equivalente computacional de un proceso embriológico —tres procesos embriológicos diferentes, todos ellos, cada uno en su forma, biológicamente plausibles—. El programa de D'Arcy, en contraste, no simula la embriología en absoluto. En lugar de eso, como expliqué en el capítulo 10, desarrolla las distorsiones por las que una forma adulta se habría transformado en otra. Esta ausencia de una embriología le priva de la «fertilidad inventiva» que muestran los biomorfos, los artromorfos y los conchomorfos. Y la misma fertilidad

inventiva muestra la embriología real, lo cual es una razón mínima por la que la evolución genera «un sinfín de formas hermosas y maravillosas». Pero ¿podemos ir más allá de una razón mínima?

En 1989 escribí un artículo llamado «La evolución de la capacidad de evolucionar» en el que sugería que no solo los animales mejoran en su capacidad de sobrevivir según pasan las generaciones: linajes de animales mejoran *evolucionando*. ¿Qué significa ser «bueno evolucionando»? ¿Qué tipos de animales son buenos evolucionando? Los insectos en tierra y los crustáceos en el mar parecen ser los campeones, diversificándose en miles de especies, ocupando nichos, cambiando las costumbres a través del tiempo evolutivo con juguetona despreocupación. Los peces también muestran una fecundidad evolutiva sorprendente, así como las ranas y los más familiares mamíferos y pájaros.

Lo que sugerí en mi artículo de 1989 es que la capacidad de evolucionar es una propiedad de las embriologías. Los genes mutan para cambiar el cuerpo de un animal, pero deben pasar por procesos de desarrollo embrionario. Y la embriología de algunas especies es mejor que la de otras a la hora de presentar repertorios útiles de variación genética para que la selección natural trabaje sobre ellos, y puedan por tanto evolucionar mejor. «Puedan» parece poco contundente. ¿No es casi obvio que, en este sentido, algunas embriologías *deben* de ser mejores que otras en su capacidad de evolucionar? Yo creo que sí. Sin embargo, es menos obvio, pero aun así creo que se puede defender, el argumento de que podría haber un tipo de selección natural de mayor nivel en favor de aquella «embriología con capacidad de evolucionar». Según pasa el tiempo, toda embriología mejoraría su capacidad de evolucionar. Si hay una «selección de mayor nivel» de este tipo, sería bastante diferente de la selección natural ordinaria, que elige a los individuos por su capacidad de transmitir genes con éxito (o, de forma equivalente, elige genes por su capacidad para construir individuos con éxito). La selección de mayor nivel que mejore la capacidad de evolución sería del tipo que el gran biólogo evolutivo George C. Williams llamó «selección de clado». Un clado es una rama del árbol de la vida, como una especie, un género, un orden o una clase. Podríamos decir que se da una selección de clado, cuando un clado, como el de los insectos, se extiende, diversifica y puebla el mundo con más éxito que otro clado, como el de los pogonóforos (no, probablemente no han oído hablar de estas criaturas oscuras con forma de

gusano, y hay un motivo: ¡son un clado sin éxito!). La selección de clados no implica que los clados compitan entre sí. Los insectos no compiten, al menos directamente, con los pogonóforos por comida o espacio o cualquier otro recurso. Pero el mundo está lleno de insectos y casi vacío de pogonóforos, y tenemos la tentación, con razón, de atribuir el éxito de los insectos a alguna de sus características. Conjeturo que es algo relacionado con su embriología lo que les hace propensos a evolucionar. En el capítulo de *Escalando el monte improbable* llamado «Embriones caleidoscópicos», hice varias sugerencias sobre características especiales que podrían formar parte de la capacidad de evolucionar, incluyendo restricciones de *simetría* y arquitecturas modulares como la de un plan corporal *segmentado.*

Quizá en parte debido a su arquitectura segmentada modular, el clado de los artrópodos [92] es bueno evolucionando, generando variaciones en múltiples direcciones, diversificándose y llenando nichos de forma oportunista según van quedando disponibles. Otros clados pueden tener un éxito similar porque su embriología está restringida al desarrollo de imágenes-espejo en varios planos [93]. Los clados que vemos poblando las tierras y los mares son los clados que evolucionan bien. En la selección de clados, los que no tienen éxito se extinguen, o no se diversifican lo suficiente como para abordar con éxito diferentes desafíos: se atrofian y perecen. Las clados con éxito florecen y prosperan como hojas de un árbol filogenético. La selección de clados suena, de forma seductora, como la selección natural darwiniana. Debemos resistirnos a esa seducción, o hacer sonar las campanas de alarma. Los parecidos superficiales pueden llevar a confusión con facilidad.

El hecho de nuestra propia existencia es casi demasiado sorprendente como para ser cierto. Y también el hecho de que estemos rodeados por un rico ecosistema de animales que más o menos se parecen a nosotros, por plantas que se nos parecen un poco menos y de las que, en última instancia, dependemos para nuestra alimentación, y por bacterias que se parecen a nuestros antepasados remotos y a las cuales todos volveremos al descomponernos cuando nuestra vida acabe. Darwin estaba muy por delante de su tiempo al comprender la magnitud del problema de nuestra existencia, así como al acercarse a su solución. También se adelantó a su tiempo al apreciar la dependencia mutua entre las plantas y animales y todas las otras criaturas, en relaciones cuya complejidad desafía a la

imaginación. ¿Cómo puede ser que no solo existamos, sino que estemos rodeados por tanta complejidad, tanta elegancia y un sinfín de formas hermosas y maravillosas?

La respuesta es esta. No podría haber sido de otra manera, dado que somos capaces de darnos cuenta de nuestra existencia y de hacer preguntas sobre ella. No es un accidente, como los cosmólogos nos recuerdan, que veamos estrellas en nuestro cielo. Puede haber universos que no contengan estrellas, universos cuyas leyes físicas y constantes dejen el hidrógeno primitivo extendido uniformemente en lugar de concentrado en las estrellas. Pero nadie está observando esos universos, porque las entidades capaces de observar no pueden evolucionar sin estrellas. No solo la vida necesita al menos una estrella para que le suministre energía. Las estrellas también son las calderas en las que se forjan la mayoría de los elementos químicos, y no puede haber vida sin una química rica. Podríamos recorrer las leyes de la física, una por una, y decir lo mismo de todas ellas: no es un accidente que veamos...

Lo mismo se puede decir de la biología. No es un accidente que veamos verde casi en cualquier sitio al que miremos. No es un accidente que nos encontremos situados en una pequeña ramita en medio del floreciente y próspero árbol de la vida. No es un accidente que estemos rodeados por millones de otras especies, creciendo, pudriéndose, nadando, caminando, volando, cavando, acechando, persiguiendo, huyendo, sobrepasando, burlando. Sin un número de plantas verdes superior en una relación de al menos diez a uno respecto a nosotros, no tendríamos energía. Sin la escalada continua de la carrera armamentista entre depredadores y presas, parásitos y huéspedes, sin la «guerra de la naturaleza» de Darwin, sin su «hambruna y muerte», no habría sistemas nerviosos capaces de ver algo, y mucho menos de apreciarlo o entenderlo. Estamos rodeados de un sinfín de las formas más hermosas y maravillosas, y no es un accidente, sino la consecuencia directa de la evolución por selección natural no aleatoria: el único juego en la escena, el mayor espectáculo sobre la Tierra.

APÉNDICE

LOS NEGADORES DE LA HISTORIA

A intervalos regulares desde 1982, Gallup, la consultora de opinión más conocida de Estados Unidos, ha estado sondeando la opinión nacional sobre esta pregunta:

> ¿Cuál de las siguientes afirmaciones está más cerca de sus ideas sobre el origen y desarrollo de los seres humanos?
>
> 1. Los seres humanos se han desarrollado a lo largo de millones de años a partir de formas de vida menos avanzadas, pero Dios tomó parte en ese proceso: 36%.
> 2. Los seres humanos se han desarrollado a lo largo de millones de años a partir de formas menos avanzadas de vida, pero Dios no tomó parte en ese proceso: 14%.
> 3. Dios creó a los seres humanos en una forma muy similar a la actual en algún momento durante los últimos 10.000 años: aproximadamente, 44%.

Los porcentajes que he incluido son de 2008. Las cifras de 1982, 1993, 1997, 1999, 2001, 2004, 2006 y 2007 son muy similares.

No me sorprende ver que es una minoría del 14% la que ha elegido la casilla de la respuesta 2. Es mala suerte que la forma de expresar la respuesta, «pero Dios no tomó parte en ese proceso», parezca calculada para sesgar gratuitamente en contra de ella la opinión de las personas religiosas. El desastre está en la cantidad de encuestados que eligió la respuesta 3. El 40% de los norteamericanos niega la evolución totalmente, esté o no guiada por Dios, y lo que implica es que creen que el mundo entero no tiene más de diez mil años de antigüedad. Como he señalado

antes, dado que la edad verdadera del mundo es de 4.600 millones de años, esto es equivalente a creer que el ancho de América del Norte es de menos de diez metros. En ninguno de los años en que se hizo el sondeo, el porcentaje de la respuesta 3 bajó del 40%. En dos de estos años llegó al 47%. Más del 40% de los norteamericanos niegan que los humanos evolucionaron a partir de otros animales, y piensan que nosotros —y por implicación toda la vida— fuimos creados por Dios en los últimos diez mil años. Este libro es necesario.

Las preguntas planteadas por Gallup se centraron en los seres humanos, y ello podría haber elevado la tensión emocional y haber hecho más difícil aceptar el punto de vista científico. En 2008, el Pew Forum publicó una encuesta similar en la que no se mencionaba específicamente a los humanos. Los resultados fueron totalmente compatibles con los de Gallup. Las propuestas ofrecidas eran las siguientes, con los porcentajes correspondientes a las mismas:

> La vida en la Tierra ha...
>
> 1. Existido en su forma actual desde el principio de los tiempos: 42%.
> 2. Evolucionado en el tiempo: 48%.
>
> Evolución por selección natural: 26%.
>
> Evolución guiada por un ser supremo: 18%.
>
> Evolución, pero no sabe cómo: 4%.
>
> 3. No sabe: 10%.

Las preguntas de Pew no mencionaban fechas, por lo que no sabemos qué parte de los encuestados que rechazaron positivamente la evolución piensa también que el mundo tiene menos de diez mil años de antigüedad, como hace el 44% de Gallup, probablemente. Parece razonable que también el 42% de Pew estuviera de acuerdo con una cifra de miles de años en lugar de la edad de 4.600 millones de años propuesta por los científicos. Creer que la vida en la Tierra ha existido en su forma presente durante 4.600 millones de años sin ningún cambio parece tan absurdo como creer que ha existido en su forma presente solo durante unos pocos miles de años, y es ciertamente antibíblico.

¿Qué pasa en Gran Bretaña? ¿Cómo lo comparamos? En 2006 la serie de documentales de ciencia de la BBC, *Horizon* [94], de gran calidad (comparativamente), encargó una encuesta entre la población británica a Ipsos MORI. Desafortunadamente, la pregunta clave no estaba bien formulada. Se pidió a los participantes en el sondeo que eligieran entre una de las tres «teorías o explicaciones sobre el origen y desarrollo de la vida en la Tierra». He puesto el porcentaje después de cada opción:

> (a) La «teoría de la evolución» dice que los humanos se han desarrollado a lo largo de millones de años a partir de formas menos avanzadas de vida. Dios no ha tomado parte en este proceso: 48%.
>
> (b) La «teoría del creacionismo» dice que Dios creó a los humanos esencialmente con la forma que tienen en la actualidad, en algún momento de los últimos 10.000 años: 22%.
>
> (c) La «teoría del diseño inteligente» dice que ciertas características de los seres humanos se explican mejor por la intervención de un ser sobrenatural, por ejemplo Dios: 17%.
>
> (d) No sabe: 12%.

Lamentablemente, estas opciones pudieron dejar a algunas personas sin su respuesta preferida. No dejan lugar para aquellos que creen «(a) pero Dios tuvo un papel en este proceso». Dada la inclusión de la frase «Dios no ha tomado parte en este proceso», no sorprende que la cifra de (a) sea tan baja como un 48%. El resultado de la opción (b), un 22%, es, sin embargo, alarmantemente alto, en particular por el ridículo límite de diez mil años. Y si sumamos (b) y (c) para obtener el porcentaje que apoya alguna forma de creacionismo, obtenemos un 39%. Esta cifra no es todavía tan alta como la de Estados Unidos, de más del 40%, sobre todo teniendo en cuenta que este último porcentaje se refiere a los creacionistas que defienden una Tierra joven, mientras que el 39% de los británicos incluye a los creacionistas que defienden una Tierra más antigua, tal y como se expresa en (c).

La encuesta de MORI en Gran Bretaña planteaba una segunda cuestión, relacionada con la educación. Dadas las mismas tres teorías, a los encuestados se les preguntó si deberían o no ser enseñadas en las clases de ciencias. Es muy inquietante que solo un porcentaje del 69% de la muestra

piense que la evolución debe ser enseñada en las clases de ciencias —sea con alguna forma de teoría de la creación o del diseño inteligente, o en exclusiva—.

El Eurobarómetro llevó a cabo en 2005 un estudio más ambicioso, que incluía a Gran Bretaña pero no a Estados Unidos. Esta encuesta muestreó opiniones y creencias sobre cuestiones científicas en treinta y dos países europeos (incluyendo a Turquía, que es el único país de mayoría islámica que aspira a ser miembro de la Unión Europea). La Tabla 1 muestra los porcentajes de respuestas afirmativas a la proposición de que «Los Seres humanos, tal como los conocemos hoy en día, se desarrollaron a partir de especies más antiguas de animales». Esta es una afirmación más modesta que (a) en la encuesta de MORI, ya que no excluye la posibilidad de que Dios tomara parte en el proceso evolutivo.

He ordenado los países en función del porcentaje de respuestas afirmativas a la proposición, esto es, el porcentaje que da la respuesta correcta, según lo entiende la ciencia moderna. El 85% de la muestra islandesa piensa, como hacen los científicos, que los humanos han evolucionado a partir de otras especies. Un irrisorio 27% de la población turca también lo hace. Gran Bretaña está situada en quinto lugar, con un 13% de la población que niega activamente la evolución. Estados Unidos no entraba en el estudio europeo, pero el hecho deplorable de que esté situado solo por delante de Turquía en esta cuestión ha tenido mucha publicidad últimamente.

Más extraños son los resultados de la Tabla 2, que muestra los porcentajes equivalentes para la proposición de que «Los primeros humanos vivieron en la misma época que los dinosaurios». Una vez más, he ordenado los países por el porcentaje que da la respuesta correcta, que en este caso es «falso» [95]. De nuevo se sitúa en último lugar Turquía, donde un 42% de los encuestados cree que los primeros humanos coexistieron con los dinosaurios, y solo el 30% lo niega, frente al 87% de los suecos. Gran Bretaña, siento decirlo, está en la mitad inferior, con un 28% que toma aparentemente su conocimiento científico e histórico de los Picapiedra, en lugar de cualquier fuente educativa.

Como educador en Biología, encuentro un patético consuelo en otro resultado de un estudio del Eurobarómetro, que revela el gran número (19% en Gran Bretaña) que cree que la Tierra tarda un mes en dar la vuelta alrededor del Sol. La cifra es de más del 20% en Irlanda, Austria, España y

Dinamarca. Me pregunto, ¿qué piensan que es un año? ¿Por qué las estaciones llegan y se van con esa regularidad? ¿Ni siquiera tienen *curiosidad* por las razones de un hecho tan destacado de su mundo? Estas cifras tan sorprendentes no deberían servir de consuelo, por supuesto. He remarcado la palabra «patético». Me refería a que parece que nos enfrentamos a una ignorancia general de la ciencia, lo que ya es bastante malo, pero al menos es mejor que el prejuicio positivo *contra* una ciencia en particular, la ciencia evolutiva, que parece estar presente en Turquía (y, uno no puede evitar así suponerlo, en gran parte del mundo islámico). También, innegablemente, en los Estados Unidos de América, como vimos en las encuestas de Gallup y de Pew.

Tabla 1: Respuestas a la propuesta de que «Los seres humanos, tal como los conocemos hoy en día, se desarrollaron a partir de especies más antiguas de animales»

País	Total	Verdadero (%)	Falso (%)	NS/NC (%)
Islandia	500	85	7	8
Dinamarca	1.013	83	13	4
Suecia	1.023	82	13	5
Francia	1.021	80	12	8
Gran Bretaña	1.307	79	13	8
Bélgica	1.024	74	21	5
Noruega	976	74	18	8
España	1.036	73	16	11
Alemania	1.507	69	23	8
Italia	1.006	69	20	11
Luxemburgo	518	68	23	10
Holanda	1.005	68	23	9
Irlanda	1.008	67	21	12
Hungría	1.000	67	25	8
Eslovenia	1.060	67	25	8

Finlandia	1.006	66	27	7
República Checa	1.037	66	27	7
Portugal	1.009	64	21	15
Estonia	1.000	64	19	17
Malta	500	63	25	13
Suiza	1.000	62	28	10
Eslovaquia	1.241	60	29	12
Polonia	999	59	27	14
Croacia	1.000	58	28	15
Austria	1.034	57	28	15
Grecia	1.000	55	32	14
Rumania	1.005	55	25	20
Bulgaria	1.008	50	21	29
Letonia	1.034	49	27	24
Lituania	1.003	49	30	21
Chipre	504	46	36	18
Turquía	1.005	27	51	22

Fuente: Eurobarómetro, 2005.

Tabla 2: Respuestas a la propuesta de que «Los primeros humanos vivieron en la misma época que los dinosaurios»

País	Total	Verdadero (%)	Falso (%)	NS/NC (%)
Suecia	1.023	9	87	4
Alemania	1.507	11	80	9
Dinamarca	1.013	14	79	6
Suiza	1.000	9	79	12
Noruega	976	13	79	7
República Checa	1.037	15	78	7

Luxemburgo	518	15	77	9
Holanda	1.005	14	75	10
Finlandia	1.006	21	73	7
Islandia	500	12	72	16
Eslovenia	1.060	20	71	9
Bélgica	1.024	24	70	6
Francia	1.021	21	70	9
Austria	1.034	15	69	15
Hungría	1.000	18	69	13
Estonia	1.000	20	66	14
Eslovaquia	1.241	18	65	18
Gran Bretaña	1.307	28	64	8
Croacia	1.000	23	60	17
Lituania	1.003	23	58	19
España	1.036	29	56	15
Irlanda	1.008	27	56	17
Italia	1.006	32	55	13
Portugal	1.009	27	53	21
Polonia	999	33	53	14
Letonia	1.034	27	51	21
Grecia	1.000	29	50	21
Malta	500	29	48	24
Bulgaria	1.008	17	45	39
Rumania	1.005	21	42	37
Chipre	504	32	40	28
Turquía	1.005	42	30	28

Fuente: Eurobarómetro, 2005.

En octubre de 2008, un grupo de unos sesenta profesores de secundaria norteamericanos se reunieron en el Centro para la Educación de la Ciencia de la Universidad de Emory, en Atlanta. Algunas de las historias de terror que relataron merecen atención. Un profesor contó que los estudiantes «se echaban a llorar» cuando se les decía que iban a estudiar la evolución. Otro describía cómo los estudiantes gritaban repetidamente «¡No!» cuando empezó a hablar de la evolución en clase. Otro más relató que los alumnos exigían saber por qué tenían que aprender sobre la evolución, dado que «solo era una teoría». Incluso otro profesor describió cómo las «iglesias forman a los estudiantes para que en el colegio hagan preguntas específicas para sabotear mis clases». El Museo de la Creación, en Kentucky, es una institución bien financiada y dedicada por completo a la negación de la historia a gran escala. Los niños pueden subir sobre una maqueta de un dinosaurio que tiene una silla de montar, y no es solo un poco de diversión: el mensaje de que los dinosaurios vivieron recientemente y coexistieron con los humanos es explícito e inequívoco. Está gestionado por Answers in Genesis, que es una organización exenta del pago de impuestos. El contribuyente, en este caso el contribuyente estadounidense, está subvencionando la falsedad científica, la educación equivocada a gran escala.

Estas experiencias son comunes en Estados Unidos, pero también, aunque me cueste admitirlo, están empezando a serlo en Gran Bretaña. En febrero de 2006, *The Guardian* publicó que «Los estudiantes de medicina musulmanes en Londres distribuyeron panfletos en los que se afirmaba que la teoría de Darwin es falsa. Los estudiantes del Cristianismo Evangélico también empiezan a dejarse oír desafiando la noción de evolución». Los panfletos musulmanes son producidos por Al-Nasr Trust, una organización benéfica exenta del pago de impuestos [96]. Por tanto, el contribuyente británico también está subvencionando la propagación sistemática de una importante y grave mentira en las instituciones educativas británicas.

En 2006, *The Independent* publicó un comentario del profesor Steve Jones, del University College de Londres, en el que decía:

> Es un cambio social real. Durante años he simpatizado con mis colegas norteamericanos, que tienen que erradicar el creacionismo de las mentes de sus estudiantes en las primeras clases de Biología. No es un problema al que nos hayamos tenido que enfrentar en Gran Bretaña hasta ahora. Me llega información

de los estudiantes musulmanes que dicen que les obligan a creer en el creacionismo porque es parte de su identidad islámica, pero me resulta más sorprendente que otros chicos británicos vean el creacionismo como una alternativa viable a la evolución. Esto es alarmante. Muestra lo contagiosa que es esta idea.

Las encuestas sugieren, por tanto, que al menos el 40% de los estadounidenses son convencidos creacionistas, antievolución, intransigentes, no creyentes en una «evolución pero con Dios echando una mano» (también hay muchos de esos). Las cifras equivalentes para Gran Bretaña, y para gran parte de Europa, son algo menos extremas, pero no mucho más alentadoras. Todavía no hay motivo para la autocomplacencia.

NOTAS

PRÓLOGO

ofrecían una versión poco habitual*: El gen egoísta* (2006; edición conmemorativa del 30.° aniversario de su publicación, en 1976) y *The Extended Phenotype* (edición revisada, 1999).

Mis tres libros siguientes: *El relojero ciego* (1986), *El río del Edén* (1995) y *Escalando el monte improbable* (1996).

Mi libro más extenso: *El cuento del antepasado* (2004).

1. ¿SOLO UNA TEORÍA?

En 2004 escribimos un artículo conjunto en el Sunday Times: «Education: questionable foundations», *Sunday Times*, 20 de junio de 2004.

«Ocasionalmente recibo una carta de alguien»: Sagan (1996).

«Todos pudimos haber empezado a existir hace cinco minutos»: Bertrand Russell, *Religion and Science*, Oxford University Press, Oxford, 1997, pág. 70.

Un ejemplo famoso fue el llevado a cabo por el profesor Daniel J. Simons, de la Universidad de Illinois: Simons y Chabris (1999).

solo en Texas han sido exoneradas treinta y cinco personas previamente condenadas: The Innocence Project, http://www.innocenceproject.org.

(durante sus seis años como gobernador, George W. Bush firmó, de media, una condena a muerte cada quince días): 152 en total; *véase* «Bush's lethal legacy: more executions», *Independent*, 15 de agosto de 2007.

Darwin explicó en su autobiografía: Darwin (1887 1), pág. 83.

(Matt Ridley sospecha que fue por sugerencia): Matt Ridley, «The natural order of things», *Spectator*, 7 de enero de 2009.

2. PERROS, VACAS Y COLES

«Mi querido Wallace»: Marchant (1916), págs. 169-170.

Un rumor persistente aunque falso: El supuesto conocimiento de Darwin sobre la investigación de Mendel ha sido tomado de Sclater (2003).

cruzados o mestizos (de esta forma se describió a sí mismo el presidente Obama): «Puppies and economy fill winner's first day», *The Guardian*, 8 de noviembre de 2008.

Otras rutas genéticas producen razas en miniatura que conservan las proporciones del original: Fred Lanting, «Pituitary dwarfism in the German Shepherd dog», *Dog World*, diciembre de 1984, reproducido en http://www.fredlanting.org/2008/07/pituitary-dwarfism-in-the-germanshepherd-dog-part-1/.

3. EL CAMINO DE ROSAS HACIA LA MACROEVOLUCIÓN

«He examinado cuidadosamente las probóscides de un espécimen»: Wallace (1871).

«El parecido del Dorippe con un guerrero japonés enfadado»: Julian Huxley, «Evolution's copycats», *Life*, 30 de junio de 1952; también, en Huxley (1957), como «Life's improbable likenesses».

Incluso encontré una página web en la que puedes votar: Encuesta sobre el cangrejo samurái en http://www.pollsb.com/polls/view/13022/the-heike-crab-seemsto-havea-samurai-face-on-its-back-what-s-the-explanation.

como un escéptico autoritario había señalado: Martin (1993).

«Querido Darwin»: Marchant (1916), pág. 170.

los agrónomos de la Estación Experimental de Illinois comenzaron el experimento hace bastante tiempo: Dudley y Lambert (1992).

diecisiete generaciones de ratas, seleccionadas artificialmente para resistir el deterioro de los dientes: Ridley (2004), pág. 48.

«ávida de establecer contacto con los humanos»: Trut (1999), pág. 163.

La llamada «orquídea araña»: Estos son algunos sitios web sobre el tema: http://www.arhomeandgarden.org/plantoftheweek/articles/orchid_red_spider_8-29-08.htm
http://www.orchidflowerhq.com/Brassiacare.php
http://www.absoluteastronomy.com/topics/Brassia
http://en.wikipedia.org/wiki/Brassia.

puede verse en la grabación de la conferencia llamada «El Jardín Ultravioleta»: Disponible en el DVD *Growing Up in the Universe,* en richarddawkins.net.

Cada especie mezcla un cóctel característico a base de sustancias suministradas solo por flores de especies concretas: Eltz et al. (2005).

He comentado el hábito de la limpieza en otros lugares: Dawkins (2006), págs. 186-197.

4. SILENCIO Y TIEMPO LENTO

Desgraciadamente, la leyenda popular: La leyenda que dice que la tabla periódica se le apareció a Mendeleev en un sueño se discute en el artículo de G. W. Baylor «What do we really know about Mendeleev's dream of the periodic table? A note on dreams of scientific problem solving», *Dreaming*, 11: 2, 2001, págs. 89-92.

Un aspecto afortunado de la forma en que las rocas ígneas solidifican es que lo hacen de repente: Chris Stassen describe con detalle una sofisticada mejora del método, «el datado isocrónico», en el magnífico sitio web «Talk.Origins»: www.talkorigins.org/faqs/isochron-dating.html.

A continuación podemos ver una cita literal de una laureada página web creacionista: extraída de http://homepage.ntlworld.com/malcolmbowden/creat.htm.

El fragmento se dividió en tres partes: Datación de la sábana de Turín tomada de Damon et al. (1989).

Y no he mencionado otros métodos de datación: Puede encontrar una lista completa de métodos en http://www.usd.edu/esci/age/current_scientific_clocks.html#.

5. JUSTO DELANTE DE NUESTROS OJOS

En el gráfico anterior se muestran datos del Departamento de Caza de Uganda: Brooks y Buss (1962).

Ese año los investigadores recogieron cinco parejas de Podarcis sicula de Pod Kopista: Investigación sobre las lagartijas de Pod Mrcaru, en Herrel et al. (2008) y Herrel et al. (2004).

Todo esto se ha conseguido con la bacteria Escherichia coli: Investigación de Lenski sobre la *E. coli*, en Lenski y Travisano (1994). Además, las publicaciones del grupo de Lenski están recogidas en http://myxo.css.msu.edu/cgi-bin/lenski/prefman.pl?group=aad.

el célebre blog de PZ Myers: http://scienceblogs.com/pharyngula/2008/06/lenski_gives_conservapdia_a_le.php.

Los experimentos que el doctor Endler relató: Investigación sobre guppies, en Endler (1980, 1983, 1986).

Entre los que se han decidido a hacerlo, se encuentra David Reznick, de la Universidad de California en Riverside: Reznick et al. (1997).

algunos zoólogos discuten la reivindicación de que Lingula sea un «fósil viviente» que casi no ha cambiado: Por ejemplo, Christian C. Emig, «Prueba de que *Lingula (Brachiopoda)* no es un fósil viviente, y diagnósticos corregidos de la familia *Lingulidae», Carnets de Géologie*, artículo 2003/01, 2003.

6. ¿EL ESLABÓN PERDIDO? ¿QUÉ SIGNIFICA «PERDIDO»?

¿Qué significa «perdido»?: www.talkorigins.org/faqs/faq-transitional/part2c.html#arti
http://web.archive.org/web/19990203140657/gly.fsu.edu/tour/article_7.html.

«ya en un estado avanzado de evolución»: Dawkins (1986), pág. 229.

«Si la gente viene de los monos a través de las ranas y los peces, entonces ¿por qué el registro fósil no contiene un "mono-rana"»: «La teoría de la evolución de Darwin es un completo sinsentido, creado

a partir de innumerables suposiciones», *Sydney Morning Herald*, 7 de mayo de 2006.

larga lista de comentarios que siguieron a un artículo del Sunday Times de Londres: http://www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/ education/article 4448420.ece.

Podemos ver uno llamado Eomaia: Ji et al. (2002).

El atlas de la creación: Aunque parezca increíble, en la actualidad no hay menos de tres volúmenes de este infame derroche en papel satinado.

un cebo de pesca como un «tricóptero»: Puede verse con claridad en http://www.grahamowengallery.com/fishing/ more-fly-tying.html.

«Fuimos directos al museo»: Smith (1956), pág. 41.

¡El Tiktaalik! Un nombre para no olvidar: http://www90.homepage.villanova.edu/lowell.gustafson/anthropology/ tiktaalik.html.

Pezosiren, es el fósil del «manatí caminante»: Domning (2001).

una interesante noticia: Natalia Rybczynski, Mary Dawson y Richard Tedford, «A semi-aquatic Arctic mammalian carnivore from the Mioceneepoch and origin of Pinnipedia», *Nature*, 458, 2009, págs. 1021-1024. Puede ver una breve película de Natalia Rybczynski discutiendo con entusiasmo sobre el nuevo fósil en http://nature.ca/pujila/ne_vid_e.cfm.

Odontochelys semitestacea: Li et al. (2008).

El comentario de «Noticias y Opiniones» sobre el artículo de Odontochelys: Reisz y Head (2008).

Proganochelys: Joyce y Gauthier (2004).

En un libro anterior describí el ADN como el «libro genético de los muertos»: Dawkins (1998), cap. 10.

7. ¿PERSONAS PERDIDAS? YA NO LO ESTÁN

«El Pithecanthropus [El Hombre de Java] no era un hombre»: Dubois (1935), citado también en http://www.talkorigins.org/pdf/fossil-hominids.pdf.

la organización creacionista Respuestas en el Génesis la ha añadido a la lista de argumentos desacreditados: http://www.answersingenesis.org/home/area/ faq/dont_use.asp.

Hombre de Georgia: http://www.talkorigins.org/faqs/homs/d2700.html.

ya que no descendemos de los chimpancés: http://www.talkorigins.org/faqs/homs/chimp.html.

El espécimen tipo es el primer individuo de una especie nueva al que se le da un nombre: Hay una útil lista de especímenes tipo de homínidos en http://www.talkorigins.org/faqs/homs/typespec.html.

con seguridad uno de los más grandes sucesores de Darwin en el siglo XX: Puede ver los artículos de Hamilton junto con sus propias reminiscencias idiosincráticas en Hamilton (1996, 2001); en el segundo volumen se incluye mi propio tributo funerario hacia él.

la siguiente lista de nombres: http://www.mos.org/evolution/fossils/browse.php.

«la píldora del día después es la mejor amiga de un pedófilo»: «Morning-after pill blocked by politics», *Atlanta Journal-Constitution*, 24 de junio de 2004.

8. USTED MISMA LO HIZO EN NUEVE MESES

«Todas las cosas aburridas y feas»: letra reproducida con el agradecimiento al permiso de Python (Monty) Pictures. Gracias a Terry Jones y Eric Idle.

Existen algunas películas impactantes en YouTube: Por ejemplo, http://www.youtube.com/watch?v=XH-groCeKbE.

Craig Reynolds escribió un programa siguiendo estas directrices en 1986 (…) y lo llamó «Boids»: http://www.red3d.com/cwr/boids/.

ha sido descifrado por un grupo de científicos en colaboración con el brillante biólogo matemático George Oster: Odell et al. (1980).

Un antiguo experimento clásico realizado por el embriólogo y premio nobel Roger Sperry: Meyer (1998).

el árbol genealógico completo de las 558 células de una larva recién eclosionada de un gusano nematodo: árbol genealógico de *C. elegans*, en http://www.wormatlas.org/userguides.html/lineage.htm. Todo el sitio wormatlas.org es un tesoro repleto de información sobre estas criaturas. Recomiendo encarecidamente los tres discursos sobre *C. elegans* pronunciados por los premios nobel Sydney Brenner, H. Robert Horvitz

y John Sulston: Brenner (2003), Horvitz (2003), Sulston (2003), disponibles para su lectura o consulta en http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2002/index.html.

9. EL ARCA DE LOS CONTINENTES

Hay unos gusanos nematodos: http://www.bayercropscience.co.uk/pdfs/nematodesguide.pdf.

la doctora Ellen Censky, que dirigió el estudio original: Censky et al. (1998).

«Viendo esta gradación y diversidad de estructuras»: Darwin (1845), pág. 380.

«Es una criatura de aspecto espantoso»: Darwin (1845), págs. 385-386.

«Por tanto, tenemos el hecho verdaderamente maravilloso»: Darwin (1845), pág. 396.

«Lo primero que llamó mi atención»: Darwin (1845), págs. 394-395.

«las tortugas diferían de una isla a otra»: Darwin (1845), pág. 394.

«Casi todos los afloramientos rocosos e islas tienen su propia fauna de mbuna»: Owen et al. (1989).

«Con respecto a la ausencia de órdenes enteros en islas oceánicas»: Darwin (1859), pág. 393.

«El naturalista que viaja»: Darwin (1859), pág. 349.

¿Cómo sustentan estas ideas? De hecho, de una manera bastante extraña: Al menos algunos están confundidos. Otros puede que sean deshonestos. La explicación de la joven Tierra puede verse en http://www.answersingenesis.org/articles/am/ v2/n2/a-catastro phicbreakup, refutada en http://www.answersincreation.org/rebuttal/aig/ Answers/2007/ answers_v2_n2_tectonics.htm.

del autor del libro actual más importante sobre la especiación: Coyne y Orr (2004).

10. EL ÁRBOL DEL PARENTESCO

Fue con ese método, usando conejos: Sarich y Wilson (1967).

El primer estudio a gran escala siguiendo esta línea fue realizado por un grupo de genetistas en Nueva Zelanda: Penny et al. (1982).

Merece la pena descargarse el árbol de Hillis de su sitio web: www.zo.utexas.edu/faculty/antisense/DownloadfilesToL.html.

Yan Wong y yo las hemos comentado en profundidad en mi libro El cuento del antepasado: Dawkins (2004).

11. LA HISTORIA ESCRITA EN NOSOTROS

«El Sr. Sutton, que era el inteligente cuidador de los Jardines Zoológicos»: Darwin (1872), págs. 95-97.

En una comunicación de 1845 a la Royal Society: Sibson (1848).

«John el Risueño» fue principalmente quien descubrió cómo funcionan los halterios: Pringle (1948).

«Si un óptico quisiera venderme un instrumento que tuviera todos estos defectos»: Helmholtz (1881), pág. 194.

«El ojo tiene todos los posibles defectos que se pueden encontrar en un instrumento óptico»: Helmholtz (1881), pág. 201.

«A pesar de poseer una laringe bien desarrollada y una naturaleza gregaria, la jirafa solo puede emitir gemidos y balidos de baja intensidad»: Harrison (1980).

«No puedo creer»: Darwin (1887 2).

No hay que confundirlo con otro australiano: M. Denton, *Nature's Destiny*, Free Press, Nueva York, 2002.

mosaico de piezas: C. S. Pittendrigh, «Adaptación, selección natural y comportamiento», en A. Roe y G. G. Simpson, eds., *Behavior and Evolution*, Yale University Press, New Haven, 1958.

12. CARRERAS ARMAMENTISTAS Y TEODICIDAD EVOLUTIVA

«Los cinco corredores más rápidos entre las especies de mamíferos»: Lista obtenida en http://www.petsdo.com/blog/ top-twenty-20-fastest-land-animals-including-humans.

Mi colega John Krebs y yo publicamos un artículo sobre el tema en 1979: Dawkins y Krebs (1979).

«Antes de afirmar que la apariencia engañosa»: Cott (1940), págs. 158-159.

Lo mismo ocurre con las carreras armamentistas entre machos y hembras dentro de las especies, y entre los padres y su descendencia: *Véase* Dawkins (2006), caps. 8 y 9, «Battle of the generations» y «Battle of the sexes».

«Qué libro escribiría el capellán del diablo»: Darwin (1903).

«La naturaleza no es amable ni hostil»: Dawkins (1995), cap. 4.

Como cuestión interesante, hay individuos que no pueden sentir dolor: Para ver ejemplos, consulte http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/4195437.stm, http://www.msnbc.msn.com/id/6379795/.

Stephen Jay Gould reflexionaba sobre estos asuntos en un interesante ensayo sobre «La naturaleza no moral»: Reproducido en Gould (1983).

13. HAY GRANDIOSIDAD EN ESTA VISIÓN DE LA VIDA

«De esa forma, a partir de la guerra de la naturaleza»: Darwin (1859), pág. 490.

«puede no ser una deducción lógica»: Darwin (1859), pág. 243.

«Todo lo que podemos hacer»: Darwin (1859), pág. 78.

«Pero me he arrepentido»: Darwin (1887 3).

formas en las que, por citar alguno de estos artículos, el accidente congelado podría «descongelarse»: Söll y RajBhandary (2006).

Y el físico Paul Davies ha hecho una conjetura razonable: Davies y Lineweaver (2005).

pero es una cuestión interesante especular sobre cómo de diferente habría sido la vida si no hubiéramos tenido una luna en órbita: Comins (1993).

«Mi padre escribió sobre el mismo tema en 1871»: Darwin (1887 3).

En 1989 escribí un artículo llamado «La evolución de la capacidad de evolucionar»: Dawkins (1989).

No es un accidente, como los cosmólogos nos recuerdan, que veamos estrellas en nuestro cielo: *Véase*, por ejemplo, Smolin (1997).

APÉNDICE: LOS NEGADORES DE LA HISTORIA

A intervalos regulares desde 1982: Las cifras de las encuestas de Gallup se han tomado de «Evolution, creationism, intelligent design», en http://www.gallup.com/poll/21814/ Evolution-CreationismIntelligent-Design.aspx.

En 2008, el Pew Forum publicó una encuesta similar: Las cifras de las encuestas de Pew se han tomado de «Public divided on origins of life», realizada el 17 de julio de 2005: http://pewforum.org/surveys/origins/.

¿Qué pasa en Gran Bretaña? ¿Cómo lo comparamos? Las cifras de las encuestas de Ipsos MORI se han tomado de «BBC survey on the origins of life», realizada entre los días 5 y 10 de enero de 2006: http://www.ipsos-mori.com/content/ bbc-survey-on-the-origins-of-life.ashx.

un estudio más ambicioso: Las cifras de la encuesta 224 del Eurobarómetro se han tomado de «Europeans, science and technology», realizada entre enero y febrero de 2005: http://ec.europa.eu/public_opinion/ archives/ebs/ebs_224_ report_en.pdf.

el hecho deplorable de que esté situado solo por delante de Turquía en esta cuestión ha tenido mucha publicidad últimamente: Miller et al. (2006).

Algunas de las historias de terror que relataron merecen atención: «Emory workshop teaches teachers how to teach evolution», *Atlanta Journal-Constitution*, 24 de octubre de 2008.

«Los estudiantes de medicina musulmanes en Londres distribuyeron panfletos en los que se afirmaba que la teoría de Darwin es falsa»: «Academics fight rise of creationism at universities», *The Guardian*, 21 de febrero de 2006.

«Es un cambio social real»: «Creationism debate moves to Britain», *Independent*, 18 de mayo de 2006.

BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, D. y CARWARDINE, M., *Last Chance to See*, Pan, Londres, 1991. [Trad. española: *Mañana no estarán: en busca de las más variopintas especies de animales al borde de la extinción*, Anagrama, Barcelona, 1994].

ATKINS, P. W., *The Second Law*, Scientific American, Nueva York, 1984. [Trad. española: *La segunda ley*, Prensa Científica, Barcelona, 1992].

—, *The Periodic Kingdom*, Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1995.

—, *The Elements of Physical Chemistry: With Applications in Biology*, W. H. Freeman, Nueva York, 2001.

ATKINS, P. W. y JONES, L., *Chemistry: Molecules, Matter and Change*, 3.ª ed. rev., W. H. Freeman, Nueva York, 1997. [Trad. española: *Química: moléculas, materia, cambio*, Ediciones Omega, Barcelona, 1998].

AYALA, F. J., *Darwin and Intelligent Design*, Fortress, Mineápolis, 2006. [Trad. española: *Darwin y el diseño inteligente: creacionismo, cristianismo y evolución*, Alianza Editorial, Madrid, 2009].

BARASH, D. P. y BARASH, N. R., *Madame Bovary's Ovaries: A Darwinian Look at Literature*, Delacorte, Nueva York, 2005.

BARLOW, G. W., *The Cichlid Fishes: Nature's Grand Experiment in Evolution*, Basic Books, Cambridge, Massachusetts, 2002.

BERRY, R. J. y HALLAM, A., *The Collins Encyclopedia of Animal Evolution*, Collins, Londres, 1986.

BODMER, W. y MCKIE, R., *The Book of Man: The Quest to Discover Our Genetic Heritage*, Little, Brown, Londres, 1994.

BRENNER, S., «Nature's gift to science», en T. Frängsmyr (ed.), *Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2002: Nobel Prizes, Presentations, Biographies and Lectures*, The Nobel Foundation, Estocolmo, 2003, págs. 274-282.

BROOKS, A. C. y BUSS, I. O., «Trend in tusk size of the Uganda elephant», *Mammalia*, 26, 1962, págs. 10-34.

BROWNE, J., *Charles Darwin,* vol. 1: *Voyaging,* Pimlico, Londres,1996.
—, *Charles Darwin,* vol. 2: *The Power of Place,* Pimlico, Londres, 2003.
CAIN, A. J., *Animal Species and their Evolution,* Hutchinson, Londres, 1954. [Trad. española: *Las especies animales y su evolución,* Editorial Labor, Barcelona, 1970].
CAIRNS-SMITH, A. G., *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story,* Cambridge University Press, Cambridge,1985. [Trad. española: *Siete pistas sobre el origen de la vida: una historia científica en clave detectivesca,* Ediciones del Prado, Madrid, 1994].
CARROLL, S. B., *The Making of the Fittest: DNA and the Ultimate Forensic Record of Evolution,* W. W. Norton, Nueva York, 2006.
CENSKY, E. J.; HODGE, K. y DUDLEY, J., «Over-water dispersal of lizards due to hurricanes», *Nature,* 395, 1998, pág. 556.
CHARLESWORTH, B. y CHARLESWORTH, D., *Evolution: A Very Short Introduction,* Oxford University Press, Oxford, 2003.
CLACK, J. A., *Gaining Ground: The Origin and Evolution of Tetrapods,* Indiana University Press, Bloomington, 2002.
COMINS, N. F., *What If the Moon Didn't Exist? Voyages to Earths that Might Have Been,* HarperCollins, Nueva York, 1993.
CONWAY MORRIS, S., *Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe,* Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
COPPINGER, R. y COPPINGER, L., *Dogs: A Startling New Understanding of Canine Origin, Behaviour and Evolution,* Scribner, Nueva York, 2001.
COTT, H. B., *Adaptive Coloration in Animals,* Methuen, Londres, 1940.
COYNE, J. A., *Why Evolution is True,* Oxford University Press, Oxford, 2009.
COYNE, J. A. y ORR, H. A., *Speciation,* Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 2004.
CRICK, F. H. C., *Life Itself: Its Origin and Nature,* Macdonald, Londres, 1981.
CRONIN, H., *The Ant and the Peacock: Altruism and Sexual Selection from Darwin to Today,* Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
DAMON, P. E.; DONAHUE, D. J.; GORE, B. H.; HATHEWAY, A. L.; JULL, A. J. T.; LINICK, T. W.; SERCEL, P. J.; TOOLIN, L. J.; BRONK, R.; HALL, E. T.; HEDGES, R. E. M.; HOUSLEY, R.; LAW, I. A.; PERRY, C.;

BONANI, G.; TRUMBORE, S.; WOELFLI, W.; AMBERS, J. C.; BOWMAN, S. G. E.; LEESE, M. N. y TITE, M. S., «Radiocarbon dating of the Shroud of Turin», *Nature*, 337, 1989, págs. 611-615.

DARWIN, CH., *Journal of researches into the natural history and geology of the countries visited during the voyage of* H.M.S. Beagle *round the world, under the Command of Capt. Fitz Roy, R.N.*, 2.ª ed., John Murray, Londres, 1845. [Trad. española: *Diario del viaje de un naturalista alrededor del mundo*, Espasa-Calpe, Madrid, 2008].

—, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection,* 1ª ed., John Murray, Londres, 1859. [Trad. española: *El origen de las especies,* Espasa-Calpe, Madrid, 1988].

—, *The Variation of Animals and Plants under Domestication,* 2 vols., John Murray, Londres, 1868. [Trad. española: *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación*, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2008].

—, *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex,* 2 vols., John Murray, Londres, 1871. [Trad. española: *El origen del hombre y de la selección en relación al sexo,* Editorial Edaf, Madrid, 1982].

—, *The Expression of the Emotions in Man and Animals*, John Murray, Londres, 1872. [Trad. española: *La expresión de las emociones en los animales y en el hombre,* Alianza Editorial, Madrid, 1998].

—, *The Various Contrivances by which Orchids are Fertilised by Insects,* John Murray, Londres, 1882. [Trad. española: *La fecundación de las orquídeas,* Editorial Laetoli, Navarra, 2007].

—, *The Life and Letters of Charles Darwin,* 3 vols., John Murray, Londres, 1887. [Trad. española: *Autobiografía y cartas escogidas*, 2 vols., Alianza Editorial, Madrid, 1984].

—, *More Letters of Charles Darwin: A Record of his Work in a Series of Hitherto Unpublished Letters,* 2 vols., John Murray, Londres, 1903.

DARWIN, CH. y WALLACE, A. R., «On the tendency of species to form varieties; and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection», *Journal of the Proceedings of the Linnaean Society (Zoology),* 3, 1859, págs. 45-62.

DAVIES, N. B., *Cuckoos, Cowbirds and Other Cheats,* T. & A. D. Poyser, Londres, 2000.

DAVIES, P. C. W., *The Fifth Miracle: The Search for the Origin of Life*, Allen Lane, The Penguin Press, Londres, 1998. [Trad. española: *El quinto milagro: La búsqueda del origen y significado de la vida*, Crítica, Barcelona, 2000].

DAVIES, P. C. W. y LINEWEAVER, C. H., «Finding a second sample of life on earth», *Astrobiology*, 5, 2005, págs. 154-163.

DAWKINS, R., *The Blind Watchmaker*, Longman, Londres, 1986. [Trad. española: *El relojero ciego*, Editorial Labor, Barcelona, 1989].

—, «The evolution of evolvability», en C. E. Langton (ed.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989, págs. 201-220.

—, *River Out of Eden*, Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1995. [Trad. española: *El río del Edén*, Debate, Barcelona, 2000].

—, *Climbing Mount Improbable*, Viking, Londres, 1996. [Trad. española: *Escalando el monte improbable*, Tusquets, Barcelona, 1998].

—, *Unweaving the Rainbow*, Penguin, Londres, 1998. [Trad. española: *Destejiendo el arco iris: ciencia, ilusión y el deseo de asombro*, Tusquets, Barcelona, 2000].

—, *The Extended Phenotype*, ed. rev., Oxford University Press, Oxford, 1999.

—, *The Ancestor's Tale: A Pilgrimage to the Dawn of Life*, Weidenfeld & Nicholson, Londres, 2004. [Trad. española: *El cuento del antepasado. Un viaje a los albores de la evolución*, Antoni Bosch, Barcelona, 2008].

—, *The Selfish Gene*, edición conmemorativa del 30.º aniversario de su publicación (1976), Oxford University Press, Oxford, 2006. [Trad. española: *El gen egoísta*, Salvat Editores, Barcelona, 2000].

DAWKINS, R. y KREBS, J. R., «Arms races between and within species», *Proceedings of the Royal Society of London*, Series B, 205, 1979, págs. 489-511.

DE PANAFIEU, J.-B. y GRIES, P., *Evolution in Action: Natural History through Spectacular Skeletons*, Thames & Hudson, Londres, 2007. [Trad. española: *Evolución*, Art Blume, Barcelona, 2007].

DENNETT, D., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*, Allen Lane, Londres, 1995. [Trad. española: *La peligrosa idea de Darwin: evolución y significados de la vida*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 2000].

DESMOND, A. y MOORE, J., *Darwin: The Life of a Tormented Evolutionist*, Michael Joseph, Londres, 1991.

DIAMOND, J., *The Rise and Fall of the Third Chimpanzee: Evolution and Human Life*, Radius, Londres, 1991.

DOMNING, D. P., «The earliest known fully quadrupedal sirenian», *Nature*, 413, 2001, págs. 625-627.

DUBOIS, E., «On the gibbon-like appearance of *Pithecanthropus erectus*», *Proceedings of the Section of Sciences of the Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 38, 1935, págs. 578-585.

DUDLEY, J. W. y LAMBERT, R. J., «Ninety generations of selection for oil and protein in maize», *Maydica*, 37, 1992, págs. 81-87.

ELTZ, T.; ROUBIK, D. W. y LUNAU, K., «Experience-dependent choices ensure species-specific fragrance accumulation in male orchid bees», *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 59, 2005, págs. 149-156.

ENDLER, J. A., «Natural selection on color patterns in *Poecilia reticulata*», *Evolution*, 34, 1980, págs. 76-91.

—, «Natural and sexual selection on color patterns in poeciliid fishes», *Environmental Biology of Fishes*, 9, 1983, págs. 173-190.

—, *Natural Selection in the Wild*, Princeton University Press, Princeton, 1986.

FISHER, R. A., *The Genetical Theory of Natural Selection: A Complete Variorum Edition*, Oxford University Press, Oxford, 1999.

FORTEY, R., *Life: An Unauthorised Biography. A Natural History of the First Four Thousand Million Years of Life on Earth*, HarperCollins, Londres, 1997. [Trad. española: *La vida: una biografía no autorizada*, Taurus, Madrid, 1999].

—, *Trilobite: Eyewitness to Evolution*, HarperCollins, Londres, 2000. [Trad. española: *¡Trilobites!: testigos de la evolución*, Editorial Laetoli, Navarra, 2006].

FUTUYMA, D. J., *Evolutionary Biology*, 3ª ed., Sinauer, Sunderland, Massachusetts, 1998.

GILLESPIE, N. C., *Charles Darwin and the Problem of Creation*, University of Chicago Press, Chicago, 1979.

GOLDSCHMIDT, T., *Darwin's Dreampond: Drama in Lake Victoria*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.

GOULD, S. J., *Ontogeny and Phylogeny,* Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1977.

—, *Ever since Darwin: Reflections in Natural History,* Burnett Books / Andre Deutsch, Londres, 1978. [Trad. española: *Desde Darwin: reflexiones sobre historia natural,* Hermann Blume, Madrid, 1983].

—, *Hen's Teeth and Horse's Toes,* W. W. Norton, Nueva York, 1983. [Trad. española: *Dientes de gallina y dedos de caballo,* Crítica, Barcelona, 2001].

GRAFEN, A., *Evolution and its Influence,* Clarendon Press, Oxford, 1989.

GRIBBIN, J. y CHERFAS, J., *The First Chimpanzee: In Search of Human Origins,* Penguin, Londres, 2001.

HAECKEL, E., *Art Forms in Nature,* Dover, Nueva York, 1974.

HALDANE, J. B. S., *On Being the Right Size and Other Essays,* Oxford University Press, Oxford, 1985.

HALLAM, A. y WIGNALL, P. B., *Mass Extinctions and their Aftermath,* Oxford University Press, Oxford, 1997.

HAMILTON, W. D., *Narrow Roads of Gene Land*, vol. 1: *Evolution of Social Behaviour,* W. H. Freeman / Spektrum, Oxford, 1996.

—, *Narrow Roads of Gene Land,* vol. 2: *Evolution of Sex,* Oxford University Press, Oxford, 2001.

HARRISON, D. F. N., «Biomechanics of the giraffe larynx and trachea», *Acta Oto-Laryngology and Otology,* 89, 1980, págs. 258-264.

—, «Fibre size frequency in the recurrent laryngeal nerves of man and giraffe», *Acta Oto-Laryngology and Otology*, 91, 1981, págs. 383-389.

HELMHOLTZ, H. VON, *Popular Lectures on Scientific Subjects*, 2ª ed., Longman, Londres, 1881.

HERREL, A.; HUYGHE, K.; VANHOOYDONCK, B.; BACKELJAU, T.; BREUGELMANS, K.; GRBAC, I.; VAN DAMME, R. y IRSCHICK, D. J., «Rapid large-scale evolutionary divergence in morphology and performance associated with explotation of a different dietary resource», *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 105, 2008, págs. 4792-4795.

HERREL, A.; VANHOOYDONCK, B. y VAN DAMME, R., «Omnivory in lacertid lizards: adaptive evolution or constraint?», *Journal of Evolutionary Biology,* 17, 2004, págs. 974-984.

HORVITZ, H. R., «Worms, life and death», en T. Frängsmyr (ed.), *Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2002: Nobel Prizes, Presentations, Biographies and Lectures,* The Nobel Foundation, Estocolmo, 2003, págs. 320-351.

HUXLEY, J., *Evolution: The Modern Synthesis,* Allen & Unwin, Londres, 1942.

—, *New Bottles for New Wine: Essays,* Chatto & Windus, Londres, 1957.

JI, Q.; LUO, Z.-X.; YUAN, C.-X.; WIBLE, J. R.; ZHANG, J.-P. y GEORGI, J. A., «The earliest known eutherian mammal», *Nature,* 416, 2002, págs. 816-822.

JOHANSON, D. y EDGAR, B., *From Lucy to Language,* Simon & Schuster, Nueva York, 1996.

JOHANSON, D. C. y EDEY, M. A., *Lucy: The Beginnings of Humankind,* Granada, Londres, 1981.

JONES, S., *The Language of the Genes: Biology, History and the Evolutionary Future,* HarperCollins, Londres, 1993.

—, *Almost Like a Whale: The Origin of Species Updated,* Doubleday, Londres, 1999.

JOYCE, W. G. y GAUTHIER, J. A., «Palaeoecology of Triassic stem turtles sheds new light on turtle origins», *Proceedings of the Royal Society of London,* Series B, 271, 2004, págs. 1-5.

KEYNES, R., *Annie's Box: Charles Darwin, his Daughter and Human Evolution,* Fourth Estate, Londres, 2001.

KIMURA, M., *The Neutral Theory of Molecular Evolution,* Cambridge University Press, Cambridge, 1983.

KINGDON, J., *Island Africa,* Collins, Londres, 1990.

—, *Self-Made Man and his Undoing,* Simon & Schuster, Londres, 1993.

—, *Lowly Origin: Where, When, and Why our Ancestors First Stood Up,* Princeton University Press, Princeton y Oxford, 2003.

KITCHER, P., *Abusing Science: The Case Against Creationism,* Milton Keynes: Open University Press, 1983.

LEAKEY, R., *The Origin of Humankind,* Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1994. [Trad. española: *El origen de la humanidad,* Debate, Barcelona, 2000].

LEAKEY, R. y LEWIN, R., *Origins Reconsidered: In Search of What Makes Us Human,* Little, Brown, Londres, 1992. [Trad. española: *Nuestros orígenes: en busca de lo que nos hace humanos,* RBA ediciones, Barcelona, 1994].

—, *The Sixth Extinction: Biodiversity and its Survival,* Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1996. [Trad. española: *La sexta extinción: el futuro de la vida y de la humanidad*, Tusquets, Barcelona, 1997].

LENSKI, R. E. y TRAVISANO, M., «Dynamics of adaptation and diversification: a 10.000-generation experiment with bacterial populations», *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 91, 1994, págs. 6808-6814.

LI, C.; WU, X.-C.; RIEPPEL, O.; WANG, L.-T. y ZHAO, L.-J., «An ancestral turtle from the Late Triassic of southwestern China», *Nature*, 456, 2008, págs. 497-501.

LORENZ, K., *Man Meets Dog,* 2ª ed., Routledge, Londres, 2002. [Trad. española: *Cuando el hombre encontró al perro,* Tusquets, Barcelona, 1999].

MALTHUS, T. R., *An Essay on the Principle of Population*, Dover, Nueva York, 2007 (publicado por primera vez en 1798). [Trad. española: *Ensayo sobre el principio de la población,* Akal, Madrid, 1990].

MARCHANT, J., *Alfred Russel Wallace: Letters and Reminiscences*, vol. 1., Cassell, Londres, 1916.

MARTIN, J. W., «The samurai crab», *Terra,* 31, 1993, págs. 30-34.

MAYNARD SMITH, J., *The Theory of Evolution*, 3ª ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2008. [Trad. española: *La teoría de la evolución*, Hermann Blume, Madrid, 1984].

MAYR, E., *Animal Species and Evolution*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1963.

—, *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1982.

MEDAWAR, P. B., *Pluto's Republic,* Oxford University Press, Oxford, 1982.

MENDEL, G., *Experiments in Plant Hybridisation,* Cosimo Classics, Nueva York, 2008.

MEYER, R. L., «Roger Sperry and his chemoaffinity hypothesis», *Neuropsychologia*, 36, 1998, págs. 957-980.

MILLER, J. D.; SCOTT, E. C. y OKAMOTO, S., «Public acceptance of evolution», *Science*, 313, 2006, págs. 765-766.

MILLER, K. R., *Finding Darwin's God: A Scientist's Search for Common Ground between God and Evolution*, Cliff Street Books, Nueva York, 1999.

—, *Only a Theory: Evolution and the Battle for America's Soul*, Viking, Nueva York, 2008.

MONOD, J., *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology*, Collins, Londres, 1972. [Trad. española: *El azar y la necesidad*, Planeta-De Agostini, Barcelona].

MORRIS, D., *Dogs: The Ultimate Dictionary of Over 1.000 Dog Breeds*, Trafalgar Square, Londres, 2008.

MORTON, O., *Eating the Sun: How Plants Power the Planet*, Fourth Estate, Londres, 2007.

NESSE, R. M. y WILLIAMS, G. C., *The Science of Darwinian Medicine*, Orion, Londres, 1994.

ODELL, G. M.; OSTER, G.; BURNSIDE, B. y ALBERCH, P., «A mechanical model for epithelial morphogenesis», *Journal of Mathematical Biology*, 9, 1980, págs. 291-295.

OWEN, D. F., *Camouflage and Mimicry*, Oxford University Press, Oxford, 1980.

OWEN, R., «Notes on the anatomy of the Nubian giraffe (Camelopardalis)», *Transactions of the Zoological Society of London*, 2, 1841, págs. 217-248.

—, «Notes on the birth of the giraffe at the Zoological Society's gardens, and description of the foetal membranes and some of the natural and morbid appearances observed in the dissection of the young animal», *Transactions of the Zoological Society of London*, 3, 1849, págs. 21-28.

OWEN, R. B.; CROSSLEY, R.; JOHNSON, T. C.; TWEDDLE, D.; KORNFIELD, I.; DAVISON, S.; ECCLES, D. H. y ENGSTROM, D. E., «Major low levels of Lake Malawi and their implications for speciation rates in cichlid fishes», *Proceedings of the Royal Society of London*, Series B, 240, 1989, págs. 519-553.

Oxford English Dictionary, 2ª ed., Oxford University Press, Oxford, 1989.

PAGEL, M., *Encyclopedia of Evolution,* 2 vols., Oxford University Press, Oxford, 2002.

PENNY, D.; FOULDS, L. R. y HENDY, M. D., «Testing the theory of evolution by comparing phylogenetic trees constructed from five different protein sequences», *Nature,* 297, 1982, págs. 197-200.

PRINGLE, J. W. S., «The gyroscopic mechanism of the halteres of Diptera», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London,* Series B, *Biological Sciences,* 223, 1948, págs. 347-384.

PROTHERO, D. R., *Evolution: What the Fossils Say and Why It Matters,* Columbia University Press, Nueva York, 2007.

QUAMMEN, D., *The Song of the Dodo: Island Biogeography in an Age of Extinctions,* Hutchinson, Londres, 1996.

REISZ, R. R. y HEAD, J. J., «Palaeontology: turtle origins out to sea», *Nature,* 456, 2008, págs. 450-451.

REZNICK, D. N.; SHAW, F. H.; RODD, H. y SHAW, R. G., «Evaluation of the rate of evolution in natural populations of guppies *(Poecilia reticulata)», Science,* 275, 1997, págs. 1934-1937.

RIDLEY, Mark, *A Darwin Selection,* 2ª ed. rev., Fontana, Londres, 1994.

—, *Mendel's Demon: Gene Justice and the Complexity of Life,* Weidenfeld & Nicholson, Londres, 2000.

—, *Evolution,* 3ª ed., Oxford, Blackwell, 2004.

RIDLEY, Matt, *The Red Queen: Sex and the Evolution of Human Nature,* Viking, Londres, 1993.

—, *Genome: The Autobiography of a Species in 23 Chapters,* Fourth Estate, Londres, 1999. [Trad. española: *Genoma, la autobiografía de una especie en 23 capítulos,* Taurus, Madrid, 2001].

RUSE, M., *Darwinism Defended: A Guide to the Evolution Controversies,* Addison-Wesley, Reading, Massachussets, 1982.

SAGAN, C., *Cosmos,* Macdonald, Londres, 1981. [Trad. española: *Cosmos,* Planeta, Barcelona, 2004].

—, *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark,* Headline, Londres, 1996. [Trad. española: *El mundo y sus demonios: la ciencia como una luz en la oscuridad,* Planeta, Barcelona, 2005].

SARICH, V. M. y WILSON, A. C., «Immunological time scale for hominid evolution», *Science,* 158, 1967, págs. 1200-1203.

SCHOPF, J. W., *Cradle of Life: The Discovery of Earth's Earliest Fossils*, Princeton University Press, Princeton, 1999. [Trad. española: *La cuna de la vida*, Crítica, Barcelona, 2006].

SCHUENKE, M.; SCHULTE, E.; SCHUMACHER, U. y RUDE, J., *Atlas of Anatomy*, Thieme, Stuttgart, 2006.

SCLATER, A., «The extent of Charles Darwin's knowledge of Mendel», *Georgia Journal of Science*, 61, 2003, págs. 134-137.

SCOTT, E. C., *Evolution vs. Creationism: An Introduction*, Greenwood, Westport, Connecticut, 2004.

SHERMER, M., *In Darwin's Shadow: The Life and Science of Alfred Russel Wallace*, Oxford University Press, Oxford, 2002.

SHUBIN, N., *Your Inner Fish: A Journey into the 3.5 Billion-Year History of the Human Body*, Allen Lane, Londres, 2008.

SIBSON, F., «On the blow-hole of the porpoise», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 138, 1848, págs. 117-123.

SIMONS, D. J. y CHABRIS, C. F., «Gorillas in our midst: sustained inattentional blindness for dynamic events», *Perception*, 28, 1999, págs. 1059-1074.

SIMPSON, G. G., *The Major Features of Evolution*, Columbia University Press, Nueva York, 1953.

—, *Splendid Isolation: The Curious History of South American Mammals*, Yale University Press, New Haven, 1980.

SKELTON, P., *Evolution: A Biological and Palaeontological Approach*, Addison-Wesley, Wokingham, 1993.

SMITH, J. L. B., *Old Fourlegs: The Story of the Coelacanth*, Longman, Londres, 1956.

SMOLIN, L., *The Life of the Cosmos*, Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1997.

SÖLL, D. y RAJBHANDARY, U. L., «The genetic code-thawing the "frozen accident"», *Journal of Biosciences*, 31, 2006, págs. 459-463.

SOUTHWOOD, R., *The Story of Life*, Oxford University Press, Oxford, 2003.

STRINGER, C. y MCKIE, R., *African Exodus: The Origins of Modern Humanity*, Jonathan Cape, Londres, 1996.

SULSTON, J. E., *«C. elegans*: the cell lineage and beyond», en T. Frängsmyr (ed.), *Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2002: Nobel Prizes, Presentations, Biographies and Lectures,* The Nobel Foundation, Estocolmo, 2003, págs. 363-381.

SYKES, B., *The Seven Daughters of Eve: The Science that Reveals our Genetic Ancestry,* Bantam, Londres, 2001.

THOMPSON, D. A. W., *On Growth and Form,* Cambridge University Press, Cambridge, 1942.

THOMSON, K. S., *Living Fossil: The Story of the Coelacanth,* Hutchinson Radius, Londres, 1991.

THOMPSON, S. P. y GARDNER, M., *Calculus Made Easy: Being a Very-Simplest Introduction to Those Beautiful Methods of Reckoning Which Are Generally Called by the Terrifying Names of the Differential Calculus and the Integral Calculus,* Palgrave Macmillan, Basingstoke, 1998.

TRIVERS, R., *Natural Selection and Social Theory,* Oxford University Press, Oxford, 2002.

TRUT, L. N., «Early canid domestication: the farm-fox experiment», *American Scientist,* 87, 1999, págs. 160-169.

TUDGE, C., *The Variety of Life: A Survey and a Celebration of All the Creatures that Have Ever Lived,* Oxford University Press, Oxford, 2000.

WALLACE, A. R., *Contributions to the Theory of Natural Selection: A Series of Essays,* Macmillan, Londres, 1871.

WEINER, J., *The Beak of the Finch: A Story of Evolution in our Time,* Jonathan Cape, Londres, 1994.

WICKLER, W., *Mimicry in Plants and Animals,* Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1968. [Trad. española: *El mimetismo en las plantas y en los animales,* Ediciones Guadarrama, 1968].

WILLIAMS, G. C., *Adaptation and Natural Selection: A Critique of Some Current Evolutionary Thought,* Princeton University Press, Princeton, 1966.

—, *Natural Selection: Domains, Levels, and Challenges,* Oxford University Press, Oxford, 1992.

—, *Plan and Purpose in Nature,* Weidenfeld & Nicholson, Londres, 1996.

WILLIAMS, R., *Unintelligent Design: Why God Isn't as Smart as She Thinks She Is*, Allen & Unwin, Sydney, 2006.

WILSON, E. O., *Biophilia*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1984.

—, *The Diversity of Life*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1992. [Trad. española: *La diversidad de la vida*, Crítica, Barcelona, 2001].

WOLPERT, L., *The Triumph of the Embryo*, Oxford University Press, Oxford, 1991.

WOLPERT, L.; BEDDINGTON, R.; BROCKES, J.; JESSELL, T.; LAWRENCE, P. y MEYEROWITZ, E., *Principles of Development*, Current Biology / Oxford University Press, Londres y Oxford, 1998.

YOUNG, M. y EDIS, T., *Why Intelligent Design Fails: A Scientific Critique of the New Creationism*, Rutgers University Press, New Brunswick, Nueva Jersey, 2004.

ZIMMER, C., *At the Water's Edge: Macroevolution and the Transformation of Life*, Free Press, Nueva York, 1998.

—, *Evolution: The Triumph of an Idea*, Heinemann, Londres, 2002.

ILUSTRACIONES Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a las siguientes personas su valioso consejo y su orientación sobre la precisión y oportunidad de las ilustraciones del texto y de las secciones en color: Larry Benjamin, Catherine Bosivert, Philippa Brewer, Ralf Britz, Sandra Chapman, Jennifer Clack, Margaret Clegg, Daryl P. Domning, Anthony Herrel, Zerina Johanson, Barrie Juniper, Paul Kenrick, Zhe-Xi Luo, Colin McCarthy, David Martill, P. Z. Myers, Colin Palmer, Roberto Portela-Miguez, Mai Qaraman, Lorna Steel, Chris Stringer, John Sulston y Peter Wellnhofer.

SECCIONES EN COLOR

pág. 1: *El paraíso temprano*, de Jan Brueghel el Viejo, 1607-1608, Louvre, París: Lauros/Giraudon/The Bridgeman Art Library.

págs. 2-3: (a) Col silvestre *(Brassica oleracea)*, acantilados, Dorset: © Martin Fowler/Alamy; (b) espiral vegetal: Tom Poland; (c) Bernard Lavery, ganador de 14 récords mundiales, con una de las coliflores gigantes en Spalding, Lincs., 1993: Chris Steele-Perkins/Magnum Photos; (d) girasoles, Great Sand Dunes National Monument, Colorado: © Chris Howes/Wild Places Photography/Alamy; (e) campo de girasoles, Hokkaido: Mitsushi Okada/Getty Images; (f) Astucieux du Moulin de Rance, toro británico de raza *Belgian Blue*, presentado por B. E. Newton: Yann Arthus-Bertrand/CORBIS; (g) Kathy Knott, ganadora del campeonato británico de culturismo de 1996: © Barry Lewis/Corbis; (h) chihuahua y gran danés: © moodboard/alamy.

págs. 4-5: (fondo) pradera en verano, Norfolk: © G&M Garden Images/Alamy; (a) orquídea cometa *(Angraecum sesquipedale),* Perinet National Park, Madagascar: Pete Oxford/Nature Picture Library, y *Xanthopan morgani praedicta:* © The Natural History Museum/Alamy; (b) orquídea cubo *(Coryanthes speciosa):* © Custom Life Science Images/Alamy; (c) abeja saliendo de una orquídea cubo: photolibrary/Oxford Scientific Films; (d) Esfinge colibrí *(Macroglossum stellatarum),* Suiza: Rolf Nussbaumer/Nature Picture Library; (e) Colibrí esmeralda de los Andes *(Amazillia franciae),* Mindo, Ecuador: Rolf Nussbaumer/Nature Picture Library; (f) Suimanga sudafricano, Ciudad del Cabo, Sudáfrica: © Nic Bothma/epa/Corbis; (g) orquídea martillo y avispa, Australia Occidental: Babs and Bert Wells/Oxford Scientific Films/photolibrary; (h) Orquídea *Ophrys holosericea* atrayendo a un macho de abejorro: blickwinkel/Alamy; (i, j) onagra común *(Oenothera biennis)* bajo luz normal y ultravioleta: ambas Bjorn Rorslett/Science Photo Library; (k) orquídea araña *(Brassia rex),* Papua Nueva Guinea: © Doug Steeley /Alamy.

págs. 6-7: (a) Pareja de faisanes *(Phasianus colchius):* Richard Packwood/Oxford Scientific Films/photolibrary; (b) guppies: Maximillian Winzieri/Alamy; (c) mantis orquídea de Malasia *(Hymenopus coronatus),* Malaysia: Thomas Minden/Minden Pictures/National Geographic Stock; (d) ninfa de mantis hoja, selva tropical del Amazonas, Ecuador: © Michael & Patricia Fogen/Corbis; (e) salamanquesa de cola de hoja: © Jim Zuckerman/Corbis; (f) oruga con apariencia de serpiente, selva tropical, Costa Rica.

pág. 8: Experimento con gorila: Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). «Gorillas in our midst: Sustained inattentional blindness for dynamic events», *Perception*, 28, págs. 1059-1074; corbata de coco-patos: cortesía de Josh Timonen; Tricóptero: cortesía de Graham Owen.

pág. 9: *Darwinius masillae:* © Atlantic Productions Ltd/photo Sam Peach.

págs. 10-11: (a) Escena del Devónico, por Karen Carr: © Field Museum; (b) fósil de *Tiktaalik:* © Ted Daeschler/Academia de Ciencias Naturales/VIREO; (c) modelo de *Tiktaalik* y foto: copyright Tyler Keillor;

(d) manatí con sus crías, ZooParc, Saint-Aignan, 2003: AFP/ Getty Images; (e) dugongo en el Acuario de Sydney, 2008: AFP/Getty Images; (f) *Odontochelys:* Marlene Donnelly/cortesía de The Field Museum.

págs. 12-13: (a, b) la enzima hexoquinase se cierra alrededor de una molécula de glucosa: cortesía de Thomas A. Steitz; (c) recreación de una célula animal (corte transversal): Russell Knightley/Science Photo Library.

págs. 14-15: (a) Óvulo humano fertilizado y (b) embrión humano de dos células a las 30 horas: ambos Edelmann/Science Photo Library; (c) embrión humano de ocho células a los tres días y (d) embrión humano de dieciséis células a los 4 días: ambos Dr Yorgos Nikas/Science Photo Library; (e) embrión a los 10 días dentro del útero, recién implantado en el revestimiento uterino; (f) a los 22 días, el embrión tiene una espina dorsal curva y el tubo neural está abierto por los dos lados; (g) a los 24 días el embrión está firmemente implantado en la pared del útero, el corazón se extiende casi hasta la cabeza y la placenta lo conecta con el útero, y (h) a los 25 días: todas las fotos de Lennart Nilsson © Lennart Nilsson; embrión (i) a las 5 o 6 semanas, y (j) a las 7 semanas: ambas de Edelmann/Science Photo Library; (k) feto de 17 semanas; (l) a las 22 semanas: ambas de Oxford Scientific Films Photo Library; (m) bebé recién nacido: Getty Images/Steve Satushek.

pág. 16: Secuencia del estornino: dylan.winter@virgin.net.

pág. 17: Falla de San Andrés en Carrizzo Plain, California Central: © Kevin Schafer/Alamy.

págs. 18-19: (a) Diagrama que muestra la edad de la litosfera oceánica, fuente: R. D. Muller, M. Sdrolias, C. Gaina y W. R. Roest, «Tasas de expansión y simetría de expansión de la corteza oceánica del mundo». Geochem. Geophys. Geosyst. 9.Q04006. doi:10.1029/2007/GC001743. Imagen creada por Elliot Lim, CIRES & NOAA/NGDC, Marine Geology and Geophysics Division. Datos e imágenes disponibles en http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/; (b) ilustración que representa el proceso

de expansión del fondo marino: Gary Hincks/Science Photo Library; (c) ilustración que muestra las corrientes de convección: © Tom Coulson/Dorling Kindersley.

págs. 20-21: (a) Caldera de un volcán, Isla Fernandina, Galápagos: Patrick Morris/Nature Picture Library; (b) Islas Galápagos desde el espacio: Jacques Descloitres, MODIS Land Rapid Response Team, NASA/GSFC; (c), (d), (f), (g) pelícano buceando, Seymour Island; iguana marina nadando, Isla Fernandina; tortuga de las Galápagos, Santa Cruz; y pelícano, pingüino y cangrejos Sally Lightfoot, Isla Santiago: todas © Josie Cameron Ashcroft; (e) tortuga con caparazón con forma de silla de montar de La Española *(Geochelone elephantopus hoodensis)*, Isla Santa Cruz, Galápagos: Mark Jones/Oxford Scientific Photo Library.

págs. 22-23: (a) canguro Eastern Grey *(Macropus giganteus)*, Parque Nacional Murramarang, Nueva Gales del Sur: Jean Paul Ferrero/Ardea; (b) bosque abierto de eucaliptus, cerca de Norseman, Australia Occidental: Brian Rogers/Natural Visions; (c) koala: cortesía de Wendy Blanshard/Lone Pine Koala Sanctuary; (d) ornitorrinco de pico de pato *(Ornithorhynchus anatinus)* buceando; (e) lémur de cola anillada *(Lemur catta)*, Berenty Reserve, Madagascar Sur: Hermann Brehm/Nature Picture Library; (f) baobab *(Adansonia grandidieri)*, Madagascar Occidental: Nick Garbutt/Nature Picture Library; (g) lémur sifaka de Verreaux *(Propithecus verreauxi)*, Reserva Berenty, Madagascar Sur: (izquierda) Kevin Schafer/Alamy; (central) © Kevin Schafer/Corbis; (derecha) Heather Angel/Natural Visions.

pág. 24: Alcatraz patiazul *(Sula nebouxii):* (imagen principal) © Michael DeFreitas South America/ Alamy; (de arriba abajo) © Westend 61/Alamy; © Fred Lord/Alamy; F1Online/photolibrary; (dos de abajo) Nick Garbutt/Photoshot.

pág. 25: Clare D'Alberto: © David Paul/dpimages 2009.

págs. 26-27: (a) mono araña, Belice, América Central: Cubolimages srl/Alamy; (b) lémur volador macho, Borneo: Tim Laman/National Geographic Stock; (c) murciélago egipcio de la fruta: © Tim Flach.

págs. 28-29: (a) Avestruz *(Struthhio camelus)* corriendo: © Juniors Bildarchiv/Alamy; (b) cormorán de las Galápagos *(Nannopterum harrisi)*, Punta Espinosa, Fernandina, Galápagos: © Peter Nicholson/Alamy; (c) cormorán de las Galápagos *(Nannopterum harrisi)* buceando, Fernandina, Galápagos: Pete Oxford/Nature Picture Library; (d) kakapo *(Strigops harboptilus)*, Nueva Zelanda; (e) hormiga desprendiéndose de sus alas antes de poner huevos, ilustración de John Dawson: National Geographic/Getty Images; (f) salamandra de cueva *(Proteus anguinus):* Francesco Tomasinelli/Natural Visions; (g) delfín común de pico corto *(Delphinus delphis)*, Golfo de California, México.

págs. 30-31: (a) Cuco europeo expulsando del nido un huevo del alcaudón anfitrión *(Lanius senator)*, España: © Nature Picture Library/Alamy; (b) leona *(Panthera leo)*, cazando a un joven kudú, Parque Nacional Etosha, Namibia: © Martin Harvey/Alamy; (c) gran oruga blanca *(Pieris brassicae)* con larva parásita de avispa *(Cotesia glomerata)* transformándose en pupa: © WILDLIFE GmbH/Alamy; (d) dosel de árboles, Kapur, Selangor, Malasia: © Hans Strand

pág. 32: (a) Estuario del Amazonas, vista aérea: © Stock Connection Distribution/Alamy; (b) ajo de oso *(Allium ursinum)*, Cornwall: © Tom Joslyn/Alamy; (c) colinas y pastos, Morgan Territory, California: © Brad Perks Lightscapes/Alamy; (d) musgo *(Hookeria luscens)*, células de la hoja, micrografía con luz polarizada que muestra dos células completas que contienen cloroplastos: Dr. Keith Wheeler/Science Photo Library.

ILUSTRACIONES EN EL TEXTO

Las imágenes en el texto de las siguientes páginas fueron realizadas por HL Studios:

Imagen 12
Imagen 23
Imagen 24
Imagen 25
Imagen 26

Imagen 27
Imagen 28
Imagen 29
Imagen 31
Imagen 32
Imagen 33
Imagen 34
Imagen 35
Imagen 36
Imagen 37
Imagen 38
Imagen 39
Imagen 40
Imagen 41
Imagen 42
Imagen 46
Imagen 47
Imagen 48
Imagen 49
Imagen 50
Imagen 51
Imagen 52
Imagen 57
Imagen 58
Imagen 59
Imagen 61
Imagen 62
Imagen 63
Imagen 64
Imagen 66
Imagen 67
Imagen 68
Imagen 75
Imagen 76
Imagen 77
Imagen 82
Imagen 83

Imagen 86

CRÉDITOS INDIVIDUALES:

Imagen 1: «Yo sigo afirmando que no es más que una teoría», dibujos de David Sipress para *The New Yorker*, 23 de mayo de 2005: © The New Yorker Collection 2005 David Sipress en cartoonbank.com. Todos los derechos reservados.

Imagen 2: Imagen generada por ordenador, cortesía del autor.

Imagen 3: Imagen generada por ordenador, cortesía del autor.

Imágenes 4-5-6: Gallina de Hamburgo, gallina española y gallina polaca, del libro de Charles Darwin *La variación de los animales y plantas bajo domesticación*, 1868.

Imágenes 7-8: Máscara kabuki de un guerrero samurái, detalle de una talla en madera del siglo XIX hecha por Utagawa Toyokuni III, cortesía de Los Angeles Natural History Museum; *Heikea japonica*, un macho recogido en Ariake Bay, en la costa de Kyushyu, Japón, 1968, ancho 20,4 mm, foto de Dick Meier, cortesía de Los Angeles Natural History Museum.

Imagen 9: Dos variedades de maíz seleccionadas para alto y bajo contenido en aceite, de J. W. Dudley y R. G. Lambert, «Ninety generations of selection for oil and protein in maize», *Maydica*, 37, 1992, págs. 81-87.

Imagen 10: Dos líneas de ratas, de H. R. Hunt, C. A. Hoppert y S. Rosen, «Genetic factors in experimental rat caries», en R. F. Sognnaes (ed.), *Advances in Experimental Caries Research*, American Association for the Advancement of Science, Washington D. C., 1955, págs. 66-81.

Imagen 11: Dmitri Belyaev con sus zorros de laboratorio, Novosibirsk, Rusia, marzo de 1984, foto RIA Novosti; inserción en la foto de D. K. Belyaev, «Destabilizing selection as a factor in domestication», *Journal of*

Heredity, 70, 1979, págs. 301-308.

Imagen 14: Gráfico de A. C. Brooks y I. O. Buss, «Trend in tusk size of the Uganda elephant», *Mammalia*, 26: 1, 1962, págs. 10-34.

Imagen 15: Diagrama de A. Herrel, B. Vanhooydonck y R. van Damme, «Omnivory in lacertid lizards: adaptive evolution or restraint», *Journal of Evolutionary Biology*, 17, 2004, págs. 974-984.

Imagen 16: Fotografía de la válvula ileocecal, de A. Herrel, B. Vanhooydonck y R. van Damme, «Omnivory in lacertid lizards: adaptive evolution or restraint», *Journal of Evolutionary Biology*, 17, 2004, págs. 974-984; foto cortesía de Anthony Herrel.

Imágenes 17-18, **19-20**: Experimento de Lenski, diagramas de R. E. Lenski y M. Travisano, «Dynamics of adaptation and diversification: a 10,000-generation experiment with bacterial populations», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91, 1994, págs. 6808-6814.

Imágenes 21-22: *Lingula:* «Espécimen reciente de un braquiópodo *Lingula* con un largo pedículo emergiendo de las valvas de 5 cm de la concha fosfática» © Museo de Historia Natural, Londres; *Lingulella*, grabado © Museo de Historia Natural, Universidad de Oslo.

Imagen 25: *Eomaia scansoria*, Academia China de Ciencias Geológicas (CAGS), copiado de Qiang Ji, Zhe-Xi Luo, Chong-Xi Yuan, John R. Wible, Jian-Ping Zhang y Justin A. Georgi, «The earliest known eutherian mammal», *Nature*, 416, 25 de abril de 2002, págs. 816-822.

Imagen 26: *Eusthenopteron*, tomado de S. M. Andrews y T. S. Westoll, «The postcranial skeleton of Eusthenopteron foordi Whiteaves», *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 68, 1970, págs. 207-329.

Imágenes 27-28: *Ichthyostega*, tomado de Per Erik Ahlberg, Jennifer Clack y Henning Blom, «The axial skeleton of the Devonian tetrapod Ichthyostega», *Nature*, 437, 1 de septiembre de 2005, págs. 137-140, fig.

1; *Acanthostega*, de J. A. Clack, «The emergence of early tetrapods», Palaeogeography, Palaeoclimatoogy, *Palaeoecology*, 232, 2006, págs. 167-189.

Imagen 29: *Panderichthys*, reconstrucción de Jennifer A. Clack.

Imagen 30: Diagrama de D. R. Prothero, *Evolution: What the Fossils Say and Why it Matters*, copyright © 2007 Columbia University Press. Reimpreso con permiso del editor.

Imagen 32: (abajo) Esqueleto compuesto reconstruido de *Pezosiren portelli*. Vista lateral, longitud aproximada 2,1 m. Los elementos sombreados están representados por fósiles; los elementos no sombreados, no. La longitud de la cola y la forma y la postura de los pies son en parte hipotéticos. Tomado de D. P. Domning, «The earliest known fully quadrupedal sirenian», *Nature*, 413, 11 de octubre de 2001, págs. 626-627, fig. 1.

Imagen 34: Diagrama modificado de W. G. Joyce y J. A. Gauthier, «Palaeoecology of Triassic stem turtles sheds new light on turtle origins», *Proceedings of the Royal Society of London*, 271, 2004, págs. 1-5.

Imagen 43: *Sahelanthropus tchadensis*, reconstrucción, por © Bone Clones.

Imagen 44: Cráneo de un feto de chimpancé, reconstrucción, por © Bone Clones.

Imagen 45: Chimpancé bebé y adulto, cortesía de Stephen Carr, de Adolf Naef, «Über die Urformen der Anthropomorphen und die Stammesgeschichte des Menschenschädels», *Die Naturwissenschaften*, 14: 21, 1926, págs. 472-477. Fotos originales de Herbert Lang tomadas durante la expedición al Congo del Museo de Historia Natural Americana, 1909-1915.

Imagen 46: Tres tipos de virus, tomado de Neil A. Campbell, Jane B. Reece y Lawrence G. Mitchell, *Biology*, 5ª ed., fig. 18.2, pág. 321. Copyright © 1999 de Benjamin/Cummings, impreso por Addison Wesley Longman, Inc., reimpreso con permiso de Pearson Education, Inc.

Imagen 48: Diagrama de neurulación, cortesía de PZ Myers.

Imagen 53: Árbol genealógico celular del *Caenorhabditis elegans*, http://www.wormatlas.org.

Imagen 54: Mapa del archipiélago de las Galápagos, tomado de Charles Darwin, *Journal of Researches*, 1.ª edición ilustrada, 1890 © Museo de Historia Natural de Londres.

Imagen 55: Bosques en Santa Elena, cortesía de Jonathan Kingdon.

Imagen 56: «Sudamérica se separa», dibujo de John Holden, en Robert S. Diets, «More about continental drift», *Sea Frontiers, magazine of the International Oceanographic Foundation*, marzo-abril de 1967.

Imagen 57: Esqueleto de un pterodáctilo, tomado de P. Wellnhofer, *Pterosaurs*, Salamander Books, Londres, 1991.

Imagen 60: Caballo polidáctilo, tomado de O. C. Marsh, «Recent polydactyle horses», *American Journal of Science*, abril de 1892.

Imagen 63: Esqueleto de okapi, tomado de un dibujo de Jonathan Kingdon.

Imagen 65: Cráneo de tilacino, S. R. Sleightholme y N. P. Ayliffe, *International Thylacine Specimen Database*, Sociedad Zoológica de Londres, 2005.

Imagen 67: Rotífero bdeloideo, dibujo tomado de Marcus Hartog, «*Rotifera, gastrotricha,* and *kinorhyncha*», *The Cambridge Natural History*, vol. 2, 1896.

Imagen 69: «Varias especies de cangrejos y cangrejos de río», tomado de Ernst Haeckel, *Kunstformen der Natur,* 1899, pág. 1.904.

Imágenes 70-71: Diagramas de D'Arcy Wentworth Thompson, de *On Growth and Form,* 1917.

Imagen 73: «Ley de Hodgkin», cortesía de Jonathan Hodgkin.

Imagen 74: Árbol filogenético, por David Hillis, Derrick Zwickl y Robin Gutell, Universidad de Texas en Austin: http://www.zo.utexas.edu/faculty/antisense/DownloadfilesToL.html.

Imagen 77: *Anhanguera,* tomado de John Sibbick.

Imagen 84: Diagrama de R. J. Berry y A. Hallam, *The Collins Encyclopedia of Animal Evolution,* 1986.

Imagen 85: Disección de una jirafa, foto de Joy S. Reidenberg.

Se ha hecho el máximo esfuerzo por localizar a los propietarios de todas las licencias. Los editores estarían encantados de tener noticias de cualquiera que pueda haber quedado fuera de esta relación, para incluir los agradecimientos adecuados en ediciones posteriores.

Volver

1
«Y los bendijo Dios, y les dijo:
Fructificad y multiplicaos;
llenad la Tierra, y sojuzgadla, y
señoread en los peces del mar,
en las aves de los cielos, y en
todas las bestias que se mueven
sobre la Tierra».
Los sondeos de opinión muestran
que hay muchos creacionistas
que creen que todos los seres
vivos comenzaron su existencia
en tan solo una semana,
hace seis mil años.

Volver

2
a
b
c
Lo que la selección artificial puede hacer en muy poco tiempo. La col salvaje (a) y sus útiles (b) y monstruosos (c) descendientes. Los girasoles (d) fueron seleccionados artificialmente hace mucho tiempo por los nativos americanos y (e) han sido mejorados por los horticultores modernos.
d
e
La variedad de vacas *Belgian Blue* (f) es resultado de una mutación artificial. La mujer culturista (g) está nutrida y ejercitada de forma artificial. El cambio inducido por el medio ambiente puede imitar de forma muy parecida al cambio genético.
f
g

Volver

3
(h) El chihuahua y el gran danés: ambos son lobos bajo su piel, pero ¿quién podría adivinarlo a partir de su aspecto, después de varios siglos de selección artificial?
h

Volver

4

(a) El largo nectario de esta orquídea de Madagascar indujo a predecir a Darwin y Wallace el posible descubrimiento de una larga lengua que encajara en el mismo. Años más tarde, fue descubierta: *Xanthopan morgani praedicta,* la polilla halcón de Darwin. **(b)** Orquídea *Coryanthes:* uno de los más elaborados exponentes de la polinización «bala mágica». **(c)** Abeja *Euglossine* luchando para salir de la orquídea *Coryanthes* y recogiendo polen mientras lo hace. **(d)** ¿Una polilla que cree ser un colibrí? Esfinge colibrí, un magnífico ejemplo de evolución convergente. **(e)** Colibrí en vuelo exquisito. Las flores rojas brillantes suelen ser polinizadas por pájaros porque, a diferencia de los insectos, sí ven correctamente el extremo rojo del espectro. **(f)** Suimanga libando néctar de una flor roja en África. **(g)** Cabalgada de una avispa sobre una orquídea martillo. **(h)** ¿Trampa de miel? Esta orquídea es una impostora que utiliza su parecido con una abeja hembra para atraer al macho hacia un intento de cópula. **(i)** Onagra tal como la vemos nosotros. **(j)** ¿Onagra tal como la ve el insecto? No exactamente, pero muestra con colores falsos los patrones que un insecto, con su visión ultravioleta, podría ver. **(k)** Orquídea araña. ¿Es su parecido con una araña obra de la selección natural?

Volver

Volver

Los colores brillantes del faisán dorado **(a)** han sido seleccionados por generaciones de hembras. **(b)** ¿Faisanes dorados subacuáticos? Los guppies macho que viven en aguas sin depredadores son libres de desarrollar colores brillantes que atraen a los depredadores. Al igual que con las rosas y los tulipanes, los criadores humanos han tomado la idea y después la han desarrollado. El aspecto de estos guppies es tan atractivo para los acuariófilos como para las hembras. **(c)** El peligro acecha en la belleza. La mantis religiosa dorada espera a los insectos atraídos por la flor a la que imita. **(d)** Otras mantis parecen hojas; esta es la ninfa (un estadio juvenil) de una de ellas. Algunos animales, como esta salamanquesa **(e)** de Sudamérica, imitan a hojas muertas. **(f)** Este no es el extremo frontal de una serpiente, sino el trasero de una oruga. Sus ancestros sobrevivieron porque un gran número de posibles depredadores se asustaba de este parecido.

Volver

Volver

8

(**a**) Un gorila entre nosotros. Contundente demostración de la poca credibilidad de los testimonios visuales (*véase* texto en pág. 26).

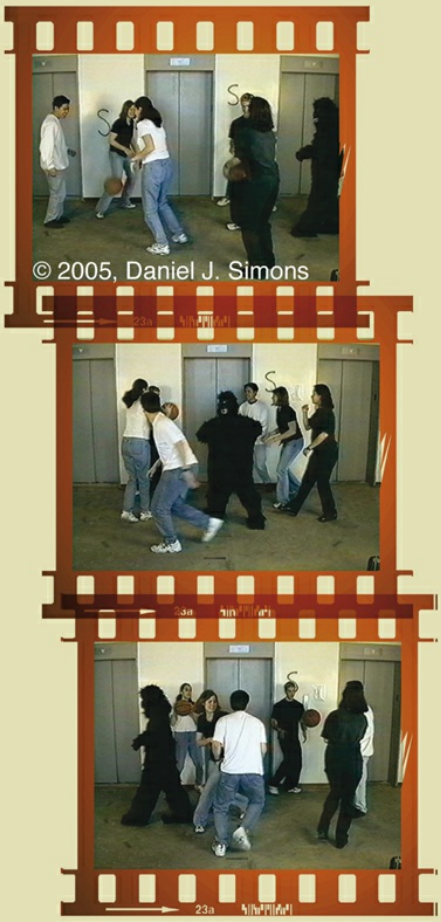
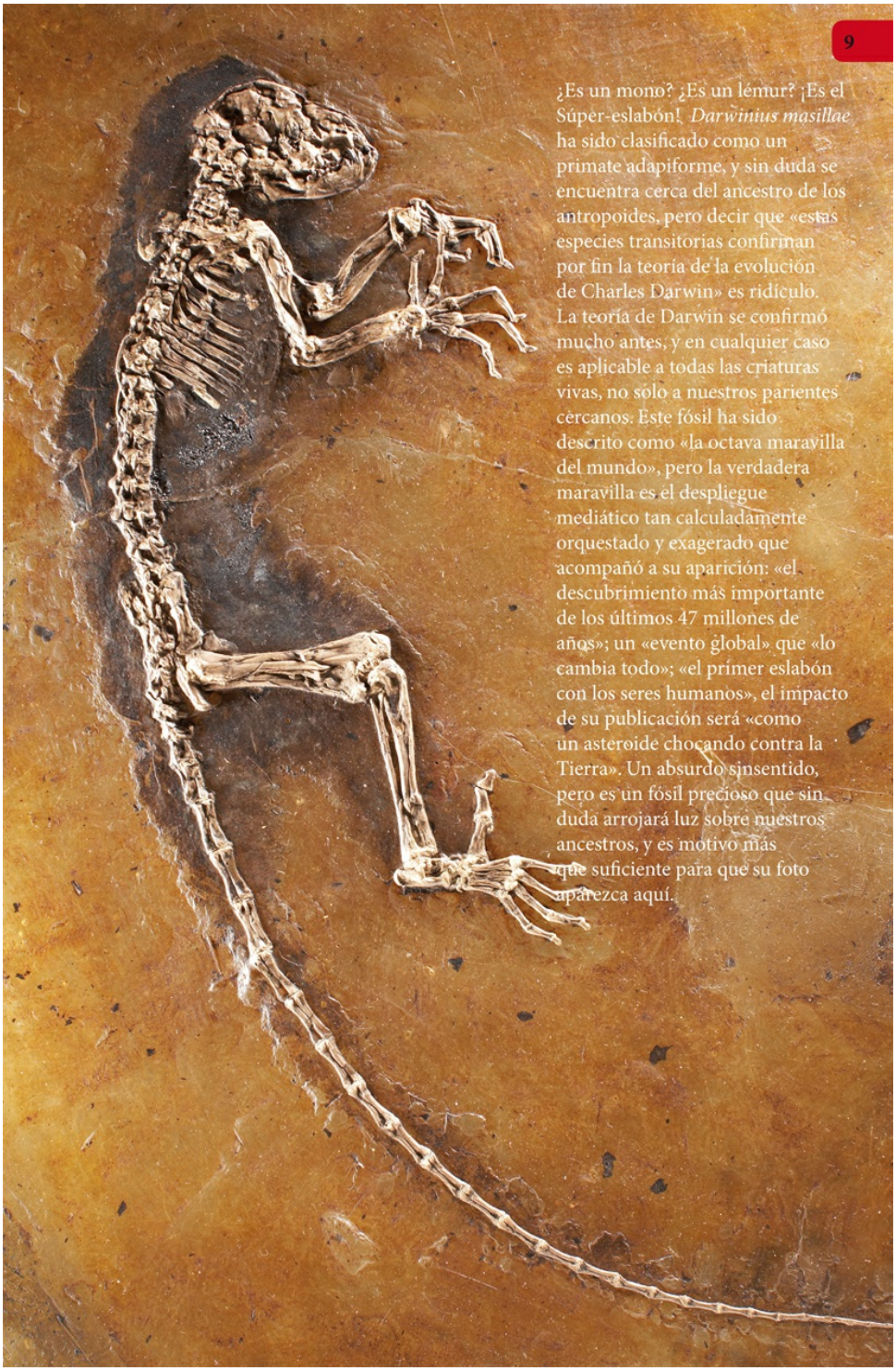


Imagen aportada por Daniel Simons. El vídeo representado está disponible como parte de un DVD de Viscog Productions (http://www.viscog.com).

(**b**) Si la evolución es cierta, ¿por qué no está el mundo repleto de coco-patos y mono-ranas, de perro-pótamos y elef-pancés? Para celebrar este demoledor argumento (*véase* texto en pág. 144), Josh Timonen me hizo amablemente una corbata de coco-patos, para que la luciera en honor a los creacionistas del mundo.

(**c**) Cebo para que pique un creacionista entusiasta (*véase* texto en pág. 145).

Volver

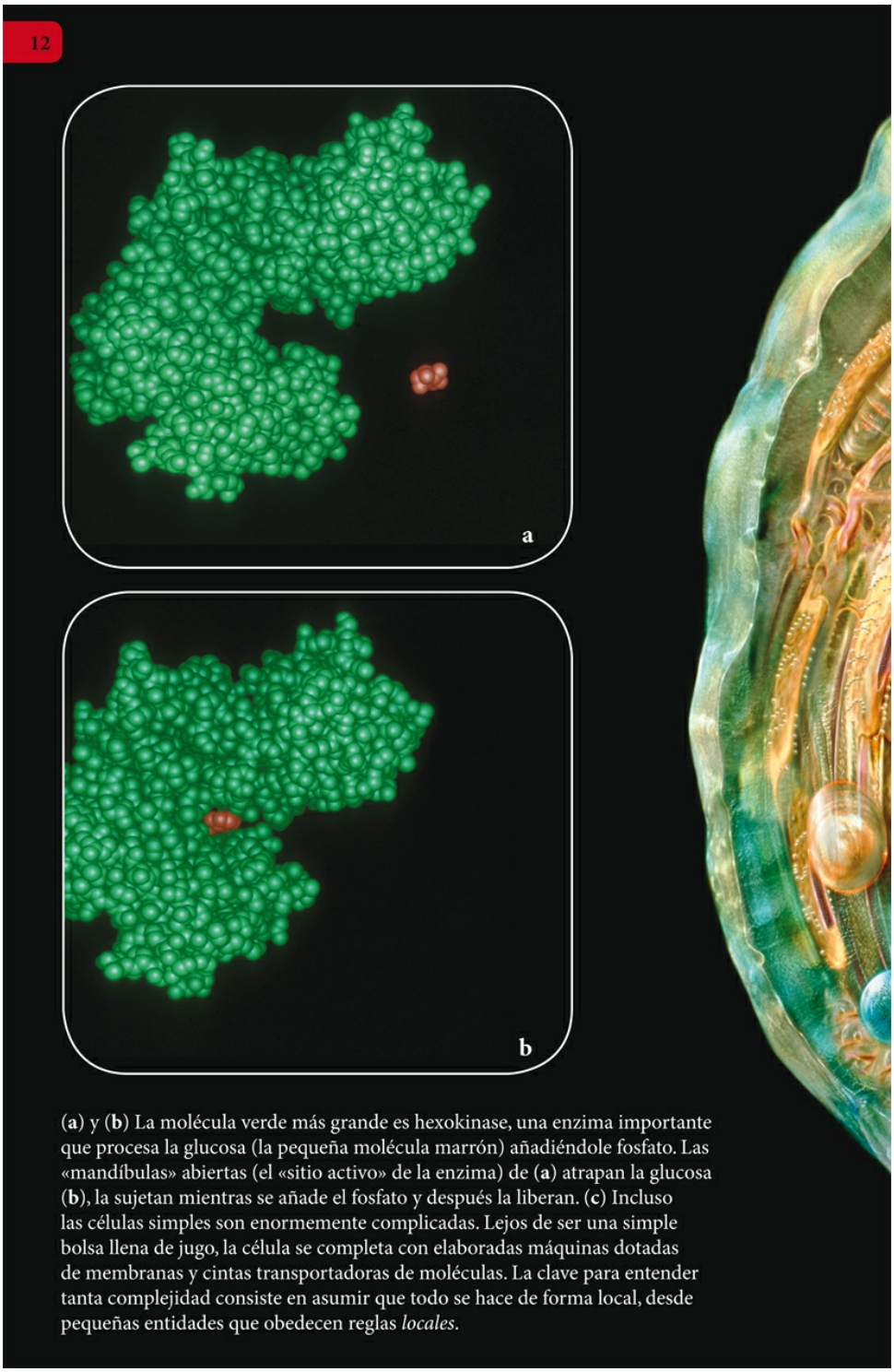

9
¿Es un mono? ¿Es un lémur? ¡Es el Súper-eslabón! *Darwinius masillae* ha sido clasificado como un primate adapiforme, y sin duda se encuentra cerca del ancestro de los antropoides, pero decir que «estas especies transitorias confirman por fin la teoría de la evolución de Charles Darwin» es ridículo. La teoría de Darwin se confirmó mucho antes, y en cualquier caso es aplicable a todas las criaturas vivas, no sólo a nuestros parientes cercanos. Este fósil ha sido descrito como «la octava maravilla del mundo», pero la verdadera maravilla es el despliegue mediático tan calculadamente orquestado y exagerado que acompañó a su aparición: «el descubrimiento más importante de los últimos 47 millones de años»; un «evento global» que «lo cambia todo»; «el primer eslabón con los seres humanos», el impacto de su publicación será «como un asteroide chocando contra la Tierra». Un absurdo sinsentido, pero es un fósil precioso que sin duda arrojará luz sobre nuestros ancestros, y es motivo más que suficiente para que su foto aparezca aquí.

Volver

(**a**) La era del Devónico, cuando la tierra esperaba, llena de promesas, el éxodo de los peces desde el agua. Protagonizando esta enorme transición encontramos al gran descubrimiento de Canadá, el *Tiktaalik* (**b**) y (**c**) —como todos los eslabones «perdidos», que esperan ser descubiertos—. Pero no todos los animales que descubrieron la tierra se quedaron en ella: los manatíes (**d**, con sus crías) y los dugongos (**e**) —llamados también sirenios, debido a su supuesta semejanza con las sirenas, tal como describieron algunos marinos frustrados— regresaron al agua. Algunos grupos —tal como sugiere la fascinante *Odontochelys semitestacea,* la prototortuga sin caparazón dorsal (**f**)— que regresaron al agua, pudieron haber vuelto de nuevo a tierra más tarde.

Volver

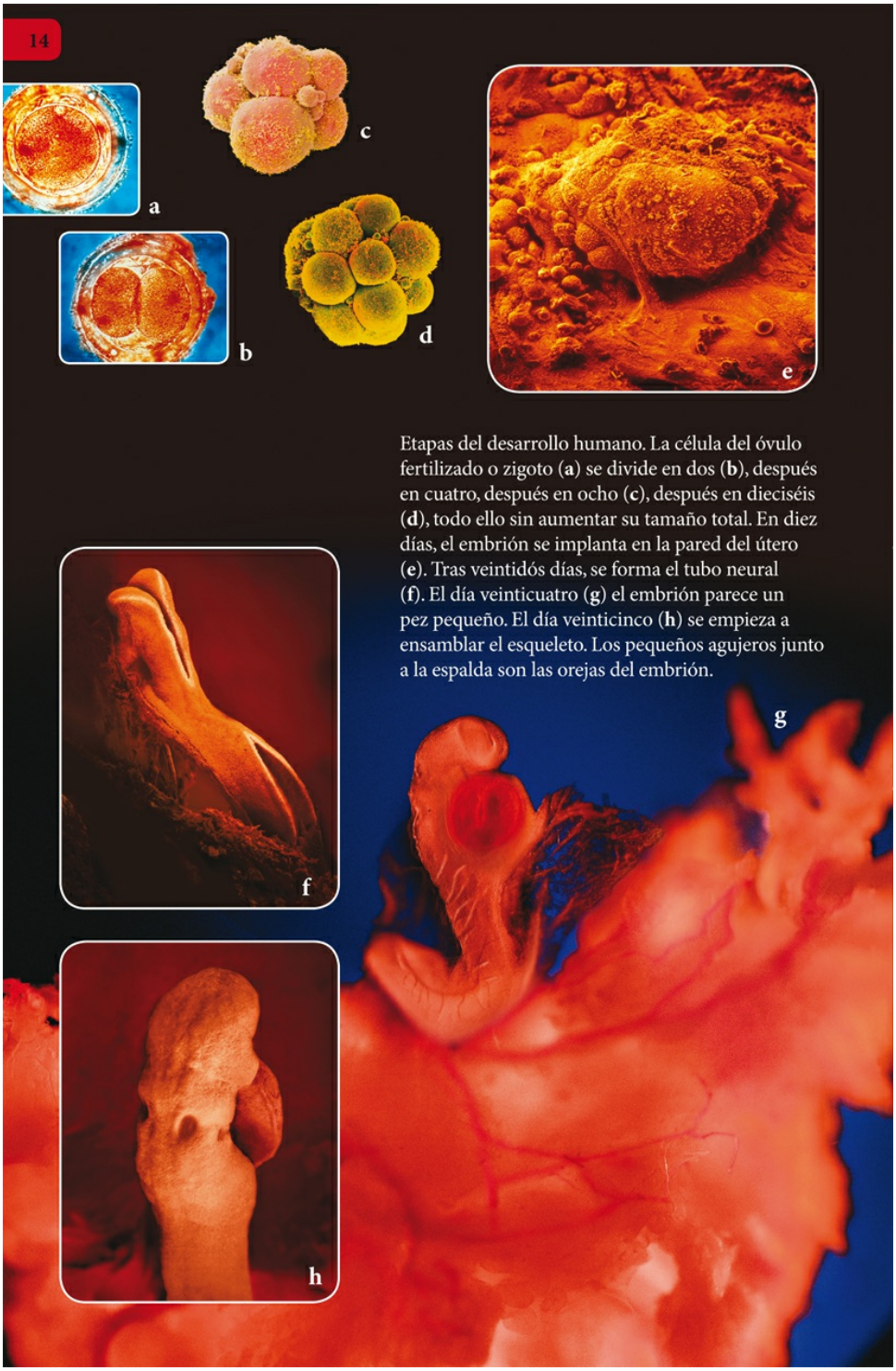
Volver



(**a**) y (**b**) La molécula verde más grande es hexokinase, una enzima importante que procesa la glucosa (la pequeña molécula marrón) añadiéndole fosfato. Las «mandíbulas» abiertas (el «sitio activo» de la enzima) de (**a**) atrapan la glucosa (**b**), la sujetan mientras se añade el fosfato y después la liberan. (**c**) Incluso las células simples son enormemente complicadas. Lejos de ser una simple bolsa llena de jugo, la célula se completa con elaboradas máquinas dotadas de membranas y cintas transportadoras de moléculas. La clave para entender tanta complejidad consiste en asumir que todo se hace de forma local, desde pequeñas entidades que obedecen reglas *locales*.

Volver

Volver

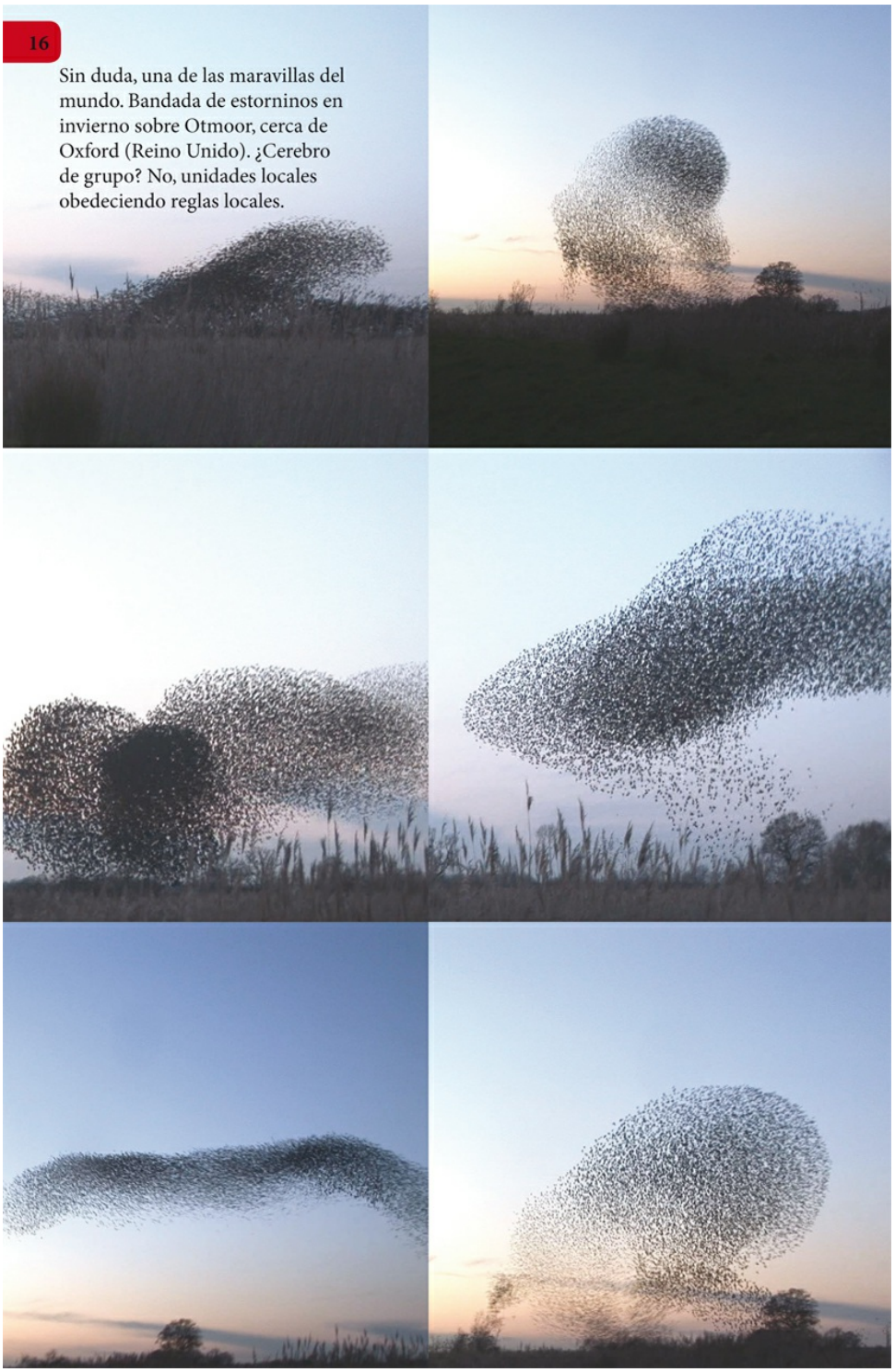


Etapas del desarrollo humano. La célula del óvulo fertilizado o zigoto (**a**) se divide en dos (**b**), después en cuatro, después en ocho (**c**), después en dieciséis (**d**), todo ello sin aumentar su tamaño total. En diez días, el embrión se implanta en la pared del útero (**e**). Tras veintidós días, se forma el tubo neural (**f**). El día veinticuatro (**g**) el embrión parece un pez pequeño. El día veinticinco (**h**) se empieza a ensamblar el esqueleto. Los pequeños agujeros junto a la espalda son las orejas del embrión.

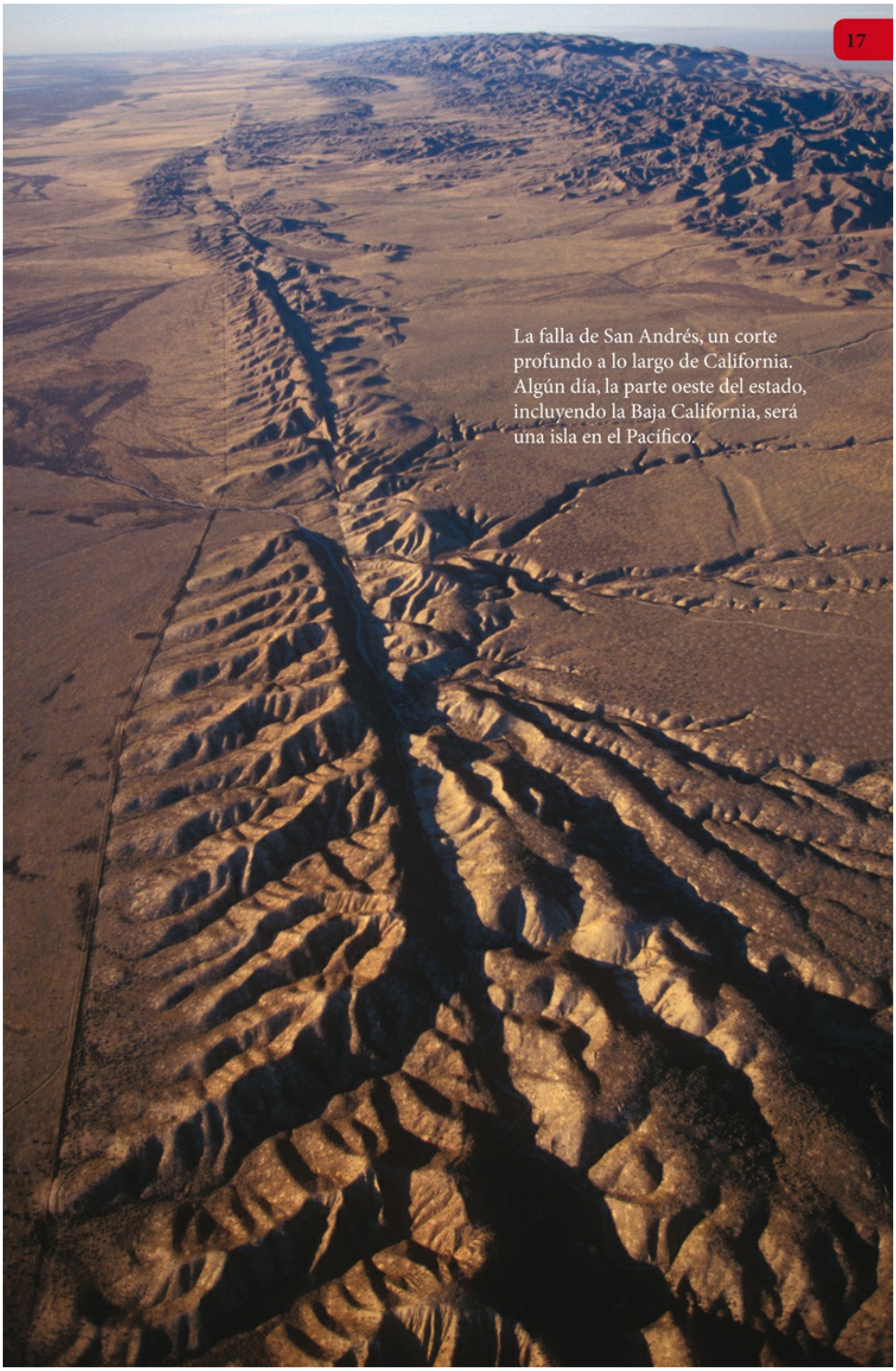
Volver

Pasadas cinco o seis semanas (**i**), el embrión empieza a parecerse a un bebé y continúa creciendo, cambiando sus proporciones (**j**, **k**, **l**) hasta el momento del nacimiento (**m**) y más adelante.

Volver


16
Sin duda, una de las maravillas del mundo. Bandada de estorninos en invierno sobre Otmoor, cerca de Oxford (Reino Unido). ¿Cerebro de grupo? No, unidades locales obedeciendo reglas locales.

Volver



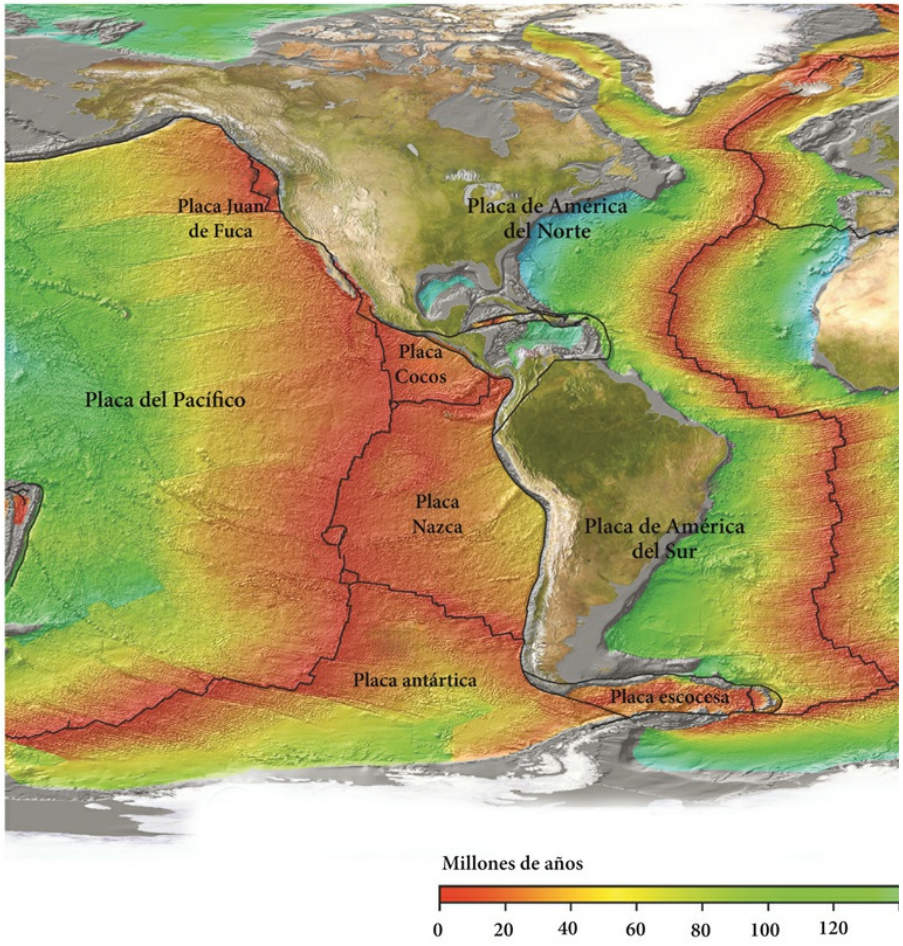
La falla de San Andrés, un corte profundo a lo largo de California. Algún día, la parte oeste del estado, incluyendo la Baja California, será una isla en el Pacífico.

Volver

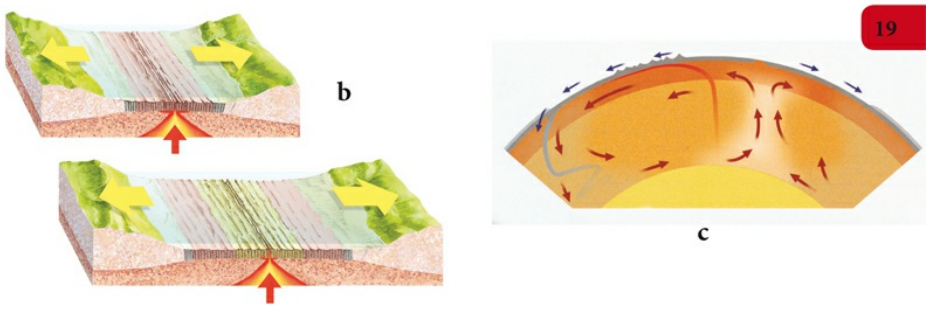
18

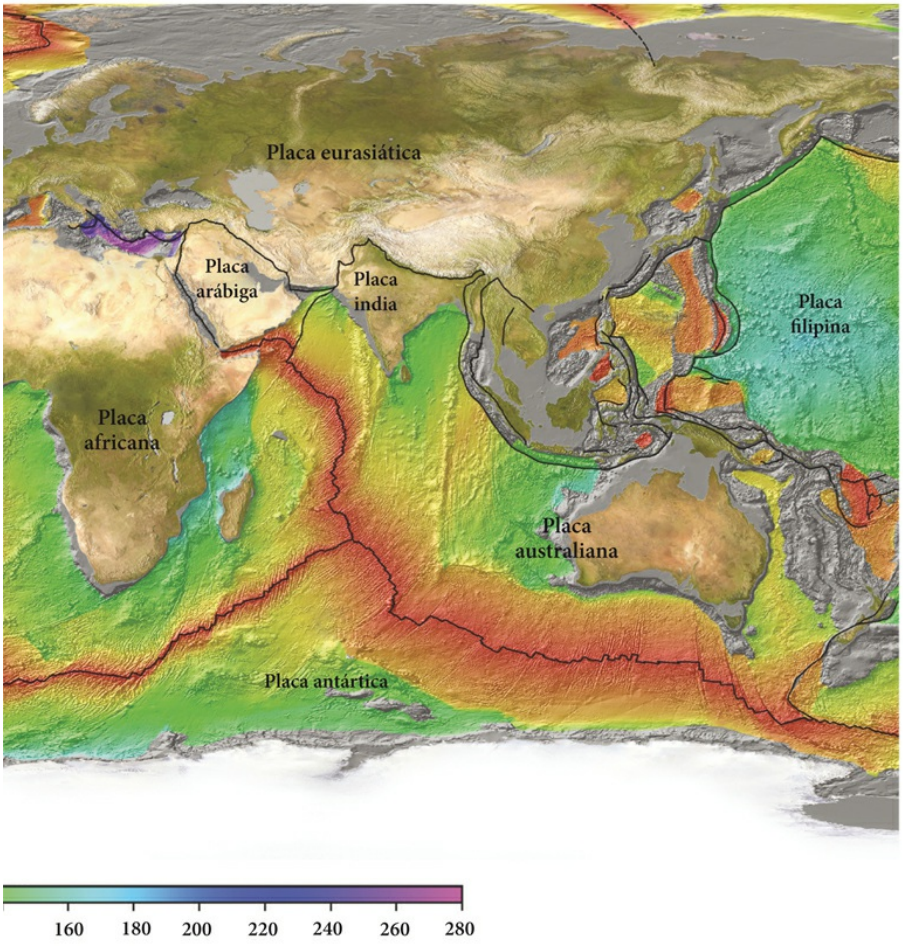
(**a**) Código de colores para las distintas edades de las rocas submarinas. El hipotético submarino del capítulo 9 traza una ruta hacia el Este, desde la protuberancia de Brasil hasta alcanzar las rocas jóvenes de la cadena montañosa en mitad del Atlántico. (**b**) El fondo marino que se abre y (**c**) las profundas y lentas corrientes de convección que dirigen el movimiento de las placas.

a



Volver


19
b
c


Placa eurasiática
Placa arábiga
Placa india
Placa filipina
Placa africana
Placa australiana
Placa antártica
160
180
200
220
240
260
280

Volver

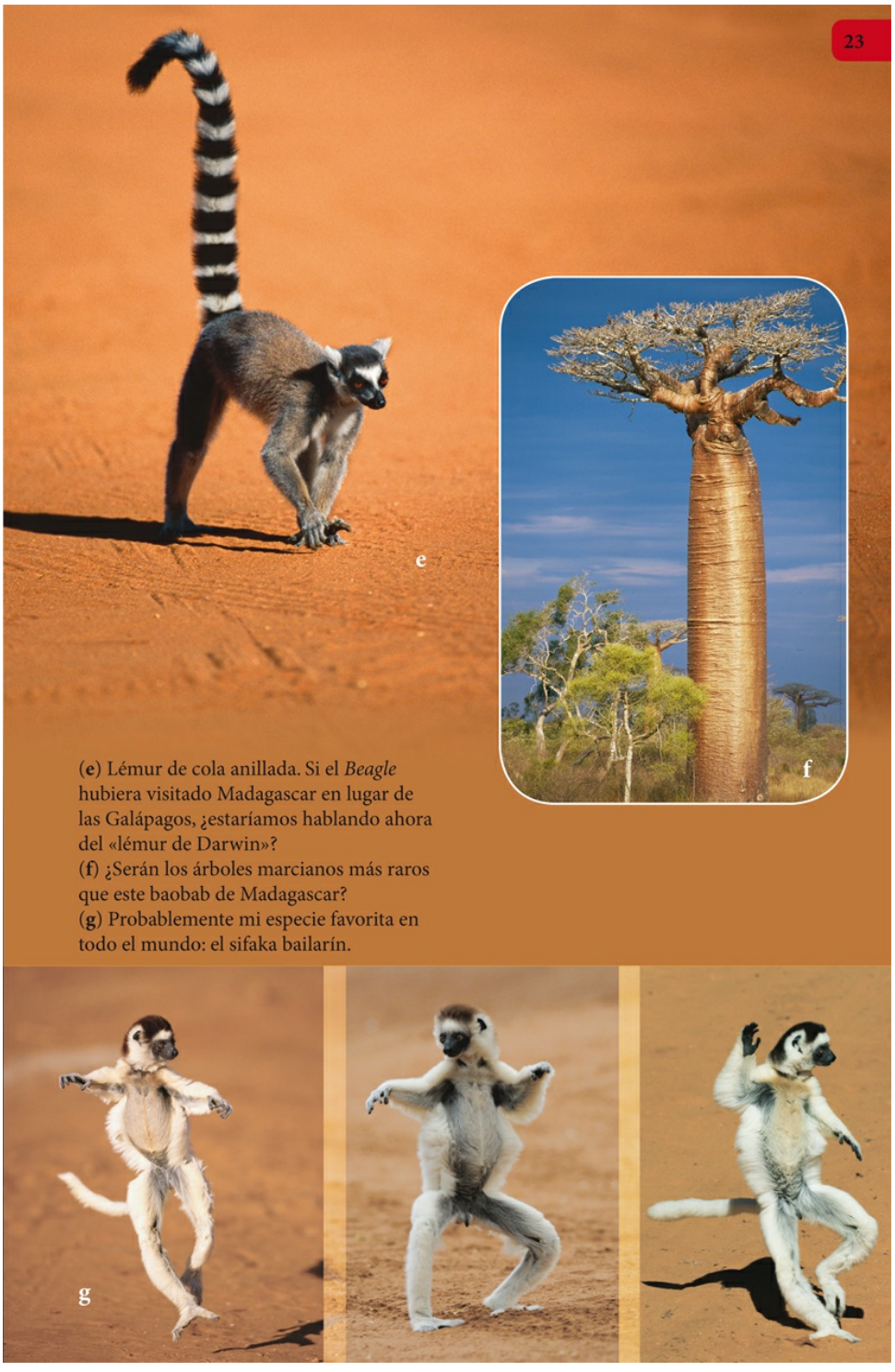
Volver

21
e
f
Galápagos: ¿el joven escaparate de la evolución?
(a) Caldera en Fernandina, la más joven y activa isla volcánica de las Galápagos. (b) Vista aérea de las Galápagos, con el verde de las tierras altas (volcanes) y el color oscuro de las llanuras de lava. (c) Pelícano de las Galápagos sumergiéndose en picado en busca de peces. Esta subespecie del pelícano marrón de las Galápagos recibe el nombre subespecífico de *urinator*.
(d) Iguana marina de las Galápagos nadando. Esta costumbre es única entre los lagartos. Las tortugas gigantes de las Galápagos varían de una isla a otra. El caparazón en forma de silla de montar (e), a diferencia del que, en forma de cúpula, tienen las tortugas comedoras de hierba (f), es característico de las islas en las que las tortugas se mueven entre cactus y, por tanto, deben estirar el cuello hacia arriba.
(g) Escena típica en las Galápagos. El pelícano marrón de las Galápagos, el pingüino de las Galápagos (el único pingüino que llegó —justo— al hemisferio norte) y los cangrejos Sally Lightfoot sobre rocas de lava negra.
g

Volver

22
Australia y Madagascar: dos «islas» de evolución.
(a) Los canguros son el equivalente australiano de los antílopes, pero se han especializado en saltar, en lugar de galopar.
a
(b) Los eucaliptos dominan los bosques australianos.
b
(c) Los koalas son los perezosos de los bosques australianos, con una tasa metabólica igual de lenta. Se han especializado en comer hojas de eucalipto, quizá porque muy pocos animales pueden soportar sus toxinas. Observe el bebé en la bolsa, que está al revés, quizá por un accidente histórico.
c
(d) El ornitorrinco es un superviviente de una era antigua en la que los mamíferos de Gondwana aún nacían de huevos.
d

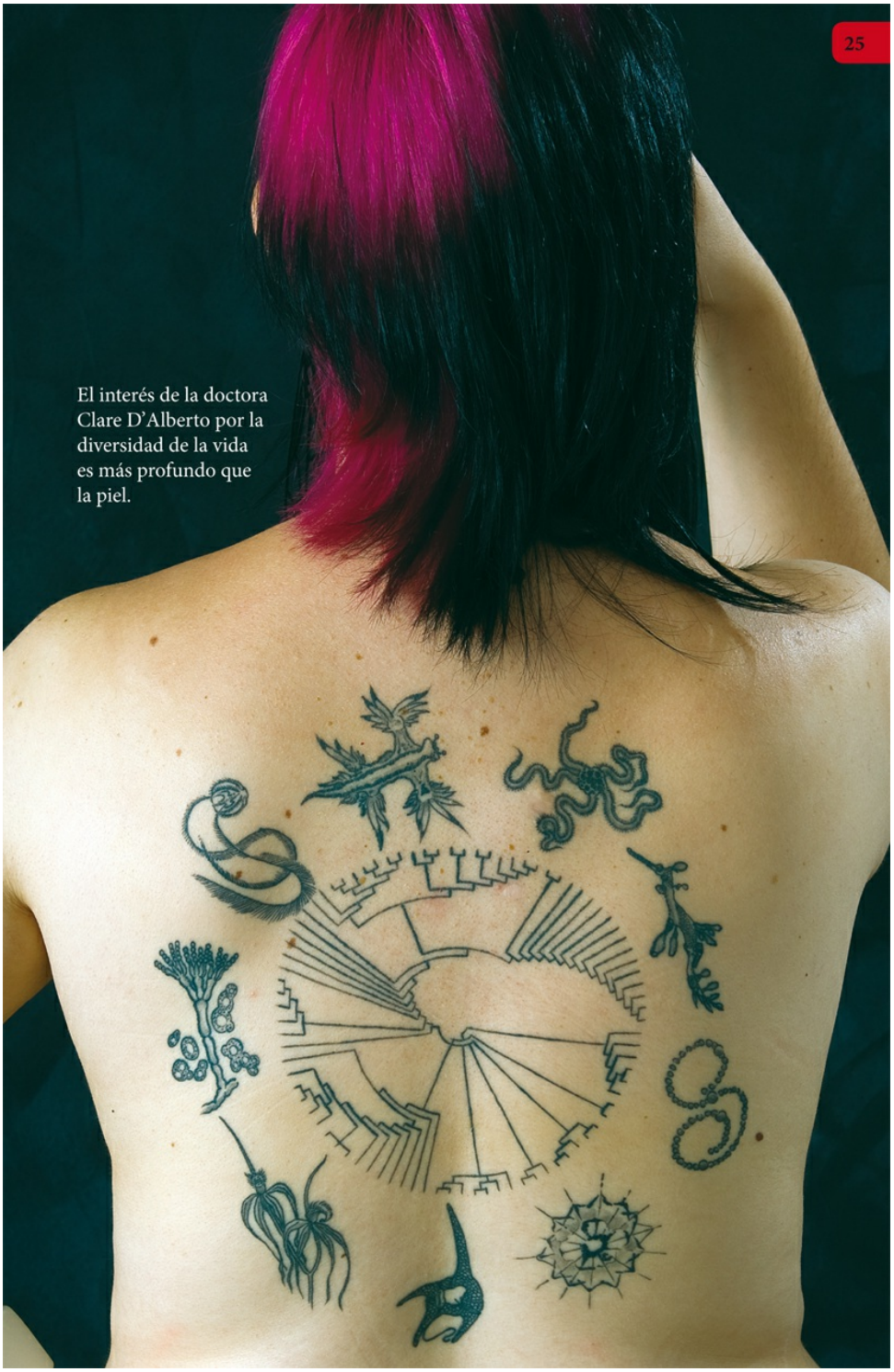
Volver


23
e
f
(e) Lémur de cola anillada. Si el *Beagle* hubiera visitado Madagascar en lugar de las Galápagos, ¿estaríamos hablando ahora del «lémur de Darwin»?
(f) ¿Serán los árboles marcianos más raros que este baobab de Madagascar?
(g) Probablemente mi especie favorita en todo el mundo: el sifaka bailarín.
g

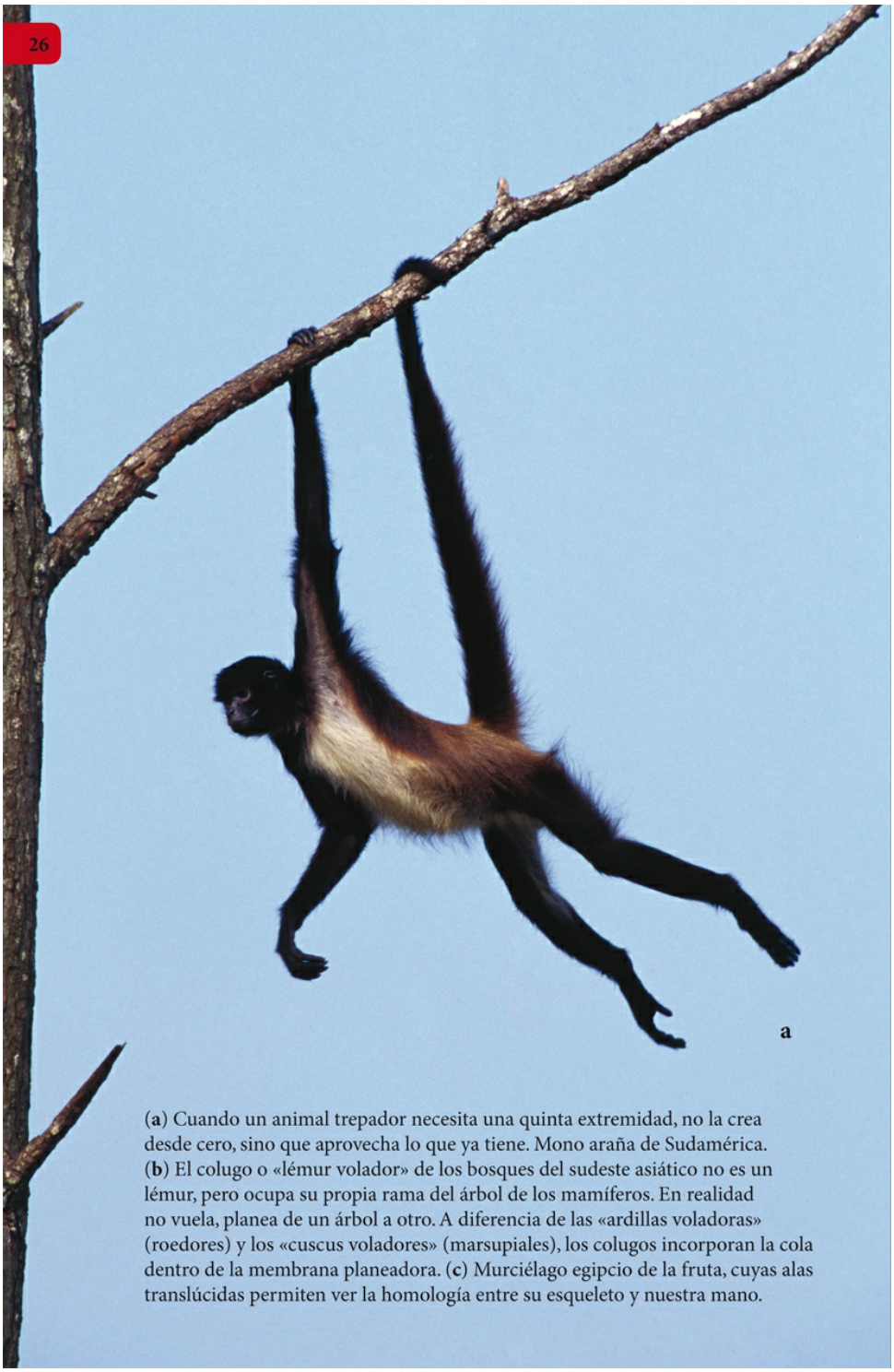
Volver

24
No se rían de este alcatraz patiazul que se estira de puntillas hacia el cielo. Se trata de impresionar a los demás alcatraces, y eso es lo que importa.

Volver


25
El interés de la doctora Clare D'Alberto por la diversidad de la vida es más profundo que la piel.

Volver



(**a**) Cuando un animal trepador necesita una quinta extremidad, no la crea desde cero, sino que aprovecha lo que ya tiene. Mono araña de Sudamérica. (**b**) El colugo o «lémur volador» de los bosques del sudeste asiático no es un lémur, pero ocupa su propia rama del árbol de los mamíferos. En realidad no vuela, planea de un árbol a otro. A diferencia de las «ardillas voladoras» (roedores) y los «cuscus voladores» (marsupiales), los colugos incorporan la cola dentro de la membrana planeadora. (**c**) Murciélago egipcio de la fruta, cuyas alas translúcidas permiten ver la homología entre su esqueleto y nuestra mano.

Volver

Volver

28
a
b
Las cortas alas de estos pájaros no voladores revelan inequívocamente su descendencia de ancestros voladores. Los avestruces (**a**) aún utilizan sus alas, pero solo por equilibrio y por motivos sociales. El cormorán no volador de las Galápagos (**b**) sigue levantando las alas para secarlas, igual que sus primos voladores más comunes. Es un experto pescador submarino (**c**) pero, a diferencia de los pingüinos, no utiliza sus alas para nadar, sino que se impulsa con vigorosos golpes de sus largas patas palmípedas. (**d**) «Lamentablemente», según Douglas Adams, «el kakapo parece que no solo ha olvidado cómo volar, sino que ha olvidado que ha olvidado cómo volar. Aparentemente, un kakapo seriamente asustado se subirá a un árbol y saltará de él, aunque vuela como un ladrillo y aterriza en un salto sin gracia sobre el suelo».
c
d

Volver

f

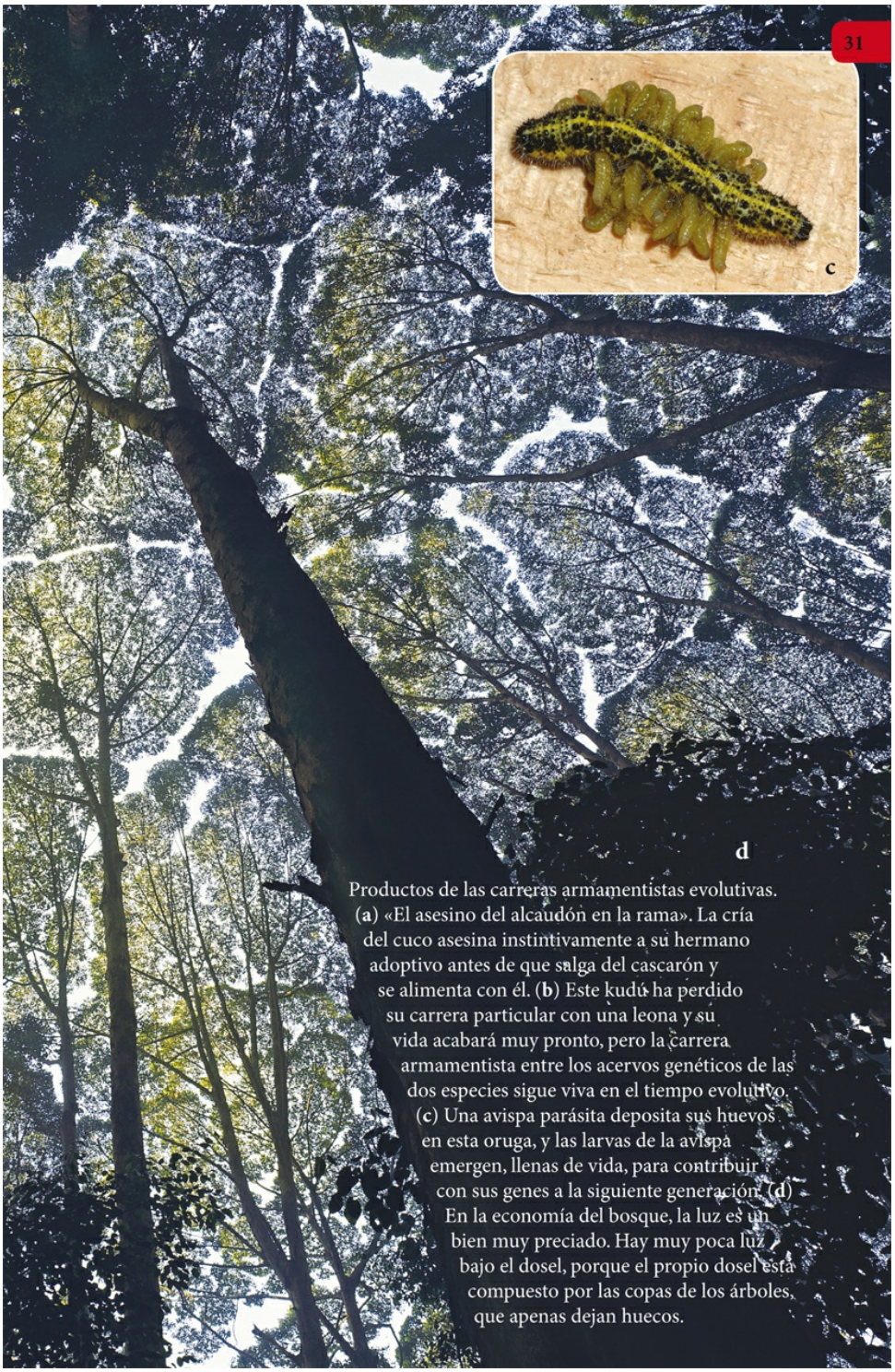
e

(**e**) Las alas son un estorbo bajo tierra, y probablemente ese es el motivo por el que las hormigas obreras no las desarrollan. Las hormigas reina proporcionan un patético ejemplo de esta teoría, ya que utilizan sus alas una única vez, para volar desde el hormiguero en el que nacen, encontrar un macho y dedicarse a cavar el nuevo nido. Cuando comienzan su nueva vida bajo tierra, lo primero que hacen es perder sus alas, en algunos casos arrancándoselas. (**f**) Los animales que cavan túneles, como la salamandra de cueva, suelen ser blancos. A pesar de que no los utilizan en la oscuridad, ¿por qué se «esfuerzan» en reducir sus ojos? (*Véase* texto en pág. 314). Los delfines, mamíferos, (**g**) parecen a primera vista grandes y veloces peces, como el «pez delfín» o dorado, porque viven de forma muy similar.

g

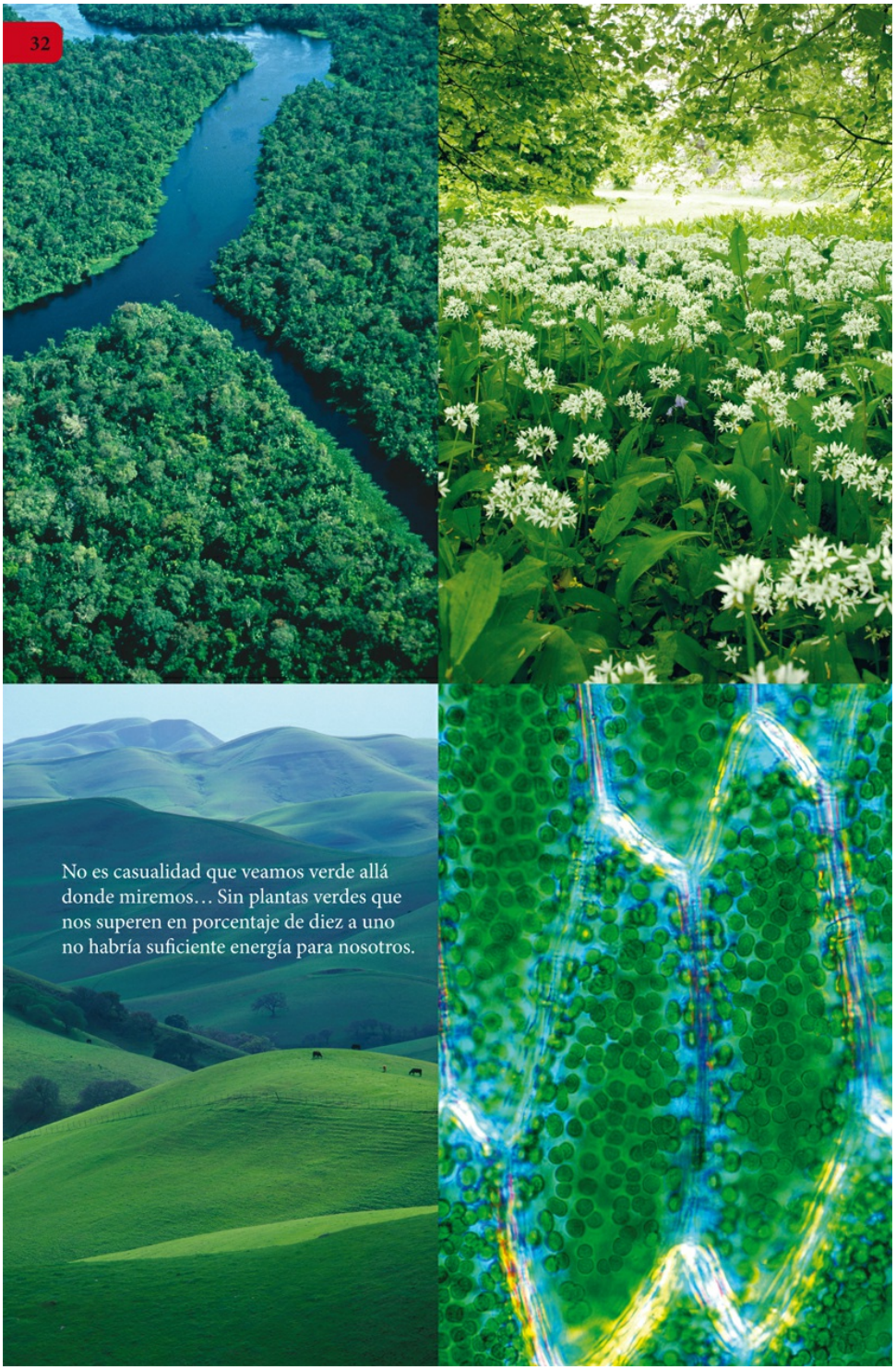
Volver

Volver



Productos de las carreras armamentistas evolutivas. (**a**) «El asesino del alcaudón en la rama». La cría del cuco asesina instintivamente a su hermano adoptivo antes de que salga del cascarón y se alimenta con él. (**b**) Este kudú ha perdido su carrera particular con una leona y su vida acabará muy pronto, pero la carrera armamentista entre los acervos genéticos de las dos especies sigue viva en el tiempo evolutivo. (**c**) Una avispa parásita deposita sus huevos en esta oruga, y las larvas de la avispa emergen, llenas de vida, para contribuir con sus genes a la siguiente generación. (**d**) En la economía del bosque, la luz es un bien muy preciado. Hay muy poca luz bajo el dosel, porque el propio dosel está compuesto por las copas de los árboles, que apenas dejan huecos.

Volver


32
No es casualidad que veamos verde allá donde miremos… Sin plantas verdes que nos superen en porcentaje de diez a uno no habría suficiente energía para nosotros.

Notas

[1] No es mi cita favorita de Yeats, pero sirve en este caso.

[2] Esta no es la frase de Mayr, pero expresa su idea.

[3] ¿A quién no le gustan los perros, si son tan buenos perdedores?

[4] Esto sería estrictamente cierto en el modelo de la genética que Mendel nos ofreció, y en el modelo de la genética que todos los biólogos siguieron hasta la revolución de Watson-Crick de los años cincuenta. Es *casi* cierto, pero no del todo, dado lo que sabemos de los genes como cadenas largas de ADN. A efectos prácticos podemos suponer que es cierto.

[5] En la granja donde pasé mi infancia teníamos una vaca especialmente agresiva y escandalosa llamada Arusha. Arusha era todo un «personaje» y un problema. Una día el pastor, Mr. Evans, dijo con resignación: «A mí me parece que Arusha es más como un cruce entre un toro y una vaca».

[6] Un rumor persistente aunque falso sostiene que Darwin poseía una copia parcial de la revista alemana en la que Mendel publicó sus resultados, cuyas páginas más relevantes estaban intactas cuando murió. Este rumor, probablemente, tiene su origen en el hecho de que tenía un libro llamado *Die Pflanzen-mischlinge,* escrito por W. O. Focke. Focke se refería brevemente a Mendel, y la página en la que lo hacía estaba efectivamente intacta en la copia de Darwin. Pero Focke no hizo demasiado énfasis en el trabajo de Mendel y no mostró evidencias de entender su profundo significado, así que no está tan claro que Darwin se hubiera dado cuenta ni siquiera leyendo la página correspondiente. En cualquier caso, el alemán de Darwin no era muy bueno. Si hubiera leído el artículo de Mendel, la historia de la biología habría sido muy diferente. Se puede argumentar que incluso el mismo Mendel no entendió toda la importancia de su trabajo. Si lo hubiera hecho, podría haber escrito a Darwin. En la biblioteca del monasterio de Mendel, en Breno, tuve en mi mano la copia (en alemán) de *El origen de las especies* que el monje poseía, y vi sus anotaciones en los márgenes, lo que indica que él lo leyó.

[7] Tras comenzar en 1908 con el cautivador, excéntrico y amante del cricket matemático G. H. Hardy, e, independientemente, con el médico alemán Wilhelm Weinberg, la teoría culminó con el trabajo del gran genetista y estadístico Ronald Fisher y, de nuevo de forma también en gran medida independiente, del de los otros cofundadores de la genética de poblaciones, J. B. S. Haldane y Sewall Wright.

[8] Al igual que sucede en el resto de miembros de la familia de las margaritas, cada «flor» es en realidad un conjunto de flores más pequeñas (cogollos), unidas entre sí en el disco oscuro central. Los pétalos amarillos que rodean los girasoles son, de hecho, los pétalos de las flores que ocupan el borde exterior. El resto de flores del disco también tienen pétalos, pero son demasiado pequeños como para que se vean.

[9] Quizá debido —siendo una planta del Nuevo Mundo— a que el girasol no se menciona explícitamente en la Biblia. La mente teológica se deleita en las delicadezas de las reglas de abstinencia y en el ingenio requerido para capearlas. En América del Sur, los capibaras (un tipo de conejillo de Indias gigante) estaban condenados a ser

pescado honorífico para los propósitos de las reglas de abstinencia católicas de los viernes, presumiblemente porque viven en el agua. Tal como afirma la escritora culinaria Doris Reynolds, los *gourmets* de la Iglesia Católica descubrieron un agujero que les permitió comer carne los viernes. Bájese la pierna de un cordero a un pozo y luego «pésquese». Debían pensar que a Dios se le engaña fácilmente.

[10] Oliver Morton comenta este asunto y otros similares en su provocativo libro *Eating the Sun* [Comiendo el Sol].

[11] Al menos no hay razón para pensar que lo hacen, o que disfrutan en algún sentido que nosotros entendamos. Volveré a esta tentación recurrente en el capítulo 12.

[12] Así designadas por «la multitud de perros de enorme tamaño» que menciona Plinio en la *Historia natural*.

[13] Por ejemplo, la habilidad que presentan los perros pastores para reunir al ganado procede del acecho de los lobos, salvo la muerte final, que se ha eliminado de la secuencia.

[14] No afecta a mi argumento, pero esta historia solo se aplica a los lofiformes hembra. Los machos son normalmente enanos diminutos que se adhieren como parásitos al cuerpo de la hembra, como una aleta adicional.

[15] El popular bulo sobre que Hitler se inspiró en Darwin procede en parte del hecho de que tanto Hitler como Darwin quedaron impresionados por algo que todo el mundo conocía desde hacía siglos: podemos criar animales para obtener características deseadas. Hitler aspiraba a aplicar este conocimiento común en la especie humana. Darwin no. Su inspiración se dirigió hacia una meta mucho más interesante y original. La gran intuición de Darwin fue que no necesitábamos un agente de cría: la naturaleza —los meros supervivientes o los sucesos reproductivos diferenciales— puede desempeñar ese papel de criador. El «darwinismo *social*» de Hitler —su idea de lucha entre razas— es en realidad muy *anti*darwiniano. Para Darwin, la lucha por la existencia era una lucha entre individuos dentro de una especie, no entre especies distintas, razas o cualquier otro grupo. No deje que le engañe el desafortunado subtítulo del gran libro de Darwin: *El origen de las especies mediante la selección natural o la conservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida.* Está bastante claro a través del propio texto que Darwin no se refería a las razas en el sentido de «Grupo de personas, animales o plantas conectados por origen o descendientes comunes» *(Oxford English Dictionary*, acepción 6.I). Por el contrario, él trataba de referirse a algo como lo que expresa la acepción 6.II de ese mismo diccionario: «Grupo o clase de personas, animales o cosas que comparten una o varias características». Un ejemplo de esta segunda acepción sería «todos aquellos individuos (independientemente de su ubicación geográfica) que poseen ojos azules». En la jerga técnica de los genetistas modernos, que nunca estuvo a disposición de Darwin, expresaríamos el sentido de «raza» en su subtítulo como «todos aquellos individuos que poseen un alelo concreto». El malentendido de la lucha darwiniana por la existencia como lucha entre *grupos* de individuos —la denominada «falacia de la selección por grupos»— lamentablemente no se limita al racismo hitleriano. Resurge continuamente en las erróneas interpretaciones del darwinismo, incluso entre algunos biólogos profesionales que deberían saberlo mejor que nadie.

[16] Probablemente la más famosa exhibición canina del mundo, organizada por el club Kennel. *(N. del T.)*

[17] Los psicólogos tienen pruebas análogas sobre la capacidad de asumir riesgos de los humanos que muestran diferencias interesantes. Los emprendedores típicamente puntúan alto en medidas de asunción de riesgo, como los pilotos, los escaladores, los motociclistas de carreras y otros entusiastas de los deportes extremos. Las mujeres tienden a ser más reacias al riesgo que los hombres. Las feministas señalarían aquí que la flecha causal podría ir en el otro sentido: las mujeres serían más reacias al riesgo por los trabajos a los que la sociedad las conduce.

[18] Soy un reloj de sol y lo que hago es una chapuza comparado con lo que hace mucho mejor un reloj de pulsera

Hilaire Belloc

[19] Lo que se basa presumiblemente en el hecho de que tenemos diez dedos. Fred Hoyle ha especulado ingeniosamente que, si hubiéramos nacido con ocho dedos, y por tanto nos hubiéramos acostumbrado a la aritmética octal en lugar de la decimal, podríamos haber inventado la aritmética binaria y, como resultado, las computadoras electrónicas un siglo antes de lo que lo hicimos.

[20] Desgraciadamente, la leyenda popular que dice que se le apareció a Mendeleiev en un sueño es falsa.

[21] Pensémoslo de esta manera. Imaginemos todas las líneas rectas posibles. Para cada línea calculemos cuánto se ajusta a los puntos midiendo la distancia de cada punto a la línea y sumándolas (después de elevarlas al cuadrado por una buena razón matemática cuya explicación nos llevaría ahora demasiado tiempo). De todas las líneas rectas posibles, la que *minimiza* la suma de las distancias al cuadrado entre cada punto y la línea, sumando todos los puntos, es la línea de regresión ajustada. Nos muestra la tendencia sin que nuestros ojos se distraigan con todo el barullo de los puntos. Hay diferentes cálculos que los estadísticos hacen para determinar cómo de *fiable* es la línea como indicador de la tendencia. Estos cálculos se llaman pruebas de significatividad estadística. Utilizan la anchura de dispersión con respecto a la línea.

[22] Hasta dos veces más grandes, aunque las lagartijas de Pod Kopiste hubieran evolucionado a la misma velocidad desde su antepasado común de treinta y siete años antes.

[23] Las mismas características de los gorilas aparecen en el cráneo y en los dientes de nuestro robusto primo *Paranthropus boisei* (el «hombre cascanueces», también llamado Zinj y Dear Boy), e indican que es casi seguro que fuera vegetariano.

[24] No es una metáfora vacía, ya que los anillos de las hadas de las setas consiguen su forma circular exactamente por la misma razón.

[25] ¿Recuerda la línea recta que se ajustaba a los datos del declive del tamaño de los colmillos de los elefantes desde 1925 hasta 1958? Expliqué entonces que el método es equivalente a intentarlo con todas las líneas rectas posibles y encontrar la que minimiza la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos del gráfico a la línea. Pero se puede hacer lo mismo sin limitarse a líneas rectas. Se pueden probar todas las curvas posibles de un cierto tipo definido por los matemáticos. La hipérbola es una de esas curvas. En este caso probamos todas las posibles hipérbolas, medimos las distancias a ellas desde cada punto del gráfico, luego sumamos todas esas distancias elevadas al cuadrado. Hacemos lo mismo para todas las hipérbolas y después elegimos

la que minimiza esa suma. Lenski siguió un atajo equivalente a esa operación exhaustiva para llegar a la hipérbola más ajustada, que es la que está dibujada en el gráfico.

[26] Se espera un patrón incremental de evolución en criaturas como las bacterias que (la mayoría del tiempo) no se reproducen sexualmente. En animales como nosotros, que solo nos reproducimos sexualmente, el cambio evolutivo no está normalmente «esperando» a que aparezca una mutación clave (este es un error común que cometen quienes se oponen a la evolución con pretensiones de sofisticación). En lugar de eso, las poblaciones que se reproducen sexualmente suelen tener un suministro disponible de variación genética del que seleccionar. Aunque generadas originalmente por mutaciones pasadas, en un acervo genético hay normalmente en todo momento un gran número de variaciones genéticas, introducidas por mutación hace algún tiempo y barajadas ahora por la recombinación sexual. La selección natural a menudo actúa para cambiar el equilibrio de las variaciones existentes, en lugar de esperar a que aparezcan las mutaciones clave. En bacterias sin reproducción sexual, la idea misma de un acervo genético no se puede aplicar correctamente. Por esto es por lo que podemos esperar de forma realista ver pasos discretos, y no así en poblaciones de pájaros, mamíferos o peces.

[27] Título nobiliario británico de rango inferior, sin traducción al español. *(N. del T.)*

[28] La opinión mayoritaria sospecha del paleontólogo aficionado Charles Dawson, pero Stephen Jay Gould sugirió la teoría alternativa de que podría haber sido Pierre Teilhard de Chardin. Podemos reconocer el nombre de Teilhard como el del teólogo jesuita cuyo último libro, *El fenómeno humano*, recibió la crítica más negativa de todos los tiempos por parte del inigualable Peter Medawar.

[29] Utilizo «infinito» en el sentido habitual, del que a menudo se abusa, de algo muy, muy grande. El número real es el número de combinaciones de cada especie con todas las demás —¡y está tan cerca del infinito que no hay prácticamente diferencia!—.

[30] «Buena formación académica» me recuerda la astuta observación de Peter Medawar de que «la difusión de la educación secundaria y recientemente de la educación superior ha creado una gran población de gente, a menudo con gustos literarios y académicos muy desarrollados, que han sido educados más allá de su capacidad para desplegar un pensamiento analítico». ¿No es una joya? Es el tipo de idea que hace que quiera salir corriendo a la calle para compartirla con alguien —con cualquiera—, porque es demasiado buena para guardársela para uno mismo.

[31] Del término «clade», que significa grupo de organismos que constituyen todos los descendientes evolutivos de un antepasado común.

[32] Al menos según el consenso de los zoólogos, y continuaré utilizando las aves, por el bien del argumento, como ejemplo de una buena clase. Investigaciones recientes con fósiles han descubierto varios dinosaurios con plumas y queda abierta la posibilidad de que los animales modernos a los que llamamos aves desciendan de diferentes grupos de dinosaurios con plumas. Si el antepasado común más reciente de todas las aves modernas resulta ser un animal que no clasificaríamos como ave, tendría que revisar mi afirmación de que las aves constituyen una buena clase.

[33] Se ha sugerido, dicho sea de paso, que este gigantismo fue posible por el mayor contenido de oxígeno en la atmósfera de aquel tiempo. Los insectos no tienen pulmones y respiran por medio de pequeños tubos que bombean aire a través de su cuerpo. Los tubos no pueden abarcar todo el intrincado y extensivo sistema de distribución que forman los vasos que conducen la sangre, y es posible que esto limite el tamaño del cuerpo. Ese límite habría sido menos restrictivo en una atmósfera con el 35% de oxígeno, en lugar de solo el 21% que hay actualmente. Esto proporciona una explicación satisfactoria para las libélulas gigantes, pero no necesariamente tiene que ser la correcta. A propósito de ello, me pregunto: ¿por qué con tanto oxígeno las cosas no ardían todo el tiempo? Quizá lo hicieran. Los fuegos de los bosques debieron de ser más frecuentes que ahora, y los fósiles indican una alta incidencia de especies de plantas resistentes al fuego. No está claro por qué el contenido de oxígeno de la atmósfera presentaba un valor máximo durante el Carbonífero y el Pérmico. Puede estar asociado a la fijación en forma de carbón de tanto carbono bajo tierra.

[34] Un profesor de Oxford de la vieja escuela, que creía que estaba allí para enseñar a los estudiantes, no habría sobrevivido en la cultura actual de evaluación por investigación. Con apenas un único artículo publicado con su nombre, su legado descansa en las generaciones de alumnos agradecidos a los que impartió su sabiduría y al menos parte de sus inmensos conocimientos.

[35] Parece que esto es correcto. El *Diccionario Oxford de Citas* sugiere que la versión de la cita con *seas* (mares), utilizada normalmente, procede de un error de imprenta en la edición original de Masefield de 1902: un buen ejemplo de un meme mutante que ha tenido éxito. (Del poema *Sea Fever* de John Masefield. *[N. del T.])*

[36] Me han dicho que esto no tiene mucho sentido en griego. Si fuera *Progonochelys* sí lo tendría. Significaría algo como ‘tortuga ancestral’ o ‘tortuga primigenia’, y no puedo evitar la sensación de que eso es lo que los autores originales querían decir. Desafortunadamente las reglas de la nomenclatura zoológica son estrictas y ni siquiera los errores más obvios pueden ser subsanados una vez que han sido consagrados en una publicación donde se le haya dado nombre. La taxonomía está llena de estos errores fosilizados. Mi favorito es *Khaya*, caoba africana. La leyenda (que a mí me encantaría creer) dice que en una lengua local significa ‘No lo sé’, con el comentario añadido: «Y no me importa, y ¿por qué no paras de hacer preguntas estúpidas sobre los nombres de las plantas?».

[37] Como era de esperar, al fósil de Pekín se le llama a veces Hombre de Beijing. ¿Por qué, si estamos hablando en español y no en chino, utilizamos el término «Beijing» cuando nos referimos a la capital de China? Hay un programa muy interesante en la televisión británica llamado *Grumpy Old Men*, que es una colección genialmente editada de quejas y gimoteos de este tipo. Si yo estuviera en él diría algo como lo siguiente: No nos ponemos unas gotas de *eau* de Köln para ahogar el olor del pato de Mumbay, ni bailamos vals con la música de *El Dunaj azul* o de *Los cuentos de los bosques de Wien*. No comparamos a Neville Chamberlain, el Hombre de München, con la retirada de Napoleón de Moskva. Ni siquiera (aunque tiempo al tiempo) sacamos a pasear a nuestra pequeña y resoplante mascota Beij. ¿Qué tiene de malo Pekín cuando estamos hablando en español? Me encantó conocer recientemente a un miembro del cuerpo diplomático británico que hablaba mandarín y que había tenido un puesto importante en la embajada, insistiendo en llamarlo Pekín.

[38] Su seudónimo como escritora es Isak Dinesen, pero me gusta más utilizar su nombre real, porque viví mi niñez más temprana cerca de Karen, en el pueblo «a los pies de las colinas de Ngong», que todavía se llama así en su honor.

[39] A diferencia de las enfermedades, que a menudo reciben el nombre de sus descubridores, las especies nuevas son nombradas *por* sus descubridores pero nunca con *sus* nombres. Es una buena oportunidad para que un biólogo honre a otro o, como en este caso, a un benefactor. No sorprende que mi distinguido colega, el fallecido W. D. Hamilton, fuera homenajeado varias veces de esta forma. Hamilton, con seguridad uno de los más grandes sucesores de Darwin en el siglo xx, tenía un carácter lúgubre que recordaba al burrito Igore de A. A. Milne (no la deplorable versión de Walt Disney, por supuesto). Estaba una vez en un pequeño barco en una expedición en el Amazonas cuando le picó una avispa. Sabiendo que era un gran entomólogo, su compañero dijo: «Bill, ¿sabes el nombre de la avispa?». «Sí», le susurró tristemente Bill con su voz más lúgubre. «De hecho, lleva mi nombre».

[40] Me han advertido que *Todas las cosas brillantes y preciosas* no tiene por qué tener en los lectores el efecto nostálgico que produce en mí. Se trata de un himno anglicano para los niños escrito por la señora C. F. Alexander en 1848, que ensalza las bellezas de la naturaleza (y, en uno de sus versos, también el *statu quo* político) con el siguiente estribillo: «El Señor creó a todos». Es el tema de una espléndida parodia escrita por Eric Idle y cantada por el equipo de Monty Python:

Todas las cosas aburridas y feas / Todas las criaturas pequeñas y rechonchas / Todas las cosas indecentes y desagradables / El Señor Dios creó el lote.

Cada pequeña serpiente que envenena / Cada pequeña avispa que pica / Él creó su veneno brutal / Él creó sus horribles alas.

Todas las cosas enfermas y cancerosas / Todo el mal grande y pequeño / Todas las cosas repugnantes y peligrosas / El Señor Dios las creó todas.

Cada pequeño y desagradable avispón / Cada pequeño y bestial calamar / ¿Quién creó al espinoso erizo? / ¿Quién creó a los tiburones? ¡Él lo hizo!

Todas las cosas costrosas y ulcerosas / Toda la varicela grande y pequeña / Pútrida, repugnante y gangrenosa / El Señor Dios las creó todas.

[41] Nota para los profesionales de la interfaz entre los biólogos y los informáticos: Charles Simonyi, que habla con la autoridad de un reputado diseñador de *software,* lo explica así después de leer un borrador de este capítulo: «... la receta (del ojo, del cerebro, de la sangre, etc.) es mucho más sencilla que un mapa de lo mismo (en términos de bits o pares de bases), por lo que evolucionar habría sido literalmente imposible (en menos de 10 100 años), especialmente porque sería muy improbable que pequeñas variaciones en el mapa tuvieran algún efecto positivo, mientras que sí lo podría tener una variación en la receta». Aludiendo a mis propios «biomorfos computacionales» y «artropomorfos» (véase capítulo 2), el doctor Simonyi continúa: «Las criaturas artificiales [que usted programó para *El relojero ciego* y *Escalando el monte improbable]* son descritas mediante recetas, no con planos —un plano sería un revoltijo de vectores de líneas negras—, ¿puede imaginarse intentando jugar a la evolución con ellos variando los puntos finales de las líneas negras de uno en uno o incluso de dos en dos? Como esperaría de alguien descrito por Bill Gates, nada menos,

como «uno de los más grandes programadores de todos los tiempos», esto es correcto para los biomorfos computacionales y es seguramente correcto para las cosas vivas también.

[42] Existe el riesgo de confundir la «epigénesis» con la «epigenética», una palabra de moda que disfruta ahora de sus quince minutos de gloria entre la comunidad de la Biología. Sea lo que sea lo que signifique «epigenética» (sus defensores no parecen ponerse de acuerdo, y mucho menos entre ellos), todo lo que voy a decir aquí es que no es lo mismo que epigénesis.

[43] Mi colega de Historia Medieval, el doctor Christopher Tyerman, confirma que fue, en realidad, una leyenda inventada en los tiempos victorianos por razones idealistas, pero que nunca hubo un ápice de verdad en ello.

[44]**invaginación:** Acción y efecto de invaginar [doblar hacia dentro los bordes de una vaina, de un tubo, de una vejiga o de otra cosa semejante], *Diccionario de la Real Academia Española.*

[45] La moda se pasó, pero yo la reintroduje en los años cincuenta en el mismo colegio, donde se extendió como una segunda epidemia de la misma enfermedad.

[46] Me disculpo si no he explicado por qué «notocordio» *(notochord,* en inglés; *N. del T.)* tiene una «h» como un acorde musical o una cuerda en matemáticas *(chord,* en inglés), mientras que «médula espinal» *(spinal cord)* no la lleva, como un trozo de cuerda *(cord,* en inglés). Siempre lo he encontrado misterioso y me he preguntado si podría representar algún error olvidado hace tiempo pero fosilizado. Hay que reconocer que el *Oxford English Dictionary* recoge *chord* como una forma alternativa de deletrear la forma *cord,* que significa 'cuerda', pero la diferencia no parece importar, dado que la médula espinal y el notocordio *(notochord)* se extienden a lo largo del cuerpo embrionario, uno sobre otro.

[47] Y, por cierto, esta es una historia fascinante por sí misma. Ha captado mi imaginación desde que el gran fisiólogo de Cambridge Joseph Needham (un sabio que se hizo aún más famoso como experto en la historia de la ciencia china) llegó a mi colegio para demostrarlo, aceptando la invitación de su sobrino, que era nuestro profesor en aquella época: una aportación del nepotismo a la que estoy agradecido. Bajo la tutela del doctor Needham, observamos fibras musculares en nuestros microscopios y las vimos acortarse, como por arte de magia, cuando les pusimos una gota de ATP, adenosín trifosfato, la moneda energética universal del cuerpo.

[48] Esta afirmación necesita un comentario extenso. La determinación de la secuencia de aminoácidos por los genes es, de hecho, absoluta. Pero la determinación de la forma tridimensional por la secuencia unidimensional de aminoácidos no es absoluta, y eso es importante. Hay algunas secuencias de aminoácidos que son capaces de enrollarse en dos formas tridimensionales diferentes alternativas. Las proteínas llamadas priones, por ejemplo, tienen dos formas estables. Son alternativas discretas sin estados intermedios estables, en el mismo sentido en que un interruptor es estable en la posición de encendido y de apagado, y no en ninguna intermedia. Estas «proteínas interruptores» pueden ser desastrosas o pueden ser útiles. En el caso de los priones, sus efectos son desastrosos. En la enfermedad de las vacas locas, una proteína útil en el cerebro (un constituyente normal de las membranas celulares) resulta tener una forma alternativa —una forma alternativa de plegarse a sí misma en el autoorigami—. La forma alternativa no aparece normalmente, pero si lo hace en una molécula, hace que las moléculas

vecinas la sigan: la copian y se cambian a la forma alternativa. Como una onda en un dominó que se derrumba, o como la propagación irresponsable de un rumor, la forma alternativa prión se propaga por el cerebro con resultados desastrosos para la vaca —o para las personas en el caso de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, o para las ovejas en el caso del *scrapie*—. Pero algunas veces, moléculas con la capacidad de hacer autoorigami ellas mismas y convertirse en formas alternativas son útiles. Sin dejar la metáfora del interruptor de la luz, encontramos un ejemplo maravilloso. La rodopsina es la proteína de los ojos responsable de nuestra sensibilidad a la luz y tiene un componente embebido llamado retinal (que no es una proteína) que cambia de su configuración estable a una alternativa cuando es alcanzada por un fotón. Luego vuelve a la configuración original como un interruptor de la luz montado con un temporizador de ahorro, pero en ese tiempo el cambio ha sido registrado en el cerebro: «La luz detectada en ese momento en ese sitio». El maravilloso libro de Jacques Monod *Azar y necesidad* es especialmente bueno en relación con estas moléculas biestables que funcionan como interruptores.

[49] Del poema *Jabberwocky*, escrito por Lewis Carrol e incluido en *Alicia a través del espejo* en 1872. *(N. del T.)*

[50] En *Caenorhabditis* la célula original, llamada Z, tiene una cara anterior diferente a su cara posterior, y esta diferencia servirá para representar los ejes anterior y posterior. Cuando la célula se divide, la célula hija anterior, que se llama AB, tiene más sustancia del extremo anterior que la célula hija posterior, que se llama P1, y esta diferencia será aprovechada para definir nuevas diferencias más adelante. AB está destinada a crear la mitad de las células del cuerpo, incluyendo la mayoría del sistema nervioso, de lo que no daré más detalles aquí. P1 tiene dos hijos, de nuevo diferentes entre sí, llamados EMS (que define el lado ventral o de la barriga del gusano final) y P2 (que define el lado dorsal). Son nietos de Z (recordemos que cuando utilizo palabras como «nieto» y «bisnieto» estoy hablando de células dentro del embrión en desarrollo, no de gusanos). EMS tiene ahora dos hijos llamados E y MS, mientras que P2 tiene dos hijos llamados C y P3. E, MS, C y P3 son bisnietos de Z (los otros bisnietos descienden de AB y no los voy a mencionar ahora excepto para decir que dos de ellos, llamados Aba1 y Abp1, definen el lado izquierdo del gusano final, y sus primos, ABar y ABpr, definen el lado derecho). P3 tiene dos hijos llamados D y P4 que son tataranietos de Z. MS y C también tienen hijos, pero no les daré nombre aquí. P4 está destinado a dar lugar a la llamada línea germinal. La línea germinal consiste en células que no están involucradas en la construcción del cuerpo, sino que se van a convertir en células reproductivas. Obviamente no hay necesidad de recordar o apuntar los nombres de estas células. El asunto es que, aunque son genéticamente iguales entre sí, se diferencian en su naturaleza química como una consecuencia acumulada de su historia en la secuencia de divisiones celulares dentro del embrión.

[51] Sulston, que estuvo en Cambridge después de que Brenner se marchara a Estados Unidos, fue otro miembro del triunvirato que recibió el Premio Nobel por el trabajo con el *Caenorhabditis*. Sulston llegó a liderar la sección británica del Proyecto del Genoma Humano oficial. El equipo norteamericano fue liderado por James Watson y más tarde por Francis Collins.

[52]*El viaje del Beagle.* Los naturalistas victorianos eran muy dados a emitir juicios de valor de este tipo en sus libros. Mis abuelos tenían un libro de aves en el que la entrada del cormorán decía así: «No hay nada que decir de este deplorable pájaro».

[53] La regla parece ser que, en las islas, los animales grandes se hacen pequeños (por ejemplo, había elefantes enanos del tamaño de un perro grande en islas del Mediterráneo como Sicilia y Creta), mientras que los animales pequeños tienden a hacerse más grandes. Hay múltiples teorías sobre esta tendencia divergente, pero los detalles nos llevarían demasiado tiempo.

[54] Estos párrafos sobre las tortugas fueron escritos en un barco llamado *Beagle* (no el original, que desafortunadamente desapareció hace mucho tiempo), en el archipiélago de las Galápagos, y se publicaron en el *The Guardian* el 19 de febrero de 2005.

[55] Igual que la «teoría» moderna de la evolución es un hecho establecido en el sentido normal de la palabra: una teoría según la primera de las acepciones del *Oxford English Dictionary* (OED) que cité en el capítulo 1 y renombré como *teoremum*.

[56] Lamentablemente, Holmes nunca dijo eso (igual que Burns nunca escribió «en aras de» Auld Lang Syne), pero la alusión funciona porque todo el mundo piensa que lo hizo.

[57] De hecho, las leyes físicas de la escala aseguran que un ave tan grande como el pájaro elefante no podría llegar a volar aleteando, independientemente de la envergadura de sus alas. Esto es así porque los músculos necesarios para mover esas enormes alas serían tan grandes que resultarían incapaces de levantar su propio peso.

[58] Es una imagen llamativa: América del Sur y África alejándose la una de la otra más deprisa de lo que un hombre podría nadar, sin detenerse, durante cuarenta días.

[59] Puede resultar sorprendente escuchar que los caballos evolucionaron en América del Norte, porque es de sobra conocido que cuando los invasores europeos llegaron al continente, la visión de los jinetes sorprendió a los nativos. En gran medida, la evolución de los caballos tuvo lugar en América. Más tarde, los caballos se extendieron por el resto del mundo, poco antes (en términos geológicos) de extinguirse en América. Son animales americanos que han sido reintroducidos en América por el hombre.

[60] Un único hueso en los mamíferos. La mandíbula inferior de los reptiles es más complicada —y por ahí hay un cuento fascinante que he tenido que omitir en este libro (no se puede tener todo)—. En una hazaña sorprendente de prestidigitación evolutiva, los huesos más pequeños de la mandíbula inferior de los reptiles fueron colocados en el oído del mamífero, donde conforman el delicado puente para transportar el sonido desde el tímpano hasta el oído interno.

[61] El nombre holandés de *wildebeest* se utiliza últimamente mucho más que el de «ñu» *(gnu,* en inglés). Estoy intentado salvar el de «ñu» porque, si desaparece, la ingeniosa canción de Flanders y Swann dejaría de tener sentido. («Gnor am I in the least / Like that dreadful hartebeest / Oh gno gno gno, I'm a gnu!»).

[62] Asumo que mis lectores saben más que el autor (o autores) del Levítico, que pensaba que los murciélagos eran pájaros. En el capítulo 11, versículos 13-19, hay una larga lista de pájaros que son una abominación, comenzando con el águila y terminando

con «la cigüeña, la garza, la avefría y el murciélago». Es una cuestión diferente el porqué era necesario condenar a los animales como abominaciones. Era una práctica común en muchas religiones.

[63] Los biólogos solían citar la hemoglobina vegetal como un posible ejemplo de la existencia de plantas que toman prestado ADN del reino animal. Las plantas de la familia de los guisantes *(Leguminosae)* tienen unos «nódulos» en las raíces en los que habitan bacterias que capturan nitrógeno de la atmósfera y lo ponen a disposición de las plantas. Esta es la razón por la que los granjeros a menudo incluyen una cosecha de leguminosas, como tréboles o arvejas, en su rotación: especialmente si la plantación de tréboles se entierra, añade nitrógeno muy valioso al suelo. Los nódulos son de un color rojizo porque contienen una forma de hemoglobina similar a la molécula transportadora de oxígeno que hace que nuestra sangre sea roja. Los genes que fabrican la hemoglobina están en el genoma de la planta, no en el genoma bacteriano. La hemoglobina es importante para las bacterias, que necesitan oxígeno, y se puede ver como parte del acuerdo entre bacterias y plantas: las bacterias dan a las plantas nitrógeno utilizable, mientras que las plantas dan a las bacterias una casa y oxígeno utilizable distribuido a través de la hemoglobina. Como estamos acostumbrados a asociar la hemoglobina con la sangre, era natural preguntarse si el gen que fabrica la hemoglobina había sido «tomado prestado» de alguna forma del genoma de un animal, quizá transportado por una bacteria. De hecho, habría sido una idea muy buena para «tomar prestada». Desafortunadamente para esta idea tan atractiva —la transfusión de sangre definitiva—, las pruebas de la biología molecular muestran que las hemoglobinas son moradoras ancestrales de los genomas de las plantas. No se han tomado prestadas. Han estado ahí desde los tiempos ancestrales.

[64] Es poco conocido el hecho de que algunos dinosaurios tenían un ganglio en la pelvis que era tan grande (al menos en relación con el cerebro de la cabeza) que casi merece el nombre de segundo cerebro. Esto sugirió los siguientes versos, deliciosamente ingeniosos, al escritor americano de cómics Bert Leston Taylor (1866-1921):

Contemple al imponente dinosaurio / Famoso en la cultura prehistórica / No solo por su poder y su fuerza / Sino por su alcance intelectual / Observará en estos restos / Que la criatura tenía dos cerebros / Uno en su cabeza (el sitio usual) / El otro en la base de su columna / Por esto podía razonar *a priori* / Así como *a posteriori* / Ningún problema le molestó lo más mínimo / Les encontró sentido a todos / Tan listo era, tan listo y solemne / Cada pensamiento llenaba una columna vertebral / Si un cerebro era presionado mucho / Pasaba las ideas al otro / Si algo se escapaba a su mente frontal / Era rescatado por la de detrás / Y si caía en un error / Tenía una segunda oportunidad / Como se lo pensaba dos veces antes de hablar / No tenía opiniones que revocar / Así podía pensar sin congestión los dos sentidos de cada pregunta / Oh, miren a esta bestia modelo / Perecida hace diez millones de años al menos.

[65] D’Arcy Thompson fue con seguridad uno de los científicos más sabios que ha habido. No solo escribió en un inglés maravilloso de tono aristocrático, no solo fue un conocido matemático y un erudito en lenguas clásicas, así como catedrático de Historia Natural en la universidad más antigua de Escocia, sino que su libro está plagado de

citas, que asumía no tener que traducir (cómo han cambiado los tiempos), en latín, griego, italiano, alemán, francés e incluso provenzal (estas últimas *sí* se dignó a traducirlas, ¡al francés!).

[66] Estrictamente hablando, dos formas son homeomórficas si se pueden deformar hasta convertir una en la otra sin romperla y sin pegarle nuevos trozos.

[67] Quizá la frase «todas las criaturas vivas» requiera una explicación. En una sección anterior de este capítulo vimos que, mientras que el principio de «No tomar prestado» resulta casi apropiado por completo para plantas y animales, las bacterias son diferentes. Entre las bacterias (y las arqueas, que son superficialmente como bacterias pero tienen un parentesco muy lejano) se comparten muchos genes. Donde los animales utilizan el emparejamiento sexual para intercambiar ADN dentro de las especies, las bacterias usan su propia forma de «copia y pega», incluso entre especies lejanamente emparentadas. Aunque yo tenía razón en ensalzar el «único y verdadero árbol de la vida» para los animales y las plantas, todo el asunto se complica cuando llegamos a los microorganismos. Como mi colega el filósofo Dan Dennett ha expresado, si el árbol de la vida para los animales es un roble majestuoso, el de las bacterias se parece más a un baniano. En lo que se refiere a las bacterias, queda todavía mucho por decir para construir «un árbol verdadero» para cada gen por separado, independientemente de qué tipos de bacterias en particular estén circulando por él. Qué posibilidad tan fascinante. Cómo le hubiese gustado a Darwin.

[68] Mientras leía *Calculus Made Easy,* de Silvanus P. Thompson, por recomendación de mi abuelo ingeniero, se me ponía la carne de gallina cuando el autor introducía la *e* en cursiva como «un número que nunca debe ser olvidado». Una consecuencia de utilizar la *e* en lugar de, por ejemplo, 2, como el factor elegido, es que se pueden calcular darwins directamente restando logaritmos naturales entre sí. Otros científicos han propuesto el *haldano* como unidad de velocidad evolutiva.

[69] Incluso he sido calificado de «ultradarwinista», una burla que encuentro menos ofensiva de lo que creyeron los que la crearon.

[70] «Degenerado» no es lo mismo que «redundante» (aunque a menudo ambos términos se confunden), otro término técnico de la teoría de la información. Un código redundante es aquel en el que el mismo mensaje es enviado más de una vez (por ejemplo: «Ella es una mujer hembra» expresa el mensaje del sexo tres veces). La redundancia es utilizada por los ingenieros para protegerse frente a los errores de transmisión. Un código degenerado es aquel en el que más de una «palabra» es utilizada para referirse a la misma cosa. En el código genético, por ejemplo, CUC y CUG quieren decir ‘leucina’: una mutación de CUC a CUG no supone ninguna diferencia. Por eso es «degenerado»

[71] En Gran Bretaña, «Esq.» significaba (todavía es así, aunque el uso se está extinguiendo rápidamente) ‘caballero’, no ‘abogado’, como recientemente descubrí que significaba en Estados Unidos. He visto abogadas norteamericanas que se refieren a ellas mismas como «Esq.». Esto resulta a los ingleses tan raro como a los norteamericanos la designación del primer Law Lord (equivalente británico del presidente del Tribunal Supremo de Justicia) como «Lord Justice Elizabeth Butler-Sloss». El uso inglés de «Esq.» resulta aún más raro para el resto del mundo. Me han dicho que los casilleros con la letra «E» de los hoteles de todo el mundo están repletos de cartas sin repartir dirigidas a Mr. «Esq.».

[72] La conexión con las legendarias sirenas pudo establecerse por el hábito, que comparten con sus parientes de tierra, los elefantes, de amamantar a sus crías con mamas situadas en el pecho. Quizá los marineros sexualmente frustrados que llevaban en el mar mucho tiempo fueron testigos de ello a cierta distancia, y las confundieron con mujeres. A veces se ha responsabilizado a los sirenios de la leyenda de las sirenas.

[73] Las larvas destinadas a convertirse en reinas son alimentadas con sustancias especiales segregadas por glándulas situadas en la cabeza de las obreras encargadas de su cuidado. Es muy importante que la diferencia entre las reinas y las obreras sea debida al entorno, y no esté genéticamente determinada. Explico esto en profundidad en *El gen egoísta*.

[74] Sí, «troglobita», no «troglodita», cuyo significado es menos extremo.

[75] Esto es especialmente cierto en las mutaciones de gran efecto. Pensemos en una máquina delicada, como una radio o un ordenador. Una mutación grande es equivalente a darle una patada con una bota de punta metálica o a cortarle un cable al azar y volver a conectarlo en un sitio diferente. Esto *podría* mejorar su rendimiento, pero no es muy probable. Una *pequeña* mutación, por otro lado, es equivalente a realizar un pequeño ajuste en, por ejemplo, una resistencia o en el botón del dial de una radio. Cuanto más pequeña sea la mutación, más se acerca la probabilidad de mejora al 50%.

[76] También es el favorito de mi colega Jerry Coyne. En *Why Evolution is True* [¿Por qué la evolución es verdad?] ofrece una exposición maravillosamente clara sobre este ejemplo, que le recomiendo junto con el resto de su magnífico libro.

[77] La ley de Boyle dice que, para una cantidad fija de gas a una temperatura dada, la presión es inversamente proporcional al volumen. Nunca he olvidado la ley de Boyle desde que me fuera enseñada en mi clase en el colegio, la 4B1, por el profesor de ciencias más antiguo del centro, cuyo nombre era Bunjy. Estaba sustituyendo a Bufty, nuestro profesor habitual de Física, y pensamos equivocadamente que, debido a la avanzada edad de Bunjy (eso creíamos) y a su limitada visión (lo que era obvio por su costumbre de leer pegando el libro a la nariz), podíamos ignorar la disciplina y meternos con él. Qué equivocados estábamos. Nos castigó a todos con una clase extra por la tarde, que empezó haciéndonos escribir en nuestros cuadernos: «Objetivo de la lección: Enseñar a la 4B1 buenos modales y la ley de Boyle».

[78] No hay que confundirlo con otro australiano, Michael Denton, muy querido por los creacionistas, que convenientemente pasaron por alto el hecho de que, en su segundo libro, se retractó de su posición antievolutiva aun manteniéndose teísta.

[79] Si alguna vez hubo un oxímoron, es este.

[80] Dos excursionistas son perseguidos por un oso. Uno corre, el otro se para a ponerse sus zapatillas de deporte. «¿Estás loco? Ni siquiera con las zapatillas puedes ganar al oso». «No, pero te puedo ganar a ti».

[81] Fundación benéfica estadounidense cuyo objetivo es prevenir la proliferación de armas nucleares, biológicas y químicas. *(N. del T.)*

[82] O «La». El caso particular de los leones es complicado por el hecho de que las hembras llevan a cabo la mayoría de la caza, y los machos tienden a «coger su parte» en cualquier caso. No es necesario quedarse en el ejemplo de los leones. Pensemos en una especie generalizada de depredadores e imaginemos individuos «prudentes» que se abstienen de cazar por encima de lo permitido, e individuos «imprudentes» que no respetan el acuerdo.

[83] Los comentarios inexactos sobre la adaptación darwiniana se basan frecuentemente en la asunción errónea (que no se hace explícita, y es, en consecuencia, más perniciosa) de que la evolución puede anticipar. Sydney Brenner, el héroe de la sección sobre *Caenorhabditis* del capítulo 8, tiene un ingenio sarcástico que rivaliza con su inteligencia científica. Una vez le oí satirizar sobre la falacia de la «anticipación evolutiva» imaginando una especie del Cámbrico que retuviera en su acervo genético una proteína inútil porque «podría serle útil en el Cretácico».

[84] Darwin nos dijo que obtuvo de Thomas Malthus su inspiración original sobre la selección natural, y es probable que esta frase en concreto fuera alentada por el siguiente párrafo apocalíptico, del que me informó Matt Ridley: «El hambre parece ser el último y más terrible recurso de la naturaleza. El poder de la población es tan superior al poder que la Tierra tiene para producir la subsistencia de los hombres, que la muerte prematura debe visitar de una forma u otra a la raza humana. Los vicios de la humanidad son ministerios activos y disponibles de la despoblación. Son los precursores de la gran armada de la destrucción, y a menudo se encargan por sí mismos de terminar el terrible trabajo. Pero si fallaran en esa guerra de exterminación, las enfermedades, las epidemias, la peste y las plagas avanzarán en formación y harán caer a millares y decenas de millares. Si no logran el éxito completo, una gigante e inevitable hambruna llegará después y con un poderoso soplido reducirá la población para ajustarla a la cantidad de alimento disponible en el mundo».

[85] Del poema de G. Chaucer *El parlamento de las aves (1832). (N. del T.)*

[86] Ojalá pudiera creerlo.

[87] Las tradiciones religiosas han identificado la vida con el aliento. «Espíritu» viene de «respirar» en latín. En el Génesis Dios hace primero a Adán y después le da vida soplando en sus narices. La palabra hebrea para decir «alma» es *ruah* o *ruach* (emparentada con *ruh* en árabe), que también significa ‘aliento’, ‘viento’, ‘inspiración’.

[88] El término fue acuñado en 1907 por el filósofo francés Henri Bergson. Siempre he apreciado la deducción irónica de Julian Huxley según la cual los trenes podrían estar propulsados por *élan locomotif.*

[89] Con horripilante fascinación, como si de una picadura o un dolor de muelas se tratase, vuelvo a la encuesta documentada en el Apéndice, que sugiere que el 19% de los británicos no sabe qué es un año y cree que la Tierra orbita en torno al Sol una vez al mes. Incluso entre aquellos que entienden lo que es un año, un gran porcentaje no sabe qué causa las estaciones, presumiendo, con el chovinismo galopante del hemisferio norte, que estamos más cerca del Sol en junio y más lejos en diciembre.

[90] No es una casualidad que Claude Shannon, cuando estaba desarrollando su métrica de «información», que es en sí misma una medida de la improbabilidad estadística, diera exactamente con la misma fórmula matemática que había desarrollado Ludwig Boltzmann para la entropía en el siglo anterior.

[91] Situación circular sin salida posible; el término procede de la novela del mismo nombre escrita por Joseph Heller y publicada en 1961. *(N. del T.)*

[92] Insectos, crustáceos, arañas, centípodos, etc.

[93] Por ejemplo, una mutación en la pata de un miriápodo será reflejada en sus dos laterales, y probablemente también repetida por toda la longitud de su cuerpo. Aunque es una mutación simple, los procesos embrionarios fuerzan a que se repita muchas veces

a izquierda y derecha. Al principio, puede parecer paradójico que una restricción sea capaz de aumentar la versatilidad evolutiva de un clado. La razón se explica en el mismo capítulo de *Escalando el monte improbable*, «Embriones caleidoscópicos».

[94] Semejante al *Nova* de Estados Unidos, que frecuentemente renombra programas de *Horizon* como propios, o llega a acuerdos de coproducción con *Horizon.*

[95] Considero, aun a riesgo de parecer un poco pedante, que debo reconocer que los zoólogos modernos clasifican a los pájaros como dinosaurios supervivientes. Estrictamente hablando, por tanto, la respuesta correcta es «verdadero», y la mayoría turca está en lo correcto. Creo que podemos asumir, sin embargo, que cuando a la gente se le hace una pregunta como esa, piensa que los «dinosaurios» excluyen a los pájaros e incluyen solo a los «terribles lagartos» que dieron lugar a la palabra.

[96] Casi cualquier organización religiosa puede obtener fácilmente la exención de impuestos. Las organizaciones que no son religiosas tienen que pelearse para demostrar que benefician a la humanidad. Recientemente puse en marcha una fundación benéfica dedicada a promover la «Razón y la Ciencia». Durante las prolongadas, extremadamente caras y finalmente exitosas negociaciones para obtener la exención de impuestos, recibí una carta de la Comisión Británica de Beneficencia, con fecha del 28 de septiembre de 2006, que decía lo siguiente: «No está claro cómo el avance de la ciencia beneficia mental y moralmente a la gente. Por favor, proporciónenos pruebas de esto o explíquenos cómo se relaciona con el avance del humanismo y el racionalismo». Por el contrario, se supone que las organizaciones religiosas benefician a la humanidad sin ninguna obligación de demostrarlo, o incluso aparentarlo, si están activamente involucradas en promover la falsedad científica.

Evolución
Richard Dawkins
ISBN edición en papel: 978-84-670-3143-0

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Título original: *The Greatest Show on Earth*
Traducción: Jesús Fabregat

© Richard Dawkins, 2009
All rights reserved

© de la traducción, Jesús Fabregat

© Espasa Libros, S. L. U., 2009
Paseo de Recoletos, 4, 28001 Madrid
www.planetadelibros.com

Espasa, en su deseo de mejorar sus publicaciones, agradecerá cualquier sugerencia que los lectores hagan al departamento editorial por correo electrónico: sugerencias@espasa.es

Primera edición en libro electrónico (epub): julio de 2010

ISBN: 978-84-670-3478-3 (epub)

Conversión a libro electrónico: SAFEKAT, S. L.
www.safekat.com

Índice

Dedicatoria 2
Prólogo 3
1. ¿Solo una teoría? 6
¿Qué es una teoría? ¿Qué es un hecho? 12
2. Perros, vacas y coles 22
La mano muerta de Platón 22
Esculpiendo el acervo genético 28
3. El camino de rosas hacia la macroevolución 44
Los insectos fueron los primeros domesticadores 45
Tú eres mi selección natural 52
Dientes de rata 69
De nuevo los perros 71
De nuevo las flores 77
La naturaleza como agente seleccionador 81
4. Silencio y tiempo lento 83
Los anillos de los árboles 86
Relojes radiactivos 89
Carbono 100
5. Justo delante de nuestros ojos 106
Las lagartijas de Pod Mrcaru 108
Cuarenta y cinco mil generaciones de evolución en el laboratorio 112
Guppies 128
6. ¿El eslabón perdido? ¿Qué significa «perdido»? 138
«¡Mostradme vuestro “coco-pato”!» 145
Creeré en la evolución cuando un mono dé a luz un bebé humano 148
El pernicioso legado de la Gran Cadena del Ser 148
Saliendo del mar 153
Debo volver de nuevo al mar 161
7. ¿Personas perdidas? Ya no lo están 175
Todavía espero malévolamente... 180

Simplemente ve y mira 192
8. Usted misma lo hizo en nueve meses 202
Sin coreógrafo 203
Analogías para el desarrollo 210
Modelando células como estorninos 220
Enzimas 227
Después deben intentarlo los gusanos 234
9. El arca de los continentes 242
¿Cómo nacen las nuevas especies? 243
«A alguien le podría gustar...» 246
¿Se movió la Tierra? 260
10. El árbol del parentesco 272
Hueso con hueso 272
Aquí no se presta 283
Crustáceos 292
¿Qué habría hecho D’Arcy Thompson con un ordenador? 296
Comparaciones moleculares 301
El reloj molecular 316
11. La historia escrita en nosotros 323
Estuvieron orgullosos de sus alas 328
Ojos perdidos 336
Diseño nada inteligente 341
12. Carreras armamentisticas y teodicidad evolutiva 358
La economía solar 358
Corriendo para quedarse en el mismo sitio 363
¿Teodicidad evolutiva? 372
13. Hay grandiosidad en esta visión de la vida 379
«A partir de la guerra de la naturaleza, de la hambruna y la muerte» 379
«El objeto más elevado que somos capaces de concebir» 382
«Habiendo sido alentada originalmente» 383
«En unas pocas formas o en una sola» 388
«Mientras este planeta ha estado girando de acuerdo a la ley fija de 389

la gravedad» 389

«Desde un principio tan simple» 395

«Han evolucionado, y están evolucionando, un sinfín de formas hermosas y maravillosas» 400

Apéndice: Los negadores de la historia 405

Notas 414

Bibliografia 424

Ilustraciones y agradecimientos 437

Secciones en color 448

Notas a pie de página 480

Créditos 494