

¿Por qué la naturaleza no es perfecta?

José Antonio **González Oreja**

Desde 1998, el doctor Íñigo Zuberogoitia estudia la población de halcones peregrinos (*Falco peregrinus*) de Vizcaya, en el País Vasco, norte de España. Utilizando arriesgadas técnicas de escalada en roca, Zuberogoitia y sus colaboradores descienden cada primavera a los nidos de la especie dentro de su área de estudio y analizan así su éxito reproductor, entre otras variables biológicas y ecológicas. Además de dar a conocer los resultados de su trabajo en revistas científicas de reconocido prestigio internacional (véase, por ejemplo, Zuberogoitia *et al.*, 2018), el doctor Zuberogoitia comparte en Facebook muchas de las aventuras, venturas y desventuras ligadas a su trabajo de campo. Así, en mayo de 2022 narró las vicisitudes de cierta pareja de halcones cuyo nido, emplazado en un abrupto acantilado costero, se enfrenta a las borrascas del mar Cantábrico, que dejan fuertes vientos y lluvias. En general, el éxito reproductor de la especie se reduce como consecuencia de estas adversidades meteorológicas.

También en Facebook, el biólogo Juan Manuel Pérez de Ana se preguntaba cómo es posible que los peregrinos y otras especies de aves sigan ubicando sus nidos en emplazamientos como este, que acarrearán bajos valores de éxito reproductor, y que por ello resultan claramente subóptimos. En otras palabras: por qué, después de muchos millones de años de evolución, la selección natural no ha optimizado aún esta característica.

O, en general, por qué la naturaleza no es perfecta.

BREVÍSIMA (E IMPERFECTA) HISTORIA DE LA IDEA DE PERFECCIÓN EN BIOLOGÍA

La creencia de que en la naturaleza existe una tendencia hacia la perfección y el progreso, una idea propia de lo que Mayr (2002) llamó teleología cósmica, puede encontrarse de una u otra forma en muchos pueblos primitivos y en muchas religiones organizadas. Desde la teoría de las formas de Platón (entidades abstractas, más allá del espacio y del tiempo: eternas, inmutables y perfectas), pasando por las series orgánicas de Aristóteles (precursoras de la *scala naturae*, la gran cadena de los seres¹ de la escolástica medieval y el Renacimiento), la idea de que el mundo natural progresa hacia una mayor perfección a través de las leyes de Dios fue incorporada también al pensamiento de la Ilustración.

Al menos en parte, debemos nuestra incómoda familiaridad con esta idea a Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, Caballero de Lamarck (1744-1829), quien a comienzos del siglo XIX desarrolló la que se considera como primera teoría sobre la evolución de la vida. La evolución consiste, según Lamarck, en el origen por generación espontánea de un ser vivo simple e imperfecto, y su gradual transformación en una especie superior y más perfecta. Para Lamarck, podemos ordenar el mundo animal en una serie evolutiva de perfección creciente, según la complejidad de su organización, serie que culmina con el ser humano. Lamarck consideró que la perfección de los animales estaba relacionada con su grado de complejidad y organización, no con su adaptación al medio ambiente, ni con su función en la economía de la naturaleza.

Cuando el conocimiento científico disponible permitió concluir que el mundo no era constante, ni de origen reciente, la teleología cósmica dejó de ser considerada como una explicación “racional” del mundo natural. La ciencia acepta hoy día que no hay ninguna tendencia cósmica hacia el progreso

o la perfección: cualquier cambio o tendencia que se observe en el mundo vivo a lo largo de la historia es el resultado de la acción de las leyes naturales y de la selección natural (Mayr, 2002). Las ideas de Lamarck sobre la evolución transformativa de los seres vivos, que fueron ampliamente aceptadas en su tiempo y perduraron hasta mediados del siglo XIX, comenzaron a caer en el olvido cuando Charles Darwin publicó, en 1859, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (de aquí en adelante, *El origen de las especies*).

La evolución por selección natural ha dado forma a seres vivos que, en muchas ocasiones, parecen estar maravillosamente adaptados a los factores ambientales en los que se desarrollan las diversas fases de sus ciclos de vida. Es más, como criticó Mayr (2002), algunos entusiastas han afirmado que la evolución por selección natural puede lograrlo todo. El propio Darwin observó, metafóricamente, que

[...] la selección natural está buscando cada día y cada hora por todo el mundo las más ligeras variaciones; rechazando las que son malas; conservando y sumando todas las que son buenas; trabajando silenciosa e insensiblemente, cuandoquiera y dondequiera que se ofrece la oportunidad, por el perfeccionamiento de cada ser orgánico en relación con sus condiciones orgánicas e inorgánicas de vida (*El origen de las especies*,² capítulo 4).

Esto no es cierto y, como veremos más adelante, las opciones de las que dispone la selección natural son limitadas. En realidad, Darwin aclaró que

[...] La selección natural no producirá perfección absoluta, ni, hasta donde podemos juzgar, nos encontraremos siempre en la naturaleza con este tipo superior (*El origen de las especies*, capítulo 6).

Así pues, en la naturaleza, la imperfección es la norma. Pero, ¿por qué?, ¿qué razones hacen que los seres vivos no estén perfectamente adaptados



© Emilio Salceda. *Xinacates*. San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.

a los factores ambientales que condicionan sus respuestas biológicas y ecológicas?

AUSENCIA DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA NECESARIA

En la década de 1930, J. B. S. Haldane observó que, aunque contásemos con el suficiente conocimiento y el poder necesario para combinar a capricho los genes disponibles en la especie humana, nunca podríamos obtener de este experimento una raza de ángeles: ya fuera por el carácter moral, ya por las alas, tendríamos que generar artificialmente las mutaciones necesarias, o esperar indefinidamente a que se produjeran de modo natural (Bergstrom y Dugatkin, 2016).

La selección natural es un proceso en dos fases. La primera es la producción de las variantes fenotípicas que existen dentro y entre las poblaciones; y la segunda, la supervivencia y reproducción diferencial de unas variantes frente a otras. Ante el cambio en los factores ambientales, la selección natural podría no acarrear la mejor adaptación posible si es que la diversidad genética necesaria no está disponible en ese momento en el conjunto de alelos de todos los genes de la población (es decir, en su acervo génico). Este puede ser el caso de ciertos grupos de seres vivos actuales, en los que no han evolucionado rasgos adaptativos para ciertos factores ambientales (Futuyma y Kirkpatrick, 2017).

LIMITACIONES PROPIAS DE LA GENÉTICA DE LOS CARACTERES

Aunque la diversidad presente en los acervos génicos de las poblaciones sí permitiera la evolución de caracteres adaptativos, ciertas limitaciones genéticas podrían impedir la evolución de adaptaciones perfectas. Cabe incluir aquí a los genes con efectos pleiotrópicos, cuya expresión afecta a varios caracteres de los seres vivos. Los genes con efectos pleiotrópicos antagonistas resultan de especial relevancia para entender por qué hay adaptaciones imperfectas: bajo ciertas condiciones ambientales, la mutación de uno de estos genes acarreará efectos positivos (es decir, ligados a una ganancia de eficacia biológica), pero negativos (o sea, ligados a una pérdida de eficacia biológica) en condiciones distintas (Bergstrom y Dugatkin, 2016). En nuestra especie, los genes con efectos pleiotrópicos antagonistas desfasados en el tiempo permiten entender, por ejemplo, la evolución de numerosos caracteres deletéreos asociados a la senescencia (Sherratt y Wilkinson, 2009).

Por otro lado, en seres vivos diploides, como nosotros, si un individuo heterocigoto para cierto locus presenta una mayor eficacia biológica que cualquiera de los homocigotos para el mismo



© Emilio Salceda. *Xinacates*. San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.



locus, la evolución por selección natural conducirá a un equilibrio poblacional en el que estarán presentes los tres genotipos posibles. Por lo tanto, en la medida en que ciertos atributos biológicos sigan un modelo como este (es decir, sobredominancia o ventaja del heterocigoto), al menos una fracción de la población va a mostrar un grado de adaptación imperfecto para tales atributos y estará compuesta por individuos subóptimos.

LIMITACIONES PROPIAS DE LA BIOLOGÍA DEL DESARROLLO DE LOS SERES VIVOS

Las limitaciones del desarrollo hacen referencia a sesgos en la generación de variantes fenotípicas que se deben a la composición, la estructura o la dinámica de los sistemas de desarrollo de los seres vivos (Ridley, 2004). Diferentes grupos de seres vivos han evolucionado distintos mecanismos de desarrollo, y el modo de desarrollo de un ser vivo concreto influye sobre la naturaleza de las mutaciones que pueden ocurrir en él, así como sobre las tasas de ocurrencia de tales mutaciones.

Las limitaciones del desarrollo pueden deberse a diferentes razones. A principios del siglo XIX, los estudiosos de la morfología se dieron cuenta de que los diversos componentes de un ser vivo no

son independientes entre sí: durante su desarrollo, cuando responden ante la selección natural, interfieren unos con otros (Mayr, 2002). En general, la estructura y el funcionamiento de los seres vivos son el resultado de numerosos compromisos entre las partes que los constituyen. El desarrollo de una de estas partes (por ejemplo, órganos de un cuerpo) no puede darse de forma aislada del desarrollo de las demás. Más adelante veremos otros ejemplos de compromisos evolutivos que limitan la perfección de las adaptaciones.

LIMITACIONES PROPIAS DE LA HISTORIA FILOGENÉTICA

En general, la evolución por selección natural procede mediante pequeños cambios graduales que resultan adaptativos. La selección natural no puede favorecer respuestas que acarreen pérdida de eficacia biológica en el presente por mucho que puedan implicar ganancias en el futuro. Como puede comprenderse gracias a la metáfora de Sewall Wright sobre el paisaje adaptativo, la selección natural podría dirigir una población hacia un pico adaptativo local, pero no global, en el cual podría permanecer “atrapada” porque los cambios evolutivos pequeños no resultasen adaptativos (Ridley, 2004). Algunas poblaciones naturales podrían estar imperfectamente adaptadas a los factores ambientales actuales (es decir, “maladaptadas”)

como consecuencia de “accidentes” históricos que llevaron a sus ancestros en direcciones evolutivas que más tarde resultaron no ser las óptimas. Es más, en ecología siempre podemos encontrar una escala espacial o temporal a la cual detectar el cambio en los factores ambientales. Por lo tanto, si los factores ambientales no son constantes (y siempre están cambiando, lenta o rápidamente), entonces el paisaje adaptativo cambia, y los seres vivos del presente podrían estar adaptados a los factores ambientales del pasado. Más adelante hablaremos de cómo los desfases temporales entre los cambios ambientales y la selección natural limitan la perfección de las adaptaciones.

COMPROMISOS³ EVOLUTIVOS ENTRE DISTINTAS NECESIDADES ADAPTATIVAS

Muchos caracteres de los seres vivos cumplen varias funciones y sus adaptaciones son el resultado de un compromiso evolutivo entre unas y otras. Si consideramos los caracteres por separado, de forma aislada, como si fueran el resultado de la evolución por selección natural para cumplir solo una función, es posible que aparezcan como una adaptación imperfecta.

En general, no es posible optimizar a la vez la asignación de recursos (por ejemplo, energía, tiempo) destinados a la supervivencia del individuo vs. la reproducción. Como otro ejemplo, cuando los recursos son limitados, una planta podría destinar más nutrientes a producir un mayor número de semillas, pero solo reduciendo el tamaño de las mismas, o de otras partes de su estructura (Futuyma y Kirkpatrick, 2017). Los seres vivos son, en realidad, complejos mosaicos de compromisos evolutivos y, como ya hemos visto, no hay nada gratis, todo tiene un precio... aunque pueda estar inicialmente oculto (Dawkins, 2009).

AUSENCIA DE RESPUESTA EN CARACTERES QUE SE EXPRESAN DESPUÉS DE LA REPRODUCCIÓN

Aunque ciertos caracteres impliquen pérdida de eficacia biológica y provoquen una adaptación

imperfecta, la selección natural no puede actuar en su contra si se expresan después de la reproducción (es decir, cuando ya se han transmitido a la descendencia; Mayr, 2002). Es el caso de numerosas características genéticas que acarrearán pérdida de eficacia biológica, como la enfermedad de Alzheimer o el mal de Parkinson, y que generalmente se presentan en los seres humanos en edades posreproductivas (Sherratt y Wilkinson, 2009).

DEFASAS TEMPORALES ENTRE LOS CAMBIOS AMBIENTALES Y LA ACCIÓN DE LA SELECCIÓN NATURAL

Las adaptaciones que muestran los seres vivos pueden ser imperfectas debido a desfases temporales entre los cambios en los factores ambientales y la respuesta de la selección natural (Ridley, 2004). En general, las condiciones ambientales y los recursos naturales que configuran el medio ambiente de los seres vivos pueden variar en el espacio y en el tiempo de forma rápida, incluso brusca; pero el cambio en la frecuencia de los caracteres adaptativos en el seno de las poblaciones, resultado de la selección natural, es más lento y requiere de más tiempo. Este desfase temporal entre uno y otro tipo de cambio (o sea, ambiental vs. evolutivo) contribuye a entender la existencia de adaptaciones imperfectas.

PLASTICIDAD FENOTÍPICA

La capacidad que tiene un genotipo de expresarse en distintos fenotipos (es decir, conjuntos de caracteres biológicos observables) ante una misma condición ambiental se denomina plasticidad fenotípica, y la relación flexible que se establece entre el fenotipo y el conjunto de condiciones ambientales se conoce como norma de reacción. En general, cuanto más plástico sea un fenotipo (es decir, cuanto más amplia y diversa sea su norma de reacción), mayor será su independencia evolutiva frente a la selección natural (Mayr, 2002). Esta capacidad de modificación no genética del fenotipo es en sí un carácter biológico, y por lo tanto

está sujeto a la acción de la selección natural. Pero, como ocurre con cualquier otro atributo o rasgo biológico, también puede acarrear adaptaciones imperfectas (Mills *et al.*, 2013). Para más información sobre la relevancia evolutiva de la plasticidad fenotípica, véase Pfennig (2022).

FENÓMENOS ALEATORIOS

Una parte de las características biológicas que generan diferencias en la supervivencia y la reproducción entre los individuos de una población, y entre poblaciones diferentes, puede no ser el resultado de la selección natural, sino del mero azar. En numerosas fases de la reproducción de seres vivos diploides, como nosotros, hay fenómenos aleatorios. Estos van desde la formación de gametos haploides que, como resultado del sobrecruzamiento durante la meiosis, dan lugar a nuevas combinaciones de los genes presentes en los cromosomas parentales, hasta la formación de cigotos diploides que integran, al azar, información genética de ciertos gametos, pero no de otros.

Recordemos la anécdota (quizás apócrifa) según la cual, cuando se conocieron, Marilyn Monroe preguntó a Albert Einstein: “¿Qué dice, profesor, deberíamos casarnos y tener un hijo juntos? ¿Se imagina un bebé con mi belleza y su inteligencia?”. A lo que Einstein, esbozando una sonrisa, contestó: “Desafortunadamente, me temo que el experimento salga a la inversa y terminemos con un hijo con mi belleza y con su inteligencia”.

Combinaciones genéticas que darían lugar a caracteres favorables ante la selección natural pueden ser eliminadas de forma indiscriminada por accidentes ambientales. El hecho de que se hayan extinguido la inmensa mayoría de las formas vivas que alguna vez han habitado la Tierra ilustra que la evolución de la vida no implica un progreso constante hacia una perfección cada vez mayor.

Más bien, la evolución es un proceso en gran parte impredecible, en el que incluso los seres vivos mejor adaptados a su medio ambiente pueden



© Emilio Salceda. *Xinacates*.
San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.

ser bruscamente eliminados por una catástrofe (Mayr, 2002).

LAS REGLAS DEL JUEGO SON INVOLABLES

La evolución por selección natural ha generado incontables maravillas, características biológicas de todo tipo *casí* perfectas en el desarrollo de su función. Pero, en última instancia, el grado de perfección está limitado por las leyes de la física y de la química, que gobiernan el comportamiento de los materiales con los que se construyen las adaptaciones de los seres vivos. En este sentido, la selección natural está sometida a las mismas limitaciones a las que se enfrentan los ingenieros en el mundo de las construcciones humanas.

Son bien conocidas las limitaciones que impone el tamaño corporal sobre numerosas características biológicas y ecológicas de los seres vivos. Matemáticamente, las leyes que gobiernan las relaciones entre estas características y el tamaño corporal suelen ser de tipo exponencial, y dan lugar a funciones que se conocen como alométricas (Villar *et al.*, 2012). La comprensión de estas funciones alométricas nos permite responder a preguntas tan interesantes como la siguiente: ¿Por qué no hay, en la naturaleza, animales del tamaño de un elefante... pero con extremidades alargadas, delgadas y frágiles como las de un opilión? Curiosamente,



© Emilio Salceda. *Xinacates*.
San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.

la imaginación de Salvador Dalí dio forma a estos seres en *La tentación de San Antonio* (1946), aunque para ello tuviera que violar (probablemente de forma inconsciente) las leyes de escala que se relacionan con el tamaño corporal (Bergstrom y Dugatkin, 2016).

COLOFÓN: LA “TALACHA” EVOLUTIVA

La teoría de la evolución por selección natural nos permite entender el hecho de que los seres vivos estén razonablemente bien adaptados a su medio ambiente. Pero la abundancia de caracteres subóptimos en la naturaleza sugiere que la evolución se ha desarrollado sin ningún plan maestro dirigido a la perfección, como me gusta aclarar a mis alumnos de Evolución.

Hemos visto que hay muchas razones, y muy diversas, por las cuales la selección natural no conduce a la perfección. A modo de resumen: las adaptaciones están limitadas por la materia prima disponible (*De donde no hay, no se puede sacar*), así como por las relaciones entre el genotipo y el fenotipo, gobernadas por su eficacia biológica. Además, la biología del desarrollo condiciona los tipos de mutaciones posibles, y sus tasas, en los distintos grupos de seres vivos. La historia filogenética también deja su impronta en las adaptaciones (*Atrapa-do por su pasado*).

En realidad, los seres vivos son mosaicos de adaptaciones, y en general no es posible optimizar a la vez unos y otros caracteres: siempre hay costes, aunque estén ocultos (*No hay café gratis*). Si los caracteres deletéreos se expresan después de la reproducción, entonces la selección natural es incapaz de mejorar el diseño de los seres vivos.

En cualquier caso, los cambios ambientales suelen ser (mucho) más rápidos que la evolución por selección natural, lo que acarrea un mal ajuste de los seres vivos a su medio ambiente (o sea, “maladaptación”). A lo anterior hay que añadir los efectos de la modificación no genética del fenotipo propia de la plasticidad fenotípica, y de los fenómenos aleatorios, que no están ligados a las diferencias en eficacia biológica (*Cuestión de suerte*). En fin, las adaptaciones solo son posibles si se respetan las leyes de la física y de la química, lo que explica la inexistencia de muchos caracteres imaginables (*Por encima de la ley, nadie*).

Como explicó magistralmente Jacob (1977), la evolución por selección natural no actúa como, en buena lógica, podríamos esperar de un ingeniero cabal: buscando de antemano alcanzar la perfección mediante un diseño óptimo, que no deja nada al azar. Más bien, la selección natural se comporta, metafóricamente, como un zapatero remendón: aprovechando como buenamente puede los recursos de los que ya dispone en ese momento, aunque no sean los mejores.

En este sentido, me gusta pensar en la selección natural como la “talacha” evolutiva.

NOTAS

¹ La gran cadena de los seres fue bellamente ilustrada, entre otros, por Fray Diego de Valadés en su *Rethorica Christiana* (1579). Fray Diego, natural de Tlaxcala, México, fue un misionero franciscano, historiador y políglota de la Nueva España, que se desempeñó también como dibujante y grabador.

² Las citas textuales en español son de la traducción de Antonio de Zulueta (1921) a la primera edición de *On the Origin of Species*. Disponible en internet, por ejemplo, en la Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes: <https://www.cervantesvirtual.com/obra/el-origen-de-las-especies-por-medio-de-la-seleccion-natural--0/>.



© Emilio Salceda. *Xinacates*. San Nicolás de los Ranchos, Puebla, 2017.

³ En inglés, se suele presentar la sigla TANSTAAFL para hacer referencia a la frase *There ain't no such thing as a free lunch*, popularizada en la novela de ciencia ficción *The Moon Is a Harsh Mistress*, de Robert A. Heinlein (1966). Milton Friedman, Premio Nobel de Economía (1976), también la utilizó frecuentemente, así como su versión en latín: *Nunquam prandium liberum*. Traducida literalmente, significa: "No hay tal cosa como un almuerzo gratis", y más coloquialmente podemos identificarla con "No hay café gratis", o "Nadie regala nada". Es decir, siempre hay costos ocultos. También en evolución.

R E F E R E N C I A S

- Bergstrom CT and Dugatkin LA (2016). *Evolution*. Second Edition. New York: Norton.
- Dawkins R (2009). *The Greatest Show on Earth: The Evidence for Evolution*. New York: Free Press.
- Futuyma DJ and Kirkpatrick M (2017). *Evolution*. Fourth Edition. Sunderland: Sinauer.
- Jacob F (1977). Evolution and tinkering. *Science*, 196 (4295):1161-1166.
- Mayr E (2002). *What Evolution Is*. London: Phoenix.
- Mills SL, Zimova M, Oyler J, Running S, Abatzoglou JT and Lukacs P (2013). Camouflage mismatch in seasonal coat color due to decreased snow duration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(18):7360-7365.
- Pfennig SW (2022). Evolution and the flexible organism. *American Scientist*, 110:94-101.
- Ridley M (2004). *Evolution*. Third Edition. Malden: Blackwell.
- Sherratt TN and Wilkinson DM (2009). *Big Questions in Ecology and Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Villa R, López C y Cussó F (2012). *Fundamentos Físicos de los Procesos Biológicos. Vol. 1. Biomecánica y Leyes de Escala*. San Vicente: Club Universitario.
- Zuberogoitia I, Morant J, Castillo I, Martínez JE, Burgos G, Zuberogoitia J, Azkona A, Ruíz Guijarro J and González Oreja JA (2018). Population trends of Peregrine Falcon in Northern Spain-Results of a long-term monitoring project. *Ornis Hungarica*, 26(2):51-68.

José Antonio González Oreja
Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
jgonzorj@hotmail.com