

Termodinámica de la locomoción animal

Pese a parecer movimientos distintos, la carrera, el vuelo y la natación podrían compartir principios físicos

Adrian Bejan y James H. Marden

Stephen Jay Gould afirmaba que, si el reloj de la evolución diera marcha atrás y comenzara de nuevo su andadura hasta el presente, los animales que nos encontraríamos en la Tierra serían distintos de los que conocemos hoy día. El azar, proponía el paleontólogo, ha influido de forma notable en la determinación de los organismos que han sobrevivido y evolucionado en el curso de la historia del planeta. Pero aunque ello fuera cierto, quizás existan algunos límites, algunas reglas generales de diseño que rijan para toda forma animal. Bajo la teoría de la selección natural subyace la hipótesis de que algunos diseños son mejores que otros. Pero, ¿qué les hace ser mejores? ¿Hay reglas generales que lo determinen?

La biología podría tomar prestadas de la ingeniería algunas ideas sobre la cuestión. En concreto, de la termodinámica. Uno de los objetivos básicos de cualquier diseño, de un animal, de un edificio o de una máquina, consiste en obtener las máximas prestaciones con la mínima inversión energética. Tamaña optimización del diseño se observa, por ejemplo, en las formas arborescentes de las cuencas fluviales, la estructura de los bronquios o los motivos geométricos de las fracturas que crea el barro al secarse; en la forma tubular de las cañerías, o en la proporcionalidad entre la profundidad y la altura que se da en la sección transversal de los ríos. Todas estas configuraciones logran el máximo caudal de materia con la mínima pérdida por resistencia.

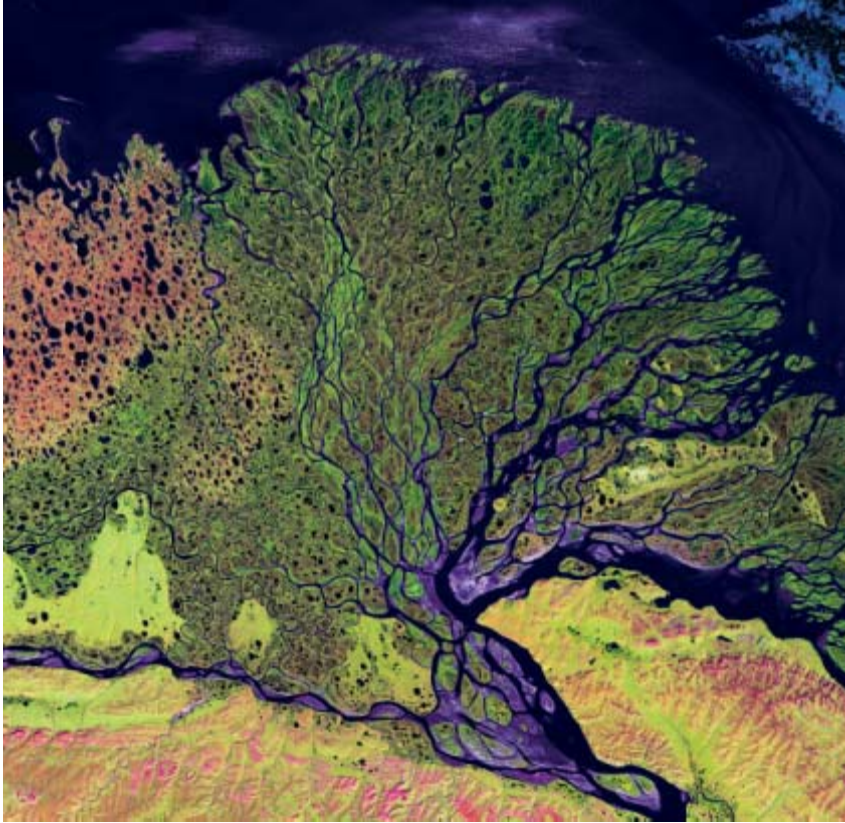
Por tanto, la mejora progresiva del acceso al flujo constituye un mecanismo de configuración de los sistemas

naturales de flujos, animados e inanimados. A partir de esta idea, uno de los autores (Bejan) ha desarrollado la *teoría constructural*. De acuerdo con ella, para que un sistema de tamaño finito persista en el tiempo, debe evolucionar en el sentido de proporcionar un acceso cada vez más expedito a las corrientes que fluyen a través del mismo.

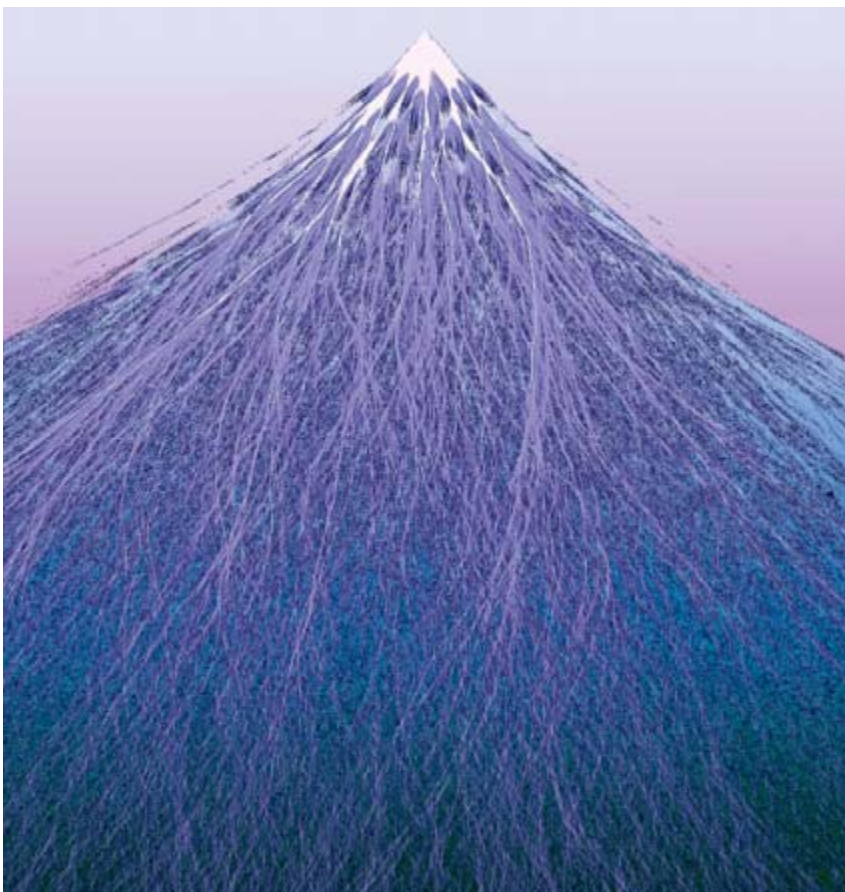
Un flujo corresponde a un equilibrio de áreas con resistencias grandes y pequeñas. Se logra mediante una distribución óptima de las imperfecciones, de forma que el mayor número posible de puntos del área se someta a un esfuerzo tan igualado como se pueda. Para obtener ese equilibrio óptimo de las resistencias, el material debe adoptar ciertas distribuciones. Así, la cuenca de un río se configura y reconfigura de modo que el agua

1. VUELO, CARRERA Y NATACION son las tres formas de locomoción que la naturaleza ha resuelto en el curso de la evolución. Si la evolución comenzara de nuevo desde el principio, nada nos asegura que esas especies reaparecieran, fruto de la selección natural. Pero sí cabe la posibilidad de que hubiera reglas generales de diseño que siguieran rigiendo el desarrollo animal, en la hipótesis de que todos los mecanismos de locomoción reiniciarán su evolución. Desde el punto de vista termodinámico, la locomoción corresponde a un flujo de masa de un lugar a otro. Lo mismo que otros sistemas de flujo, el movimiento se optimiza de suerte tal, que la masa del animal se mueve a la mayor distancia posible con el mínimo gasto energético. De estas pautas básicas derivan fórmulas que describen los diversos tipos de movimiento.





2. SEGUN LA TEORIA CONSTRUCCIONAL, para que un sistema de tamaño finito subsista en el tiempo, debe evolucionar y, por ende, facilitar, de forma progresiva, el paso de las corrientes que fluyen a través de él. Existe una optimización de este tipo que se observa en numerosos sistemas: la forma arborescente. Constituye a menudo la configuración que proporciona un acceso más expedito entre un número infinito de puntos y una fuente. Una imagen en falso color tomada desde un satélite muestra el delta del río Lena, en Rusia (*arriba*), que adopta una forma de abanico similar a la de ciertos tipos de coral. Una simulación informática del flujo de los electrones a través de un paisaje bidimensional de potencial eléctrico variable (*abajo*) recuerda el rastro que deja la nieve al fundirse, siguiendo las trayectorias de mínima resistencia por la falda de las montañas.



acabe por descargarse con la mínima resistencia por la desembocadura. La forma arborescente de un río antiguo constituye la configuración que proporciona el acceso más expedito desde un número infinito de puntos (la cuenca de drenaje) hasta otro punto (la desembocadura).

La optimización corresponde a una idea que viene de lejos y a un fenómeno natural todavía más antiguo. Nuestra contribución consistió en refinar su estudio hasta reducirla a un principio. Podría haberse conseguido medio siglo atrás. Sin embargo, la física moderna se atuvo a la norma de que todas las cosas se construyen a partir de la suma de efectos locales infinitesimales, como ocurre en la física de partículas. La teoría construccional supone un salto en la dirección opuesta: una forma de racionalizar características, objetivos y comportamientos macroscópicos.

El flujo de los animales

Si bien puede parecer una idea ingenua, la teoría construccional se extiende más allá del dominio de la física. En el ámbito de la biología, la locomoción vendría a ser un flujo de masa de un lugar a otro. Los animales se mueven por la superficie de la Tierra lo mismo que los ríos, los vientos y las corrientes oceánicas. Buscan y encuentran trayectorias y ritmos que les permiten desplazar su masa a la mayor distancia posible, dado un cierto gasto energético, a la vez que minimizan el rozamiento y otras imperfecciones termodinámicas.

Los animales recurren a formas de locomoción diversas según el propósito, pero el uso eficiente de la energía resulta capital a lo largo de toda su vida. El diseño básico de la mayoría de los animales debería evolucionar hacia sistemas de locomoción que optimizaran la relación entre distancia y gasto energético.

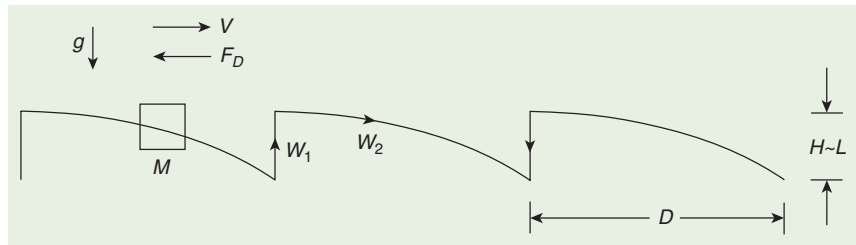
Se han acometido numerosos estudios sobre locomoción. En su mayoría, se desarrollaron a partir de datos empíricos; los modelos se reelaboran hasta encontrar el que cuadra con los resultados de las observaciones experimentales. Muy otro es el enfoque de la teoría construccional; parte de teorías basadas en conceptos físicos para deducir y predecir estructuras y funciones. No sólo determina la velocidad de alcance máximo, sino

que, además, pronostica la frecuencia de paso o de batido y la generación neta de fuerza.

Esta teoría no pretende dar cuenta de todo el abanico de formas biológicas. No sostiene que los animales deban comportarse o adquirir cierta complejidad de manera predecible, sino sólo que en una amplia gama de tamaños y especies deberían aflorar tendencias centrales. Con frecuencia los factores ecológicos favorecerán formas de locomoción distintas de las que optimizan la distancia recorrida por gasto energético; ello ocurre, por ejemplo, cuando abunda la energía y es alto el riesgo de ser capturado por un predador ágil. También la historia evolutiva y la naturaleza errática de las mutaciones determinan la diversidad de rasgos sobre los que opera la selección. Estos y otros factores tienen como primera consecuencia el incremento de la variación en torno a las tendencias centrales predichas.

Se creía que existían diferencias intrínsecas entre los principales tipos de locomoción: carrera, vuelo y natación. Los animales que corren y los que vuelan sienten su peso, mientras que los que nadan experimentan una flotabilidad neutra. Las alas de las aves presentan diferencias estructurales con las patas de los tetrápodos y las aletas de los peces. Las alas batientes divergen de las patas que trotan y del cuerpo cimbreado de un pez. Aves y peces, en su marcha habitual, se mantienen a una altura y profundidad constantes, mientras que al correr los animales saltan sin cesar, describiendo una trayectoria cicloidal. Dar un paso mediante la propulsión contra el suelo no se parece en nada a sentir el roce del aire o del agua. Para complicar las cosas, existe una amplia gradación de tamaños corporales, formas y velocidades, incluso dentro de la misma forma de locomoción (entre las aves voladoras y los insectos, por ejemplo).

A pesar de todas estas diferencias, se han encontrado convergencias notables en ciertas características funcionales de animales corredores, voladores y nadadores. La frecuencia del trote de los vertebrados mantiene aproximadamente la misma relación con la masa corporal (M) que la frecuencia natatoria de los peces: a saber, $M^{-0.17}$. La velocidad de carrera de los animales corredores mantiene



3. ESQUEMA DE LA TRAYECTORIA PERIODICA de un animal volador. Muestra los factores que la teoría construccional considera para describir la locomoción animal.

Aparece un patrón en dientes de sierra porque la velocidad de vuelo (V) resulta de dos trabajos que se realizan de forma alternativa: uno para vencer la pérdida vertical (W_1) y otro para vencer la pérdida horizontal (W_2). W_1 se calcula multiplicando la masa del ave (M) por la gravedad (g) y por la altura que pierde en cada ciclo (H), siendo esta última proporcional a la longitud del cuerpo (L). W_2 corresponde al producto de la fuerza de rozamiento con el aire (F_D) por la distancia recorrida en cada ciclo (D).

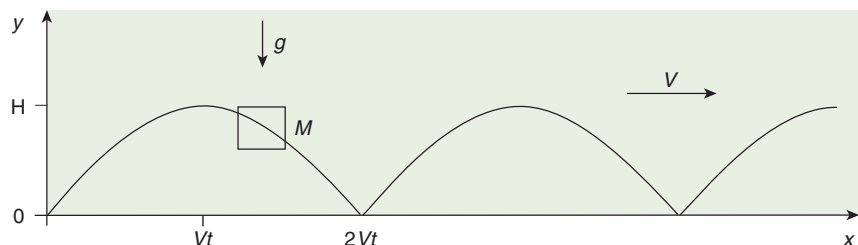
aproximadamente la misma relación con la masa corporal que la velocidad del vuelo de las aves: $M^{0.17}$. La fuerza generada por los músculos de los animales al correr, volar o nadar se ajusta, con escasas variaciones, a unos 60 newton por kilogramo. Se dan otras correlaciones: por ejemplo, entre el tamaño corporal y la frecuencia respiratoria.

Al intentar explicar estas peculiaridades del diseño animal, los biólogos se han centrado en factores restrictivos comunes (la velocidad de la contracción muscular, los límites mecánicos de las estructuras, etcétera). La teoría construccional, en cambio, adopta otro enfoque: no parte de restricciones, sino que define unos objetivos generales de diseño de los que se deducen principios que los sistemas de locomoción optimizados deben cumplir. Al poner de manifiesto los parámetros físicos subyacentes comunes, la teoría construccional unifica todas las formas de locomoción

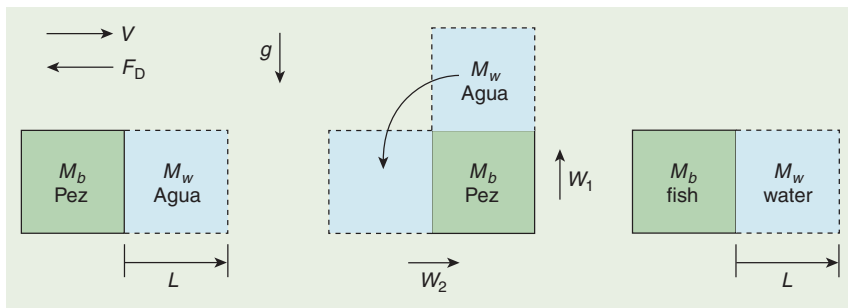
aludidas. Esta teoría no se excluye mutuamente con otras hipótesis, como ocurre con la de las restricciones comunes; antes bien, proporciona normas para el diseño y explica la naturaleza de tales restricciones. Predice, explica y organiza todo un cuerpo de conocimientos empíricos mediante la reunión, en una teoría, de las velocidades de crucero, las frecuencias y la generación de fuerza en la carrera, el vuelo y la natación.

El vuelo

En el vuelo, el pájaro debe afrontar dos gastos energéticos. Por un lado, la pérdida vertical: el cuerpo pesa, por ello cae y el ave debe realizar un trabajo para sustentarse y mantenerse a una cierta altitud de crucero. Por otro, la pérdida horizontal: el ave realiza un trabajo para avanzar venciendo la resistencia del aire. Ambos trabajos se necesitan para volar; ninguno puede sortearse del todo. Sin embargo, pueden equilibrarse



4. TRAYECTORIA PERIODICA DE UN ANIMAL A LA CARRERA. La distancia de cada zancada es un múltiplo del producto de la velocidad del animal (V) por el tiempo (t) de caída libre desde la altura de la zancada (H). En consecuencia, t equivale al cociente entre H y la gravedad (g), elevado a 1/2. La longitud de la zancada y H son proporcionales a la longitud del cuerpo; la masa (M) se aproxima a la densidad corporal multiplicada por la longitud corporal al cubo.



5. PARA AVANZAR EN DIRECCION HORIZONTAL, un pez debe desalojar el agua de su camino. Sólo puede hacerlo hacia arriba. A fin de avanzar una distancia igual a su longitud corporal (L) a determinada velocidad (V), un pez con masa M_b debe desalojar una masa de agua equivalente (M_a). Imaginemos que esta masa de agua regresa luego hacia abajo para rellenar el espacio que deja el pez tras de sí. El trabajo requerido para desplazar hacia arriba la masa de agua (W_1) se aproxima al producto de M_b por L y por la gravedad (g). Durante el mismo intervalo, el pez debe realizar un trabajo para progresar horizontalmente (W_2), proporcional a la resistencia del agua (F_D) y a la distancia recorrida en cada ciclo, que en este caso es la longitud corporal (L).

entre sí de forma que la suma sea mínima. Esta distribución óptima de la inversión energética determina el propio vuelo.

El vuelo no consiste en un movimiento estacionario a una altitud constante. La trayectoria define una línea horizontal quebrada, con un tamaño de los dientes de sierra dictado por el batido de las alas. Corresponde a un ritmo optimizado en el que el trabajo realizado para recobrar altura se armoniza con el trabajo necesario para hacer avanzar el cuerpo en dirección horizontal. Dos tendencias opuestas configuran este equilibrio: conforme aumenta la velocidad de vuelo, decrece la pérdida vertical y aumenta la horizontal. El equilibrio se alcanza batiendo las

alas de modo que la velocidad de vuelo sea la adecuada. A partir de estos parámetros, la teoría construccional predice que las velocidades de vuelo deberían distribuirse de forma proporcional a la masa del pájaro elevada a la potencia 0,17. Las frecuencias de batido de las alas deberían ser proporcionales a la masa elevada a $-0,17$. Estas predicciones concuerdan con las observaciones realizadas en toda la gama de cuerpos voladores.

Esta expresión se deduce de forma algebraica mediante un proceso que conlleva numerosas sustituciones de términos por fórmulas equivalentes. Para simplificar, se eliminan todas las constantes dentro del orden de magnitud de la unidad (entre 0,1 y 10).

Veamos cómo llegamos a esa expresión para la velocidad. En primer lugar, consideramos que la teoría construccional requiere la minimización de las pérdidas energéticas totales para una distancia recorrida. La distancia corresponde a la velocidad multiplicada por el tiempo; el tiempo equivale a la distancia que el cuerpo cae bajo la atracción gravitatoria elevada a la potencia $1/2$. La distancia a la que cae el cuerpo guarda proporción con la longitud del cuerpo o su altura, que a su vez es igual al cociente entre la masa y la densidad del cuerpo, elevado a $1/3$. Se tomó una densidad de 1000 kilogramos por metro cúbico para todos los animales. Las pérdidas horizontales dependen en gran medida del rozamiento con el aire, que a su vez depende de la densidad del aire, cuyo valor se aproximó a un kilogramo por metro cúbico.

El cálculo de la velocidad óptima a partir de todos estos factores lleva a una fórmula donde la única variable es la masa corporal: $M^{0,17}$. De modo similar, hemos demostrado que la fuerza neta que genera un animal para moverse a su velocidad óptima es un múltiplo —típicamente el doble— de su masa.

La carrera

Si se considera la carrera de la misma manera que el vuelo —es decir, como un movimiento intermitente optimizado en el campo gravitatorio terrestre—, se predicen también la velocidad y la frecuencia de trote de todos los animales corredores.



6. UNA TRUCHA NADA LENTAMENTE hacia adelante en una corriente suave. Un sedal la mantiene cerca de la superficie. Se observa la elevación de la superficie acuosa debida al movimiento de avance del pez. Esta elevación se revela en un arco que se

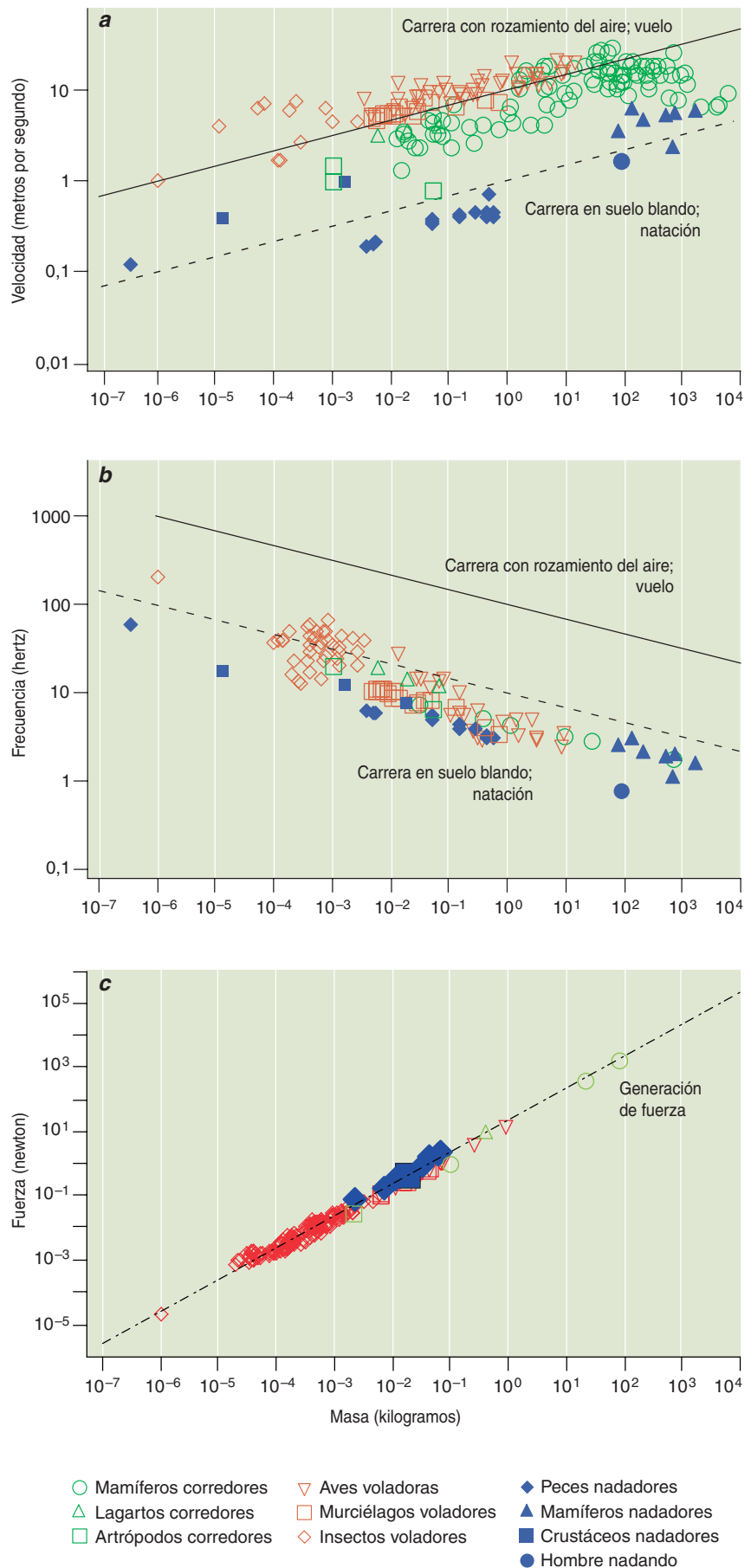


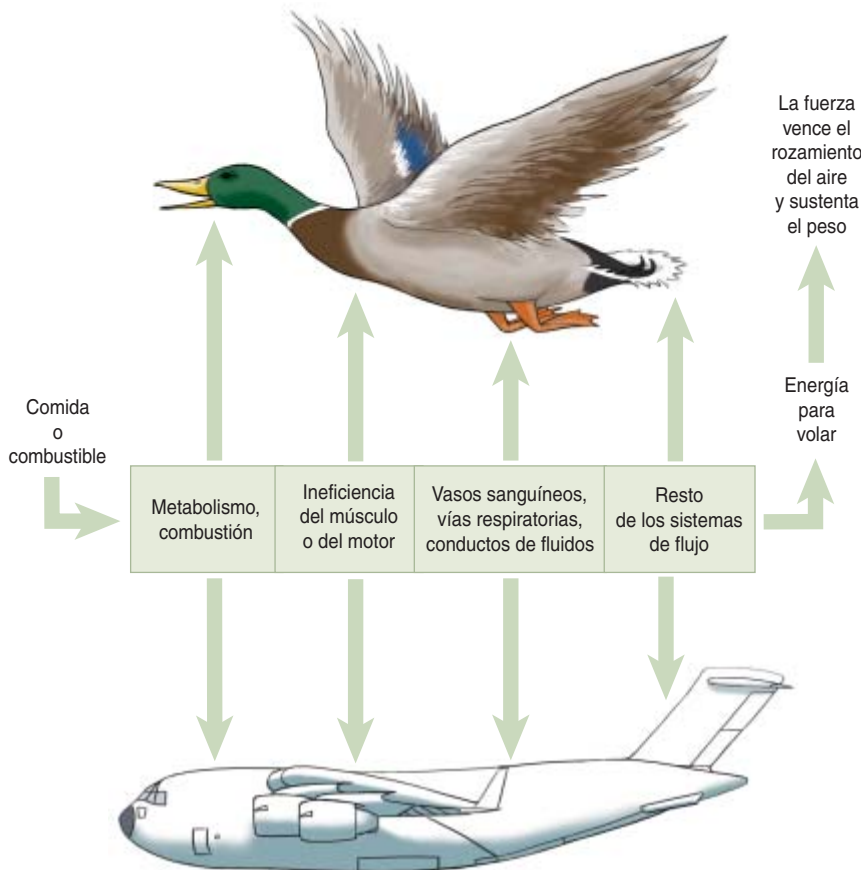
forma delante del vertebrado. Cuando éste se mueve a mayor profundidad, el desplazamiento vertical del agua debido a la natación se reparte en una superficie mayor, lo que dificulta su percepción.

La carrera consta de una sucesión de ciclos que comportan dos pérdidas energéticas. Una proviene de elevar el peso del cuerpo a cierta altura, que se toma como la longitud del cuerpo (alrededor de la longitud de los miembros); este trabajo corresponde a la pérdida vertical, porque, cuando el cuerpo toca de nuevo el suelo, la energía potencial gravitatoria se pierde en las patas y la tierra. (Por mor de simplificación se desprecia el almacenamiento elástico durante la fase de contacto con el suelo.) La otra pérdida es la horizontal: el trabajo que se realiza para vencer el rozamiento contra el suelo, contra el aire circundante y el rozamiento interno entre las distintas partes del animal (de nuevo, para simplificar, se considera externa toda la fricción).

Las pérdidas horizontal y vertical compiten entre sí; cuando se equilibran, la suma es mínima. El movimiento intermitente optimizado que corresponde a la carrera se caracteriza, asimismo, por una velocidad proporcional a $M^{0,17}$ y una frecuencia de zancada proporcional a $M^{-0,17}$ (ambas expresiones se obtienen por

7. COMPARACION de las predicciones de la teoría construccional con los datos experimentales para la velocidad, la frecuencia de zancada o de batido y la generación de fuerza, en diversas especies. Las líneas continuas en estos gráficos logarítmicos representan los valores teóricos para la velocidad (a) o la frecuencia (b), calculados a partir de la masa de animales voladores o de animales corredores allí donde el suelo es duro y, por tanto, la principal pérdida por rozamiento se debe a la fricción del aire. Las líneas de trazos corresponden a las predicciones para la velocidad (a) o la frecuencia (b) calculadas a partir de la masa de animales nadadores o de animales corredores que se mueven sobre suelo blando, caso en que la principal pérdida por rozamiento se debe a la deformación del suelo. La línea discontinua de trazos y puntos representa la generación de fuerza predicha a partir de la masa del animal (c). En las predicciones teóricas se desprecian constantes comprendidas entre 0,1 y 10, por lo que es de esperar una precisión de un orden de magnitud.





8. DURANTE EL VUELO se gasta toda la energía útil comunicada al sistema: se distribuye en componentes que desempeñan funciones equivalentes en animales y aparatos. La teoría construccional predice que todas las estructuras de sistemas de flujos resultan de un punto medio entre dos objetivos opuestos: llevar sustancias desde el centro hasta la periferia y evitar las fugas de estas sustancias y de energía (como el calor) al medio. El propósito final de la comida o del combustible ingerido por un ave o un aeroplano consiste en proporcionar energía para el vuelo, que debe vencer el rozamiento del aire y sustentar en el aire al animal o al aparato. Entre la entrada de combustible y el rendimiento energético de salida, la energía se va perdiendo a través de diversos sistemas de flujo.

un procedimiento similar al descrito a propósito del vuelo).

De este modelo de la carrera se derivan predicciones robustas. La pérdida horizontal puede estar dominada por la fricción seca contra una sustancia dura, la deformación permanente de una sustancia blanda como la arena, el barro o la nieve, o la resistencia del aire. Todos estos efectos repercuten en la velocidad y la frecuencia; e influyen más o menos por igual. Si la resistencia del aire es el mecanismo dominante de la pérdida horizontal, la velocidad y la frecuencia se desvían en sólo un factor de 10 de lo que sucede si el animal debe vencer una fricción seca y la deformación del suelo.

El cálculo del trabajo empleado en levantar del suelo el cuerpo de-

paró otra sorpresa. Para los animales corredores y los voladores, la fuerza promedio que se ejerce en una zancada o en un batido de alas debería ser el doble de su peso. Esto concuerda con las mediciones de la relación entre fuerza y peso en todos los tamaños corporales, para los animales que vuelan y corren. Así pues, en cuanto a movimiento intermitente optimizado, la carrera guarda semejanza con el vuelo.

La natación

¿Opera la natación como la carrera y el vuelo? La respuesta obvia es que no, pues los movimientos de los cuerpos con flotabilidad neutra no parecen tener nada que ver con la gravedad. Este enfoque ha impedido, hasta la fecha, el desarrollo de una

teoría física de la locomoción que incluyera la natación.

La razón por la que correr no es tan distinto de nadar o volar (a pesar de que los animales acuáticos o voladores no toquen tierra) es que el suelo soporta el peso de todo cuerpo que se encuentre sobre él. Sirve también el suelo de referencia respecto a la que se impulsan todos los cuerpos en movimiento; sin él no habría locomoción posible.

En la natación, con un fondo enorme y estacionario de masa acuática, el pez se propulsa y mueve su cuerpo con relación al suelo mediante la realización de un trabajo contra la gravedad y el rozamiento, lo mismo que un ave o un antílope.

Para avanzar en dirección horizontal una distancia igual a la longitud de su cuerpo, un animal acuático debe realizar un trabajo equivalente al que se requiere para elevar una porción de agua de su mismo tamaño hasta una altura aproximadamente igual a la longitud de su cuerpo. Esta masa de agua debe elevarse porque la única forma que tiene el líquido de fluir en torno al animal, o alrededor de cualquier objeto, es mediante un desplazamiento vertical neto. El agua es incompresible; el terreno bajo el agua inmóvil. Sólo la superficie libre es deformable. Lo observamos en la onda generada ante un cuerpo que se mueve cerca de la superficie del agua; sin embargo, hasta ahora se ignoraba que ese trabajo vertical fuera decisivo para la física de la natación a cualquier profundidad.

¿Por qué no se percibe tal deformación de la superficie libre que causa cualquier pez al levantar el agua sobre sí mismo para desplazarse en dirección horizontal? Porque, en su mayoría, se trata de peces pequeños que nadan en las profundidades. El agua elevada corresponde al volumen desplazado por la superficie libre en su ascenso por una zona extensa, tanto mayor cuanto mayor sea la profundidad de natación. La elevación del agua resulta visible sólo cuando hablamos de un pez grande que nada cerca de la superficie. El fenómeno de la elevación de la superficie acuosa se conoce y emplea en la guerra naval. Ciertos sistemas de radar detectan los submarinos en movimiento merced a la alteración de

la superficie del agua que producen al andar.

La teoría construccional explica así la natación. Sus predicciones para la velocidad y la frecuencia de batido son las mismas que para la carrera sobre un terreno deformable; concuerdan con gran cantidad de datos experimentales.

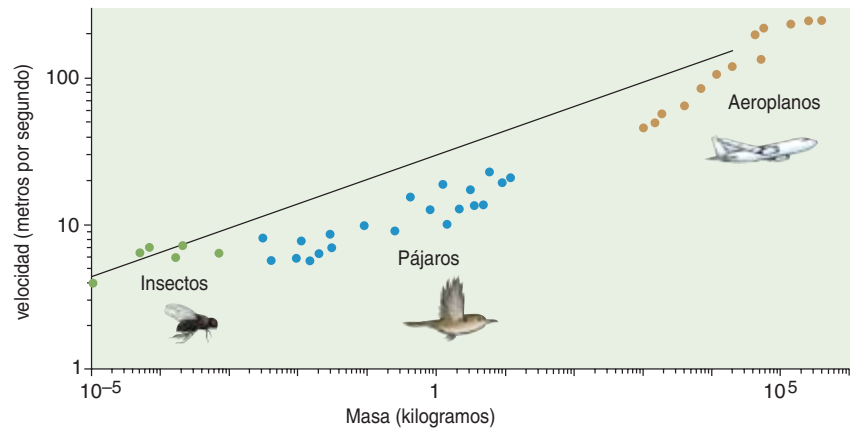
Por consiguiente, aunque algunos animales ni siquiera tocan el suelo, del mismo se sirven para autopropulsarse. El batido de las alas de los pájaros produce vórtices de aire que acaban por extinguirse contra el suelo e incrementan la presión que el suelo soporta. El agua que levanta el pez al nadar induce una elevación local de la superficie libre y una mayor presión sobre el fondo del lago. El suelo percibe, y soporta, cualquier cosa que se mueva, sin importar el medio por el que se desplace un determinado animal.

Con números

Hemos comparado los valores predichos por la teoría construccional para la velocidad, la frecuencia de zancada o de batido y la generación de fuerza con los datos empíricos de una amplia gama de animales. Todos los exponentes de escala para la masa teóricos reposan sobre la hipótesis de la similaridad geométrica; es decir, hemos idealizado toda forma animal a una esfera. No obstante, respecto a esta hipótesis se dan pequeñas variaciones, que suelen constituir la norma más que la excepción en toda la literatura sobre las relaciones de escala del mundo animal. La envergadura de las aves evidencia una notable disparidad de su semejanza geométrica. Dado que las aves grandes cuentan con unas alas de mayor longitud, deberían manifestar un factor de escala entre la masa y la frecuencia de aleteo todavía más negativa que la predicha por nuestro modelo.

En general, las pendientes de las relaciones de escala empíricas varían en razón de las especies muestreadas, las diferencias taxonómicas en el escalado de las dimensiones corporales, tipo de estudio del comportamiento animal, metodología empleada y supuestos estadísticos.

Así, aunque no encontramos pruebas estadísticas que respalden con minuciosidad las relaciones de escala



9. PREDICCIONES DE LA TEORÍA CONSTRUCCIONAL obtenidas a partir de la masa.

Abarcan desde los animales hasta las máquinas construidas por el hombre. La relación entre la fuerza y la masa de los motores rige también para todos los tipos de locomoción animal. Este gráfico logarítmico muestra una relación de escala directa entre animales voladores (insectos y aves) y aeroplanos. La línea continua corresponde a la velocidad predicha por la teoría construccional; los puntos representan los valores de la velocidad y de la masa medidos en insectos (verde), aves (azul) y aeroplanos (marrón).

predichas para todo el rango estudiado, el exponente de escala teórico se ajusta siempre a los resultados experimentales que cabría esperar. Los datos se hallan dentro del orden de magnitud de las predicciones, lo que cuadra con las expectativas de un análisis dimensional donde todas las constantes entre 0,1 y 10 se desprecian. Teniendo en cuenta que esta teoría emplea sólo la densidad, la gravedad y la masa, y ningún parámetro de ajuste, la concordancia resulta sorprendente.

Ramificaciones

Hemos expuesto cómo este enfoque termodinámico predice algunas características del diseño animal. Ello nos lleva a pensar que, si la historia de la evolución volviera a repetirse, y volvieran a aparecer seres que corren, nadan y vuelan, el proceso debería producir en tales organismos las mismas velocidades, frecuencias de zancada o de batido y generación de fuerza que los que observamos en las formas de locomoción actuales.

La teoría se utilizaría también para predecir la evolución verosímil de dichas variables en otros planetas con fuerzas gravitatorias distintas o diferentes densidades de los medios líquido y gaseoso.

Los humanos solemos movernos por relieves dispares. Ajustamos nuestra velocidad y frecuencia de zancada en consonancia con el

lugar. De forma consciente e inconsciente, prestamos atención a la eficacia de nuestras pautas de movimiento; puede que la selección de la marcha óptima esté integrada en nuestro organismo. Cuando los astronautas caminaron por la Luna, se encontraban sometidos a una fuerza gravitatoria muy diferente de la acostumbrada; sería interesante ver si su velocidad y frecuencia de salto coinciden con las predicciones de nuestra teoría.

La teoría construccional no resulta válida sólo para los animales, sino que describe también los aparatos fabricados por el hombre. La relación entre fuerza y masa de los motores es la misma que opera en los organismos corredores, nadadores y voladores. La teoría construccional del vuelo animal predice, además, la velocidad del vuelo propulsado. Reúne lo natural con lo artificial.

La teoría se aplica al diseño de robots exploradores que operen en otros planetas o lugares inaccesibles de la Tierra. Resulta de gran utilidad en el diseño de cualquier dispositivo de locomoción nuevo, así como en la mejora de los ya existentes, pues orienta la labor de los ingenieros. Por botón de muestra recordemos qué ocurre con los neumáticos de los automóviles: se deforman a cada rotación, lo que resulta en una pérdida vertical de energía, a la vez que sufren una pérdida horizontal sosten-

nida debida a la fricción. Sería interesante averiguar si el diseño de los neumáticos ha alcanzado ya un punto óptimo o si cabe todavía una mejora ulterior. En cuanto a aplicaciones relacionadas con el entretenimiento, nuestras predicciones se utilizarían en las animaciones cinematográficas para precisar la velocidad y la frecuencia de zancada de criaturas como los dinosaurios; así se lograría, por ejemplo, representar con realismo la persecución de un *Tyrannosaurus rex* en pos de un automóvil.

En breve, la teoría constructiva parte de la ingeniería y retorna a ella. A partir de la identificación de los principios que dan cuenta de las formas geométricas en los flujos naturales robustecemos nuestra intuición para el diseño y la invención. Una mejor comprensión básica de lo que convierte una estructura en óptima y eficiente lleva a diseños más refinados desde el primer momento de su concepción. Con la teoría constructiva la invención se basa en principios, no se limita a remedar la naturaleza; el diseño se aborda con mentalidad científica.

Los autores

Adrian Bejan ocupa la cátedra J. A. Jones de ingeniería mecánica de la Universidad de Duke. **James H. Marden** enseña biología en la Universidad estatal de Pennsylvania. ©*American Scientist Magazine*.

Bibliografía complementaria

SHAPE AND STRUCTURE, FROM ENGINEERING TO NATURE. A. Bejan. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

MOLECULES, MUSCLES AND MACHINES: UNIVERSAL CHARACTERISTICS OF MOTORS. J. H. Marden y L. R. Allen en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 99, págs. 4161–4166; 2002.

SCALING OF MAXIMUM NET FORCE OUTPUT BY MOTORS USED FOR LOCOMOTION. J. H. Marden en *Journal of Experimental Biology*, vol. 208, págs. 1653–1664; 2005.

UNIFYING CONSTRUCTIVE THEORY FOR SCALE EFFECTS IN RUNNING, SWIMMING AND FLYING. A. Bejan y J. H. Marden en *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, págs. 238–248; 2006.