

La EVOLUCIÓN de la locomoción ANIMAL



Víctor M. Ortega

Ante una amenaza o urgencia, yo podría correr; inclusive podría trepar un árbol de mediana altura, saltar una zanja no muy ancha, reptar dentro de un agujero fangoso o, si el caso así lo demandara, lanzarme al agua, bucear por breves instantes y nadar.

Por desgracia, pese a mi gran esfuerzo, bastaría recordar los 104 kilómetros por hora que alcanza un guepardo al correr, contra los 38 del más rápido de los atletas; o la altura relativa alcanzada por el insecto espumoso *Philaenus spumarius* durante el salto, 47 veces mayor que la que alcanza el humano, para convencerse de que el *bauplan* o diseño corporal que nos define cinéticamente como especie raya en lo perfectible, no en lo perfecto.

¡Oh! “¡Maldito azar! Inconcebible ser, estéril fuente de todo, único superviviente de aquel tiempo en que la necesidad dio a luz a la libertad y la libertad fue tan insensata que volvió al seno materno” (Kierkegaard, *Diario de un seductor*). Dejemos pues al humano –por ahora– y centremos nuestra atención en los animales, su evolución y su locomoción, que sin duda prometen ser más impresionantes.

La naturaleza de los fluidos

La mayoría de las funciones biológicas se desarrollan en fluidos, y no es casual que la locomoción se encuentre circunscrita a sus leyes. Técnicamente, un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando es sometida a un esfuerzo, sin importar

cuán pequeño sea éste. Los fluidos se dividen en newtonianos y no newtonianos. La diferencia más importante entre ambos es su viscosidad, la medida de la resistencia que ofrece un fluido sobre su propio movimiento. En el primer caso, la viscosidad es constante, mientras que en el segundo caso, el de los fluidos no newtonianos, no lo es. Además, los fluidos newtonianos están constituidos por moléculas pequeñas y ligeras, como el agua, mientras que los no newtonianos están constituidos, en su totalidad o en parte, por moléculas grandes y pesadas, como ocurre en la sangre: a pesar de contener agua, los eritrocitos que contiene le dan una naturaleza no newtoniana. En lo sucesivo sólo revisaremos fenómenos atribuibles a fluidos newtonianos.

Reynolds numerado

Un fluido mantiene una relación entre fuerzas inerciales (de movimiento: velocidad y longitud) y fuerzas debidas a la viscosidad (de resistencia). Esta relación se conoce como *número de Reynolds*, *Re*. Para valores grandes del número de Reynolds, las fuerzas de movimiento predominan (pensemos en el desplazamiento de una ballena); mientras que para valores pequeños, son las fuerzas viscosas las predominantes.

A escala pequeña, una gota de agua es para una bacteria lo que para un pingüino sería una alberca llena de miel. Visto desde nuestra escala, un microorganismo parecería más un sueño surrealista que una creación de la naturaleza; no obstante, su diseño cinético (de movimiento) es sumamente efectivo. Por ejemplo,



si a un pingüino lo redujésemos al tamaño de una millonésima parte de un metro y lo pusiéramos a competir en nado con una bacteria, nuestra pequeña ave nos decepcionaría, pues no pasaría de la línea de salida cuando ya la bacteria –y su flagelo, el organelo que la impulsa a manera de sacacorchos– habrían cruzado la meta. Además, si el número de Reynolds es pequeño, un flujo mostrará variaciones regulares y previsibles en espacio y tiempo (por ejemplo, un río apacible), pero si Re es grande, se hará turbulento y tendrá movimientos azarosos, irregulares y no previsibles (como unos rápidos). Imaginemos por un instante a un organismo en una o en otra situación. Sin duda, el primer régimen es el más cómodo para desplazarse.

Locomoción influida

Los primeros microorganismos debieron superar las restricciones mecánicas impuestas por la viscosidad del agua, de acuerdo al número de Reynolds, por medio del desarrollo y control de un timón cinético que los condujese a través del mar primigenio.

Posiblemente las primeras innovaciones biomecánicas para producir movimiento fueron *protocilios* y *protoflagelos*, ya que el uso de los cilios y flagelos actuales está muy difundido entre los microorganismos. Bacterias como *Escherichia coli* utilizan flagelos, mientras que protozoarios como *Paramecium sp.* utilizan cilios (undulipodios).

Sin embargo, no es indispensable el uso de apéndices especializados, como cilios o flagelos, para hacer posible el desplazamiento a microescala. Se ha demostrado que para producir desplazamiento en una dirección determinada bastan pequeños cambios en la geometría del cuerpo de un microorganismo esférico ideal. Por ejemplo, se sabe que amibas como *Dictyostelium discoideum* se desplazan gracias a las deformaciones producidas por sus cuerpos. Otro caso interesante son las cianobacterias, que aparentemente carecen de apéndices locomotores. Se ha propuesto que este grupo de bacterias verdeazuladas utiliza para desplazarse las ondas superficiales generadas por su membrana celular.



Entorno marino

El salto evolutivo de organismos unicelulares a multicelulares dio lugar al desarrollo y diversificación de nuevos prototipos cinéticos. La conquista del medio marino estaba de por medio.

La especialización multicelular dio paso al desarrollo de los sistemas nervioso, respiratorio y motor. Es curioso que moluscos marinos del género *Aplysia*, a pesar de presentar un tamaño corporal reducido y pocas células nerviosas –20 mil, en comparación con el trillón contenido en un cerebro de mamífero– ostenten neuronas de gran tamaño. Eric Kandel ganó el premio Nobel por sus hallazgos moleculares sobre la memoria, utilizando a estos moluscos como modelo experimental. De hecho, el axón –apéndice con el que una neurona se comunica con otra– de mayor tamaño conocido pertenece a los calamares. Estas innovaciones permitieron que la diversidad de diseños biomecánicos en el océano fuera tal que actualmente en cada rincón exista una miríada de animales en movimiento.

Pasemos revista a los mecanismos más comunes de locomoción que presenta la fauna marina. La *propulsión a chorro* es utilizada generalmente por invertebrados, como equinodermos, moluscos marinos, celenterados y macroplancton. El calamar la utiliza para escapar de sus depredadores, a una velocidad de hasta 30 kilómetros por hora. Otros mecanismos de locomoción empleados por larvas, peces y vertebrados marinos son las *ondulaciones* del cuerpo y las aletas. Sorprende la convergencia evolutiva en la forma del cuerpo y la locomoción de tiburones lámnidos (que incluyen al tiburón blanco y mako), atunes, ballenas, ictiosauros y varias especies de peces pelágicos (que viven alejados de la costa). Esta convergencia de diseño mecánico llega al extremo entre el atún y el tiburón mako, que resultan ser prácticamente idénticos, inclusive la configuración de sus músculos rojo (aeróbico) y blanco (anaeróbico).

Hacia tierra firme

El tránsito de un medio acuoso a uno gaseoso trajo consigo nuevas imposiciones mecánicas, debido a las diferencias fisicoquímicas del agua y el aire. Por ejemplo, la densidad del agua es aproximadamente mil



veces la del aire. Además, el agua es prácticamente incompresible en comparación con el aire. Así, el plan corporal de los animales, que había sido desarrollado y probado para un medio acuoso, tuvo que sufrir nuevas modificaciones para su arribo a tierra: dentro del agua un cuerpo pesa menos, pues experimenta una fuerza de empuje que es igual al peso de agua desplazada (como mostró Arquímedes). El desarrollo de extremidades fuertes y de los sistemas muscular, de soporte, nervioso, circulatorio y respiratorio, en conjunto, ayudaron en gran medida al arribo a tierra firme tanto de vertebrados como de invertebrados.

Caminar y correr

Mientras que el reptar recuerda *grosso modo* el movimiento ondulatorio de los peces, caminar y correr –medios de transporte utilizados por un gran número de animales terrestres– presentan particularidades mecánicas que hay que considerar con cierto detalle.

Para que un animal pueda caminar, debe realizar saltos pequeños entre cada pierna, formando un arco, a manera de péndulo invertido, transformando alternadamente la energía cinética en potencial, y viceversa.

Imagine el lector el problema que enfrenta un milpiés para sincronizar su gran número de patas. No obstante, si un animal pasa de caminar a correr, hay que adicionar al modelo de péndulo invertido una componente extra: la energía elástica. Ésta resulta del choque de una de las piernas con el suelo, y se almacena temporalmente en músculos, tendones y ligamentos. Posteriormente, se libera para producir una propulsión mayor que el simple caminar. El corredor más veloz sobre la tierra es el guepardo, cuya carrera alcanza hasta 104 kilómetros por hora.

De saltos

Hay dos tipos de estrategias que han desarrollado los animales para saltar. La primera es tener patas largas, para hacer palanca con ellas, lo que permite aplicar menos fuerza para recorrer la misma distancia que un organismo de masa similar pero con patas cortas. La segunda estrategia, que generalmente em-



Philaenus spumarius. Fotografía: NeilHancock. www.fcps.edu.

plean los animales de patas cortas, es liberar una cantidad de energía almacenada para impulsar un sistema de catapulta. En vertebrados, sólo se utiliza el primer mecanismo; los insectos emplean ambos.

Un caso impresionante de salto es el que exhibe el “insecto espumoso”, *Philaenus spumarius*. Este organismo presenta una masa de 12 miligramos y una longitud de 6 milímetros. El salto es producto de su sistema muscular y de un mecanismo de “cerradura” entre el fémur y la cadera, que catapultan al insecto en menos de un milisegundo. Alcanza una altura media que corresponde a 71 veces su tamaño, con una aceleración de 4 mil metros por segundo al cuadrado (m/s^2), que corresponde a 414 veces la aceleración de la gravedad, G. En comparación, las pulgas alcanzan 135 G, los saltamontes 8 G y un transbordador espacial sólo 2 G.

Sobre agua

Una gran variedad de organismos pueden caminar sobre el agua. Esto se debe a un fenómeno molecular denominado “tensión superficial”. En un fluido, cada molécula interactúa con las que le rodean, manteniendo entre ellas un equilibrio entre fuerzas de atracción y repulsión. Sin embargo en la interfase agua-aire, las moléculas de agua tienen una fuerza neta mayor hacia el interior del líquido que hacia afuera, debido a que la fuerza de atracción entre las moléculas de agua entre sí es mayor que la atracción entre las moléculas de agua y las del aire. Tal inestabilidad fuerza

a una reducción del área superficial de la capa de agua. Es debido a la tensión superficial, por ejemplo, que una gota de agua al caer tiende a minimizar su área superficial, adoptando una forma esférica. En el caso de los insectos y otros animales que caminan sobre el agua, lo pueden hacer gracias a que la superficie de líquido, debido a la tensión superficial, se comporta como si fuera una membrana que puede soportar el peso del animal, distribuido sobre un área suficientemente grande.

Sin embargo no todos los animales pueden hacer uso exclusivamente de la tensión superficial para desplazarse sobre el agua. Organismos de masa mayor a un gramo tienen que correr para no hundirse. El basilisco, *Basiliscus plumifrons* –un reptil cuya masa adulta es de 78 gramos– sólo lo consigue si su velocidad es mayor o igual a 1.3 metros por segundo. En contraste, un organismo con masa menor a un gramo no necesita de una velocidad mínima de desplazamiento para permanecer sobre el agua. El peso de los insectos del género *Gerris* es soportado sin problema por la tensión superficial.

Volar a bajo costo

El vuelo dio a los animales una mayor capacidad de desplazamiento hacia nuevos nichos, lo que derivaría en la generación de nuevas especies, con el transcurrir del tiempo, el aislamiento y los procesos de selección natural.



Basiliscus plumifrons. Fotografía: Canadian Organization for Tropical Education and Rainforest Conservation. www.coterc.org

No es casualidad que, de todos los animales terrestres, los más diversos del planeta sean insectos; dentro de los vertebrados, las aves; y que dentro de los mamíferos, los murciélagos sean el segundo grupo con más especies, sólo después de los roedores. Inclusive los pterosaurios fueron un grupo diverso durante el Mesozoico, cuyos integrantes no sólo planeaban, sino que volaban batiendo las alas, posiblemente como lo hacen en la actualidad las aves cazadoras aéreas.

Es difícil discernir la senda evolutiva de los animales voladores, debido a su escaso registro fósil. Sin embargo, un prerequisite para su evolución fue la integración y desarrollo de un sistema de soporte, muscular, respiratorio, circulatorio y nervioso. Sólo con este cambio holístico puede entenderse la evolución del vuelo.

Para volar, un organismo necesita vencer dos tipos de fuerzas: la de gravedad, que atrae al organismo a la tierra, y la fuerza de arrastre o fricción, producida por el aire contra el cuerpo y las alas. Vencer a la gravedad (por medio de la fuerza de sustentación) resulta más fácil conforme un organismo aumenta su velocidad, pero esto trae consigo un aumento en la fuerza de arrastre. De esto se desprende que es costoso volar a velocidades muy bajas (aumentan los costos de sustentación) o muy altas (aumentan los costos por arrastre).

Por tal razón, los organismos voladores utilizan generalmente dos tipos de velocidades de vuelo “a bajo costo”, de acuerdo con sus requerimientos. Un ave que se alimenta en el aire, como una golondrina que consume mosquitos al vuelo, requiere ir a una velocidad que maximice su tiempo de vuelo, con el fin de capturar más alimento. Pero para un ave migratoria (igual que para un avión comercial) es mejor ir a una velocidad que maximice su distancia, es decir, que le permita llegar más lejos dada una cantidad de combustible disponible.

Tamaño y energía

Energéticamente, los músculos de los insectos voladores exhiben la mayor tasa metabólica de todos los animales, posiblemente debido al número de Reynolds pequeño y la alta frecuencia de aleteo de estos animales: una mosca puede aletear 200 veces cada segundo, mientras que un colibrí sólo puede hacerlo



Colibrí.

40 veces. Además, hablando en términos geométricos, un animal pequeño presenta un área superficial mayor, en relación con su volumen, que un organismo relativamente grande. Esto hace que los costos por pérdida de calor sean elevados para animales pequeños, obligándolos a elevar su consumo de alimento. Durante las noches, un colibrí pasa por un estado de “hibernación”, bajando al mínimo su temperatura corporal y metabolismo; de no hacerlo moriría prácticamente de “inanición”, debido a sus altos requerimientos metabólicos. Visto así, el tamaño influye de manera importante en la locomoción de los animales.

Remolinos y locomoción

Hasta ahora hemos seguido de cerca el desfile de los diseños biomecánicos más conspicuos surgidos evolutivamente, y hemos explicado las fuerzas que intervienen durante el desplazamiento. No obstante, para comprender la importancia que ha tenido el ambiente en el plan corporal de los animales, hay que atender los efectos que produce su paso sobre un fluido.

En 1904 el físico alemán Ludwig Prandtl causó una revolución en la mecánica de fluidos con la introducción del concepto de *capa límite*. En aquel entonces, la teoría hidrodinámica predecía erróneamente que el arrastre producido por un cuerpo en movimiento inmerso en un fluido debería ser cero (la llamada “paradoja de D’Alembert”). El genio de Prandtl radicó en atribuir los efectos de la viscosidad, responsables de la

adherencia del fluido al cuerpo, a una región cercana a la superficie del cuerpo, que denominó *capa límite*. Esta idea dio un gran impulso al estudio de la locomoción animal. Gracias a ella, se pudo calcular con gran aproximación la fuerza de fricción de superficie y la transferencia de calor generadas por el movimiento de un cuerpo en un fluido. Ello ayudó a mejorar el diseño aerodinámico de aviones y evitar su desplome—debido a que a grandes ángulos de ataque, la capa límite se separa de la superficie del ala— y contribuyó al estudio de flujos de corte, como las estelas (reconocibles en el humo que deja a su paso un avión acrobático). Y precisamente fue el estudio de las estelas lo que permitió sentar las bases de una nueva visión teórica para el estudio de la locomoción, usando a los vórtices.

Un vórtice o remolino consiste en una región de fluido que rota alrededor de un punto. Existen vórtices pequeños y de vida corta, como los que se generan al revolver el café, y los hay grandes y longevos, como los de la atmósfera de Júpiter, que tienen diámetros de miles de kilómetros y pueden existir por siglos.

Veamos que nos dicen los vórtices acerca de la locomoción animal.



Vórtice.

Número Strouhal, remolinos y eficiencia

Técnicamente, se dice que el número Strouhal, St —que depende del número de Reynolds— gobierna el desarrollo de vórtices y determina el régimen de un fluido. Este número depende de la frecuencia de oscilación, la amplitud y la velocidad del desplazamiento. Por tanto, un organismo que batiera sus alas a alta frecuencia y se desplazara a poca velocidad sería ineficiente, igual que uno que batiera sus alas a poca frecuencia y se desplazara a alta velocidad. Sorprendentemente, se ha observado que todos los animales que vuelan y nadan a “velocidad de crucero”—aquella que maximiza la distancia, dada una cantidad de combustible— mantienen un número Strouhal entre 0.2 y 0.4. Este hallazgo es muy importante, ya que coincide con las medidas teóricas —y empíricas— de máxima eficiencia de propulsión, y además define tipos específicos de vórtices.

Cuando un ala —o aleta— se mueve a través de un fluido, produce principalmente dos tipos de vórtices: un *tren de Karman* y un *vórtice de filo de ala*. El primero se forma en la parte trasera del ala, y por su dirección de rotación (contraria a la dirección del desplazamiento) genera arrastre. Pero si el giro de este tren de Karman se invierte —lo que ocurre cuando el número de Strouhal, St , tiene un valor de entre 0.2 y 0.4—, deja de producir arrastre y provee un empuje extra, proporcionando una mayor eficiencia de propulsión. Por su parte, la formación del vórtice de filo de ala ayuda a la sustentación, evitando el desplome. Por ejemplo, los vencejos son aves que pasan volando el 90 por ciento



Vencejo real (*Apus melba*). Fotografía: Ernesto Villodas.

de su vida (sólo se posan en tierra durante la reproducción), y hacen uso del vórtice de filo de ala para disminuir sus costos y mantenerse en el aire.

Anillos, trenes y herraduras

La producción de vórtices por microorganismos cumple diversas funciones. Algunos microorganismos ciliados producen pequeños remolinos con sus apéndices para adquirir una mayor cantidad de alimento. Los espermatozoides del erizo de mar, al ser puestos en superficies planas y a grandes densidades, se arreglan de manera que forman remolinos al moverse con sus flagelos.

Por su parte, los animales que vuelan o nadan generan *vórtices de anillo* (regiones en que un fluido en movimiento rota, tomando forma de dona, como los anillos de humo) o trenes de onda, dependiendo de su velocidad de desplazamiento. En la paloma común, los vórtices de anillo aparecen a velocidades pequeñas, mientras que a velocidades grandes se da una transición hacia un tren continuo de Karman. Sin embargo, los vórtices de anillo no sólo se generan durante el vuelo o nado de peces. Por ejemplo, el calamar, *Loligo pealei* crea un vórtice de anillo al usar su propulsión a chorro. Incluso se han reportado vórtices de herradura generados por insectos que caminan sobre el agua.

Otra faceta de los vórtices es que pueden servir como forma de recuperación de energía. La “captura de la estela” en insectos disminuye los costos de vuelo. La mariposa *Vanessa atalanta* usa este mecanismo para incrementar su eficiencia de vuelo.

Como hemos visto, el estudio de los vórtices generados durante el desplazamiento de un organismo en un fluido es importante, ya que ha permitido no sólo comprender a detalle los principios básicos de los diseños biomecánicos surgidos evolutivamente, sino también la función específica que cumplen en la locomoción animal.

Epílogo

El biólogo francés y premio Nobel Jacques Monod fue pionero en sostener que la vida no sigue un caudal determinista, cargado de algún propósito o

dirección. Consideró que el azar, origen de toda innovación y creación universal, es una consecuencia necesaria que destila el material sobre el cual actúa la selección natural. Para el biólogo británico Richard Dawkins, este proceso de prueba y error es evidencia tangible del viaje hacia delante en el tiempo, al estilo de H. G. Wells, que sólo pueden realizar aquellas máquinas que cuenten con los “mejores” conductores genéticos.

En este sentido, la evolución de la locomoción animal ha sido un ejercicio de adaptación continua, un estricto esquema selectivo delimitado por el medio –en este caso, los fluidos–, que ha llevado a diseños e innovaciones sorprendentes. Pensemos en los sistemas motores, de generación de energía, de integración y de control, en la convergencia en propulsión entre animales voladores y nadadores y, sobre todo, en el uso eficiente de los mismos recursos dinámicos, como los vórtices. Y todo esto gracias a un simple mecanismo de ensayo y error, de selección... de azar.

Pero volvamos al ser humano, a su *bauplan* (plan corporal) no especializado. La ventaja de un diseño no especializado radica en la posibilidad de acción, no necesariamente en la eficiencia. Homero, en la *Ilíada*, da cuenta de la gran diversidad de actividades olímpicas que pueden realizar los hombres si así lo disponen. De hecho, son pocos los ejemplos de animales que presentan tantas habilidades cinéticas como el hombre. Sin embargo, y sin lugar a duda, la máxima restricción cinética que exhibe nuestro diseño biomecánico es el vuelo. Dédalo y Leonardo da Vinci avistaron algunas posibilidades para conseguirlo. Sin embargo, parece que sólo en sus sueños lo lograron; sueños que siguen y seguirán siendo los nuestros.

Agradecimientos

A Sarahí Arriaga Ramírez, Óscar U. Velasco Fuentes y Saúl Álvarez Borrego, de la División de Oceanología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), por sus observaciones y comentarios sobre el presente artículo.

Victor M. Ortega es egresado del Doctorado en Ecología Marina del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Actualmente realiza una estancia postdoctoral, con el apoyo de UC MEXUS-Conacyt, en el Laboratorio de Vuelo Animal de la Universidad de California-Berkeley. Su investigación se enfoca en el estudio del control y maniobrabilidad de aves e insectos en flujos complejos y turbulentos.

vortega@berkeley.edu

Lecturas recomendadas

- Anderson, E. J. y M. A. Grosenbaugh (2005), “Jet flow in steadily swimming adult squid”, *Journal of experimental biology* 208, 1125–1146.
- Burrows, M. (2003), “Frog hopper insects leap to new heights”, *Nature* 424, 509.
- Dickinson, M. H., C. T. Farley, R. J. Full, M. Koehl, R. Kram y S. Lehman (2000), “How animals move: an integrative view”, *Science* 288, 100-106.
- Hu, D. L., B. Chan y J. W. M. Bush (2003), “The hydrodynamics of water strider locomotion”, *Nature* 424, 663-666.
- Koiller, J. (1999), “Movimiento de microorganismos”, *La Gaceta* (Real Sociedad Matemática Española) 2, 423-445.
- Norberg, U. M. (1990), *Vertebrate flight*, Berlín, Springer Verlag.
- Sane, S. P. (2003), “The aerodynamics of insect flight”, *Journal of experimental biology* 206, 4191-4208.
- Sharp, N. C. C. (1997), “Timed running speed of a cheetah (*Acinonyx jubatus*)”, *Journal of zoology* 241, 493-494.
- Taylor, G. K., R. L. Nudds y L. R. Thomas (2003), “Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency”, *Nature* 425, 707-711.
- Velasco-Fuentes, O. U. (2003), “¡Larga vida al vórtice!”, *Ciencia y desarrollo* 169, 23-29.