

Prólogo

La biomecánica, es decir, la rama de la biología que intenta comprender diversos aspectos adaptativos desde el punto de vista mecánico, ha experimentado un gran auge en los últimos 50 años. Se ha avanzado en diversos aspectos, desde el concerniente *per se* a los materiales y estructuras biológicas (por ejemplo, en los animales, esqueleto, músculo, tendones y ligamentos), a las diversas funciones que hacen posible la supervivencia de los seres vivos: toma del alimento, respiración o locomoción, entre otras. Estas páginas se ocupan en concreto de la función locomotora.

Desde ya los lejanos tiempos de mi tesis doctoral me he especializado en los aspectos funcionales de los vertebrados. Empecé mi carrera estudiando el mecanismo de toma del alimento en los peces como el bacalao y especies afines para pasar a ocuparme de la mecánica de hueso y tendón, incluyendo las cuestiones relacionadas con la diferencia de tamaño, es decir, lo que normalmente conocemos como alometría. Una gran parte de mi actividad investigadora ha ido dirigida a la locomoción, especialmente en mamíferos, incluyendo el ser humano, con alguna incursión en la locomoción terrestre de las aves (con frecuencia parece olvidarse que dichos

vertebrados, además de volar, caminan y son bípedos). Pues bien, en esos cuarenta y tantos años de actividad en el campo de la biomecánica, Robert McNeill Alexander fue maestro y consejero, desde una lejana primera visita que le hice en agosto de 1972, seguida por otras estancias más o menos largas.

Neill, como era conocido entre amigos y colegas, ha sido una figura crucial en biomecánica y, especialmente, en locomoción. A fuer de sincero, diría que me resultaría muy difícil imaginar el desarrollo alcanzado en esos campos de la biología haciendo abstracción de la ingente obra desarrollada por Neill Alexander desde su laboratorio de la Universidad de Leeds. Fallecido en marzo de 2016, cuando el manuscrito de esta obra ya estaba sujeto a revisión, he querido añadir este breve prólogo para explicar y, si se quiere, justificar la dedicatoria.

Pero sería injusto no acordarme también en estas líneas de los diversos estudiantes que he tenido a lo largo de mi carrera y a los que corresponde, en gran parte, el mérito, si lo hubiere, de los resultados obtenidos. Algo semejante debo decir sobre mis colegas del Muséum de París, como también los del otro lado del Atlántico, de diferentes países de la comunidad hispana, con los que he llevado a cabo un buen número de estudios en el campo de la locomoción de los vertebrados.

Por último, lo hago también especialmente extensivo a mis compañeros del grupo de investigación en el que estoy integrado (CGL2016-78577-P, Prof. Paul Palmqvist, Universidad de Málaga).

Introducción

El diccionario nos dice que “locomoción” es la acción de trasladarse. Con frecuencia se asume que esa capacidad es inherente a los animales, pero muy posiblemente lo sea realmente a la vida. En efecto, nada contradice la asunción de que los primeros seres vivos fueran libres, primera condición a cumplir para desarrollar alguna capacidad de movimiento. Desde ese punto de vista, en el reino animal se habría conservado esa característica ancestral, que se habría perdido en hongos y vegetales, siempre hablando del dominio pluricelular. La inmovilidad es claramente secundaria en los animales y está presente en grupos muy concretos.

La capacidad de movimiento ha intrigado desde siempre al ser humano, ya sea en referencia a sí mismo o a otros animales. Y de los tres grandes tipos de locomoción que normalmente se distinguen (terrestre, acuática y aérea), el vuelo ha sido, sin lugar a dudas, desde la más remota antigüedad, el más intrigante. Recordemos el mito de Ícaro: al fin y al cabo, el ser humano, que se desplaza como un animal terrestre, y es capaz de nadar, con más o menos fortuna, ha necesitado de la técnica para moverse por el aire.

Ya en la obra biológica del que puede considerarse el padre de nuestra cultura occidental, Aristóteles, se encuentra el primer intento de explicación del desplazamiento en un par de pequeñas monografías, *Sobre la locomoción de los animales* y *Sobre el movimiento de los animales*. Parece que fueron escritos al final de la vida del filósofo. Es, sin duda, el primero de estos textos el que se ciñe más al trasfondo biológico de la cuestión, deteniéndose en los tres tipos de locomoción ya citados.

Tendría que transcurrir un largo lapso para que otro autor abordara el tema de manera comparable. No fue otro que el médico napolitano Giovanni Borelli. En su obra *De Motu Animalium* (*Sobre el movimiento de los animales*), publicada póstumamente (1680) gracias al mecenazgo de la reina Cristina de Suecia, utilizó los conocimientos anatómicos, fisiológicos y mecánicos del momento, para describir e intentar explicar los movimientos corporales. Una curiosidad de la obra son sus ilustraciones, infrecuentes en los tratados científicos del momento. Las explicaciones que da Borelli son, por supuesto, en muchos casos erróneas. Recordemos que las bases de la mecánica racional, que utilizamos corrientemente en estos temas, no se publicaron hasta un poco más tarde. Se trata de los *Principia* de Isaac Newton (1687). Y es que en ciencia una cosa es plantearse un problema y otra muy diferente hallarle solución si no se dispone de la metodología adecuada. Veamos un ejemplo concreto con relación a uno de los temas tratados en esta obra.

En 1872 se desató una polémica que enfrentó al millonario Leland Stanford con algunos de sus amigos. El motivo era la diferencia de opinión sobre si, cuando un caballo galopaba, había un momento en que no apoyaba ningún casco en el suelo. Es decir, si existía una fase de suspensión total de las cuatro extremidades (veremos ese concepto en el capítulo 4). Stanford tenía caballos de carreras y

una cierta curiosidad científica (fundaría años después la universidad que lleva su nombre). En ese contexto decidió encargar de resolver la cuestión a un fotógrafo inglés emigrado a Estados Unidos, Eadweard Muybridge. Este, después de repetidos intentos, demostró empíricamente que efectivamente existía esa fase de “levitación”. Y lo hizo gracias a un invento reciente, la fotografía, consiguiendo instantáneas sucesivas mediante cámaras montadas en serie. Probablemente la polémica no era la primera vez que se planteaba, pero el ojo humano podía como mucho intuir la realidad, aunque no proporcionar datos fehacientes.

Como veremos, moverse implica un sistema motor que genere fuerza y energía. Los animales pluricelulares, o metazoos, disponen de un tejido, el muscular, capaz de llevar a cabo esa tarea, como característica universal. Las formas tales como los protozoos o las larvas de diversos grupos de invertebrados carecen de músculo, pero suplen esa ausencia mediante flagelos o cilios que, dado el limitado tamaño de esos seres vivos, permiten el movimiento de manera muy eficaz.

De manera complementaria a la estructura motora muscular existen las esqueléticas. Un esqueleto puede estar formado por un material duro (queratina, cartílago, hueso, etc.), pero también puede consistir en una cavidad llena de líquido, cosa que sucede en los anélidos (por ejemplo, las lombrices de tierra). El esqueleto puede ser interno, que es el caso de los vertebrados, o externo, como en los insectos; en cualquier caso, el tipo de esqueleto que interviene en la locomoción es articulado. La concha de un molusco puede considerarse también un exosqueleto, pero se trata de una estructura puramente protectora sin ninguna relación con su capacidad de desplazamiento.

Los esqueletos duros son rígidos, sin capacidad elástica apreciable. Y la elasticidad es una condición importante, ya sea para cargar o transmitir energía. Tendones y ligamentos,

dotados de una disponibilidad notable de extensión, son incapaces de generar fuerza o producir trabajo, pero sí de llevar a cabo un papel transmisor.

En el marco del paradigma darwinista asumimos que esas diversas estructuras que posibilitan el movimiento son fruto de un largo proceso de selección natural. En algunos casos ha sido tan grande la versatilidad conseguida, que han podido responder a requerimientos muy variados. El músculo y la estructura básica del sistema nervioso, la neurona, serían buenos ejemplos; pero, por supuesto, las condiciones ambientales son trascendentales; es decir, lo que se llama en términos evolutivos “presión selectiva”, que es el requerimiento específico de tipo estructural que posibilita una determinada función, que puede variar mucho según el medio en el que se mueve un animal.

Un animal que camina tiene una superficie de apoyo que lo sostiene, pero debe bregar con las irregularidades del terreno. Para uno de pequeño tamaño, las rugosidades sobre las que se desplaza pueden adquirir la proporción de colinas. Un ave se precipita al vacío si no consigue una fuerza sustentadora, pero se mueve en condiciones de homogeneidad ambiental y falta de obstáculos. En el medio acuático es posible igualar la densidad del medio y evitar el hundimiento, porque esa densidad es elevada, aunque genera a su vez un fuerte rozamiento.

Las largas migraciones de las aves no tienen parangón en el medio terrestre, pero por supuesto que no todas son capaces de llevarlas a cabo. Especies muy próximas desde el punto de vista filogenético, o de clasificación, pueden comportarse de manera muy diferente en ese aspecto. La codorniz y la perdiz, por ejemplo, están muy relacionadas, ambas pertenecen a la misma familia: los fasiánidos; pero mientras la segunda es un animal sedentario, de vuelo pesado, la codorniz es capaz de trasladarse miles de kilómetros, por ejemplo desde el Magreb, donde hiberna, al norte de

Europa. Y si bien es cierto que no hay obstáculos para la trayectoria de un ave semejantes a los que puede encontrar un ratón, el tamaño es una limitación importante para el vuelo dado su coste energético. En términos de masa corporal, no hay un equivalente a ballenas o elefantes que sea capaz de volar.

Los animales se mueven en un área determinada que depende de factores diversos. Si nos limitamos a considerar tan solo el medio terrestre, los datos y los análisis subsiguientes obtenidos en mamíferos sobre la relación entre masa corporal e intervalo de superficie de desplazamiento no son demasiado claros. Hay autores que opinan que dicha superficie se incrementa linealmente con la masa, pero que a su vez tiende a ser mayor en carnívoros que en herbívoros, ya que la fuente de alimentación de aquellos está mucho más dispersa.

Algunos datos empíricos obtenidos en aves parecen concluyentes a ese respecto, ya que si se les limita experimentalmente la fuente de alimento, los animales incrementan su área de actividad diaria. Ahora bien, la locomoción no solo hace posible la búsqueda de alimento, sino también otras muchas actividades, como la huida frente a los depredadores, el encuentro con congéneres, necesario para la reproducción, y otros diferentes aspectos del comportamiento.

Por supuesto que un parámetro de máxima importancia en locomoción es la velocidad, ya sea el rango de variación habitual o la máxima. Aunque normalmente en los animales terrestres la velocidad aumenta con el tamaño, hay excepciones. Por ejemplo, existen muchos mamíferos de mayor masa corporal que el guepardo, pero este parece ser el más veloz. Se ha sugerido que hay una masa óptima (alrededor de 100 kg), pero los datos sobre velocidades máximas son bastante relativos. La velocidad máxima registrada que puede alcanzar una determinada especie es un resultado a veces

tramposo, porque el animal puede servirse ella tan solo en contadas ocasiones; por ejemplo, los depredadores que cazan al acecho pueden ser muy rápidos, pero esa rapidez la utilizan muy puntualmente.

No solo la velocidad es importante en la persecución de una presa, también lo es, por ejemplo, la capacidad de aceleración. Si se pone en relación la velocidad con el tiempo en diferentes especies de carnívoros y herbívoros, se ve que la posibilidad de éxito en la caza del carnívoro no depende tanto del factor velocidad como de igualar o superar la capacidad de aceleración de la potencial víctima. Por cuestiones fisiológicas, una velocidad máxima no se puede mantener durante largo tiempo. A su vez, no es extraño que la presa, en los momentos de mayor peligro, recurra a bruscos virajes para intentar zafarse.

El proceso adaptativo debe permitir hacer frente, con más o menos éxito, a todas esas dificultades, tanto las impuestas por el medio en sí mismo, como las que son producto de la convivencia con otras especies. La cuestión no es baladí. Optimizar el sistema locomotor es una baza importante para el éxito evolutivo de las diferentes especies en función de las diversas necesidades implicadas. En última instancia es, básicamente, un problema de coste energético, y la energía de la que puede disponer un organismo es limitada, lo que implica que la que gaste de más la sustraerá de otra. Si el gasto en locomoción no se optimiza, podría resultar perjudicada, en última instancia, la capacidad reproductora y la posibilidad subsecuente de transmitir sus genes.

El grado de optimización en cualquier actividad, y en la locomotora en particular, no es siempre el mismo. Los cálculos de consumo energético entre especies comparables, considerando el medio en que se desplazan, nos muestran que las hay capaces de gastar menos energía que otras. El porqué es complejo: todos los organismos tienen una historia filogenética detrás y el proceso adaptativo tiene que actuar sobre el

fenotipo heredado. Pero es que, además, pueden darse soluciones alternativas a la adquisición de una velocidad elevada. Las tortugas son un buen ejemplo. No se entiende que sean animales tan extraordinariamente lentos si no se tiene en cuenta el hecho de que siempre pueden recurrir al caparazón para protegerse.