

LOS LÍMITES FÍSICOS Y BIOLÓGICOS EVOLUTIVOS AL RENDIMIENTO DEPORTIVO

Roberto Marco Cuéllar

*Catedrático de Bioquímica, Biofísica y Biología Molecular
en la Universidad Autónoma de Madrid*

INTRODUCCIÓN

El deporte es evidentemente un fenómeno sociológico y económico de gran importancia del que nadie puede mantenerse al margen. La actividad física debe cultivarse de la misma forma que la mental para garantizar el equilibrio personal siguiendo los consejos incorporados en el viejo aforismo “*Mens sana in corpore sano*”. Indudablemente procura elementos de satisfacción importantes a sus practicantes. Su contemplación como espectáculo es un fenómeno capital en la Sociedad Actual, sólo limitado, por ejemplo, por convicciones personales que nos hacen evitar la influencia y los estereotipos de la propaganda que nos invade. En general, estas limitaciones no pueden impedir el interesarse por y admirar las hazañas deportivas.

Por otro lado, la importancia del Deporte como elemento de cohesión social no debería nunca hacer olvidar uno de sus principios básicos, el “fair play”, reconociendo siempre quien o quienes son los mejores. Lamentablemente estos principios quedan muchas veces sepultados por comportamientos en cuyas raíces debe encontrarse la irracionalidad atávica anclada en nuestros orígenes evolutivos, muchas veces exacerbada por el reflejo sesgado de estas actividades en los medios de comunicación y su utilización demagógica por los poderes sociales.

Después de esta breve introducción, vamos a desarrollar seguidamente tres ideas interrelacionadas que constituyen el núcleo de este trabajo, ideas que, en mi opinión, deben servir de marco de referencia al desarrollo deportivo, cuya realidad e importancia en todos los órdenes ha sido subrayada en las demás intervenciones.

DIFERENCIAS Y SEMEJANZAS ENTRE LA TECNOLOGÍA BIOLÓGICA Y LA TECNOLOGÍA HUMANA.

Como han subrayado diversos autores (por ejemplo Vogel (2000), existen dos escuelas diferentes de diseño, la que podemos llamar Tecnología Biológica, la tecnología de los organismos vivos, el diseño producido como consecuencia de la evolución, y la Tecnología Humana, consecuencia de nuestra propia capacidad de invención. Ambas tienen que aceptar las limitaciones físicas y químicas de los materiales disponibles que tienen que utilizar, pero en principio son bastante diferentes: Por ejemplo:

Nosotros utilizamos profusamente los ángulos rectos en nuestras construcciones y utensilios, aunque no tanto en los objetos sometidos a esfuerzos externos importantes como en las naves y vehículos. ¿Dónde están los ángulos rectos en la naturaleza?. Construimos con materiales secos y rígidos, la naturaleza utiliza materiales húmedos y flexibles. Utilizamos metales en nuestros utensilios y construcciones, la naturaleza nunca lo ha hecho, por lo menos de forma generalizada.

Hasta muy recientemente, solíamos preferir la utilización de materiales homogéneos. La biología ha desarrollado materiales compuestos, muchos de los cuales fueron aprovechados por la

tecnología humana en sus comienzos. Fabricamos nuestros utensilios y construcciones macroscópicas de una o con pocas piezas (en la actualidad la expansión de la microelectrónica y de la nanotecnología está empezando a cambiar este principio), mientras que la naturaleza construye siempre utilizando elementos de dimensiones microscópicas.

Los goznes y transmisiones que fabricamos son en su gran mayoría de tipo deslizante, la naturaleza utiliza y produce principalmente estructuras que se flexionan y se doblan. Hacemos maravillas con ruedas y movimientos rotatorios. La Naturaleza ha producido una enorme variedad de Organismos que se desplazan por Agua, Aire y Tierra sin emplear esta solución que el hombre utiliza desde la más remota antigüedad (aunque algunas culturas se desarrollaron sin emplear la rueda). Nuestros motores se expanden (mediante pistones) o rotan (turbinas), mientras que los motores naturales se contraen o se deslizan (Aunque hay excepciones a esta regla, por ejemplo el gran generador energético celular, la ATPasa mitocondrial y el motor celular que mueve los flagelos utilizan movimientos de tipo rotatorio).



D. Roberto Marco Cuéllar

No hay que exagerar tampoco. Ambas tecnologías utilizan muchos principios de forma semejante. Las ventajas estructurales que proporcionan las estructuras huecas (tubos frente a cilindros sólidos) son utilizadas por ambas tecnologías. El uso de la presión en dispositivos hidráulicos en la transmisión de las fuerzas (p.e. los movimientos peristálticos de nuestros intestinos y los que producen los movimientos de las patas de ciertos artrópodos).

Ambas tecnologías utilizan caparazones curvos de forma semejante (cráneos, huevos, techos abovedados), columnas (troncos de los árboles, huesos largos, postes) y estructuras sólidas (piedras o cristales) embebidos en matrices aglomeradas (depósitos óseos o calcáreos, cemento), estructuras corrugadas para aumentar la resistencia sin aumentar la masa (caparazones, contenedores de cartón, pisos y techos).

Ambas utilizan la estrategia de filtración dejando escapar los medios fluidos y reteniendo los componentes sólidos con distintos propósitos, por ejemplo, eliminar partículas sólidas o capturar presas que se encuentran en el agua o en el aire.

LÍMITES FÍSICOS Y ESTRUCTURALES AL RENDIMIENTO BIOMECÁNICO.

Evidentemente existen límites físicos y estructurales evidentes a la resistencia y rendimiento de los organismos biológicos. Son productos de la optimización conseguida por la Evolución durante millones de años de actuación. La composición y estructura de los tejidos y órganos, la forma y la

capacidad funcional que podemos encontrar a lo ancho y a lo largo de la enorme diversidad de especies que existen en la Biosfera se ha ido consiguiendo de forma progresiva. En el nivel multicelular encontramos en la actualidad varios millones de especies de organismos (tanto animales como vegetales) de diversos tamaños y formas, capaces de hacer frente a las condiciones ambientales más diversas con rendimientos muchas veces extraordinarios. Muchas de las que existieron en épocas anteriores han desaparecido, a veces por causas accidentales, a veces por la propia dinámica asociada a especializaciones extremas que acabaron siendo incompatibles con la competición con los elementos naturales y con otras especies. Como analizaremos en el último apartado, desconocemos aún muchas cosas de los principios que han producido y producen esta diversidad.

Si nos centramos en la especie humana, recordemos brevemente que los materiales responsables de su rendimiento físico son comunes a todo el grupo de organismos del que formamos parte, los vertebrados, un sector pequeño de la enorme diversidad del mundo animal. Un grupo importante de tejidos, los tejidos conectivos son responsables de la resistencia pasiva y estructural de nuestro cuerpo, mientras que las distintas formas de tejido muscular son responsables de la respuesta activa, del movimiento de nuestro cuerpo.

Desde el punto de vista biomecánico, existen tres tipos principales de tejidos conectivos: Hueso, tendones y articulaciones. Sus propiedades se han optimizado durante la evolución para que se hayan podido alcanzar rendimientos tan espectaculares en los distintos vertebrados. En los tejidos conectivos predominan los componentes extracelulares, la llamada matriz extracelular, constituida por cantidades diferentes de cuatro grandes grupos de componentes moleculares sintetizados y excretados por sus células integrantes (fibroblastos, condrocitos, osteocitos): a) los colágenos de tipo fibrilar, responsables de la resistencia a la tracción, b) la elastina, una proteína quizás derivada del colágeno y responsable de la elasticidad, c) los depósitos de fosfato cálcico, el hidroxiapatito, responsable de la resistencia a la compresión y d) los proteoglicanos, muy hidratados y ricos en cargas negativas, responsables de la fijación y transferencia de cationes y otros factores reguladores, de la hidratación, lubricación y almahodillamiento, funciones típicas de muchos de estos tejidos.

El hidroxiapatito aparece sólo en el tejido óseo, responsable de su resistencia a la compresión, mientras que el colágeno, el otro gran componente de los huesos, es responsable de la resistencia a la tracción. En los tendones, fascias y ligamentos predomina el colágeno, con cantidades definidas de elastina, que depende del mayor o menor papel de la elasticidad de los mismos. Finalmente, los proteoglicanos, presentes en todos los tejidos conjuntivos en cantidades diferentes, dota al cartílago y en consecuencia a las articulaciones de muchas de sus propiedades, entre otras una cierta resistencia pasiva a la compresión.

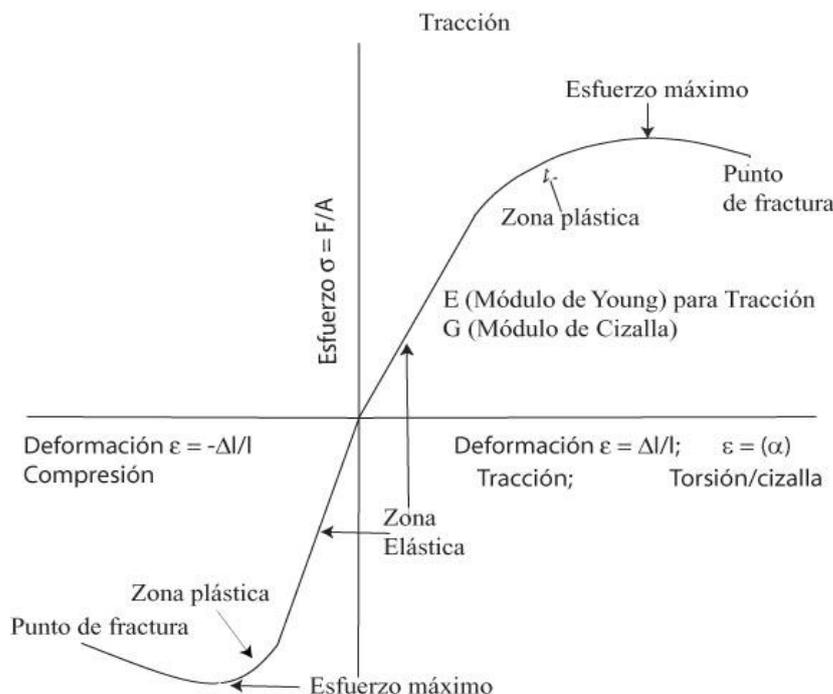
Para analizar fácilmente el comportamiento de las estructuras, tanto naturales (biológicas) como artificiales (ingeniería) es muy útil utilizar los llamados diagramas esfuerzo-deformación (Figura 1). Consisten en representar la relación empírica que se establece entre la fuerza aplicada (normalizada respecto a la superficie de aplicación) respecto a la deformación que se produce, la variación en la longitud (normalizada respecto a la longitud original) en el caso de la tracción o compresión, o el ángulo que experimenta el cuerpo en el caso de la torsión.

Por razones que no vamos a analizar aquí y como puede verse en la citada Figura, estos diagramas son muy semejantes cualitativamente. Cambian sólo sus valores cuantitativos. Para materiales homogéneos, la primera parte del diagrama es una línea recta cuya pendiente es el módulo de Young E , en el caso de la tracción (cuadrante superior derecha) o de la compresión (cuadrante inferior izquierda), o el módulo de cizalla G en el caso de la torsión (Cuadrante superior derecha). Esta parte lineal se llama también elástica por ser reversible.

En esta zona del diagrama, cuando deja de actuar la fuerza, el cuerpo recupera su dimensión y forma original. Si el material se somete a un esfuerzo mayor, el material cede, la respuesta deja de ser

lineal, nos encontramos en la zona plástica. Dependiendo del material y de lo que hayamos avanzado en el proceso, la deformación plástica no es totalmente reversible y si la fuerza deja de actuar, no se recupera completamente la situación original. La acumulación de estas deformaciones residuales puede producir que el material cambie su respuesta a la deformación, dando lugar a una situación de fatiga del mismo que puede resultar catastrófica, si como suele ocurrir disminuye la zona de respuesta lineal y se alcanza antes el valor máximo alcanzable por la deformación, el punto de ruptura del material, representado por el punto donde se interrumpe el gráfico.

FIGURA 1



Los tejidos biológicos son capaces de compensar estos procesos de fatiga, por acción de sus importantes mecanismos de reparación, una propiedad biológica esencial que contribuye a preservar las propiedades originales de los biomateriales. Aunque existen diferencias en la curva de respuesta de los distintos materiales, es curioso resaltar que en general el punto de ruptura, la deformación máxima, no coincide con el punto del esfuerzo máximo, es decir la fuerza máxima que es capaz de soportar el cuerpo sin romperse, también indicada en la figura. Esto suele ocurrir porque el material antes de romperse experimenta un proceso de cambio de dimensión suplementaria, que precede a la ruptura.

Desde el punto de vista del análisis que estamos realizando, existen dos parámetros interesantes para valorar el comportamiento mecánico de un material. Su módulo de Young (o de cizalla, dependiendo del tipo de deformación) que es mayor cuando más resistente es el material, acepta mayores esfuerzos sin deformarse mucho. Por otra parte, tenemos el esfuerzo/deformación máximos que el material puede soportar. Si simplificamos el análisis y aceptamos que sólo existe una respuesta lineal, coincidirán los valores del esfuerzo y deformación máximos lo que unido a la pendiente dada por el módulo, definirá la respuesta completa del cuerpo.

Los materiales compuestos presentan diagramas de esfuerzo-deformación más complejos. Por ejemplo, en el caso de los tendones, presentan un aspecto como el representado en la Figura 2.

Vemos que existe una zona inicial donde el material presenta una menor resistencia, que pronto se transforma en una respuesta más importante que sigue el esquema mencionado en el párrafo anterior. Distintos tejidos conjuntivos dependiendo de la organización de sus fibras de colágeno y de su riqueza en elastina presentan zonas iniciales más o menos importantes adaptadas a las características de los esfuerzos y movimientos que tiene que soportar aquella parte del organismo. Pero

si consideramos el diagrama simplificado, lineal, el hueso por ejemplo tiene un valor de módulo de Young para la compresión de $9.000 \text{ Newtons/mm}^2$, y un esfuerzo máximo de compresión de 170 Newtons/mm^2 , lo que permite fácilmente ver que el hueso se romperá cuando sufra una compresión del 1,9%, bueno, algo mayor ya que entraríamos en la zona no lineal del diagrama. Por comparación, el acero presenta un módulo de Young de $200.000 \text{ Newtons/mm}^2$ y un esfuerzo máximo de 500 Newtons/mm^2 , valores muy superiores al hueso, pero que indican que el acero se rompe cuando alcanza una deformación de sólo el 0,25%.

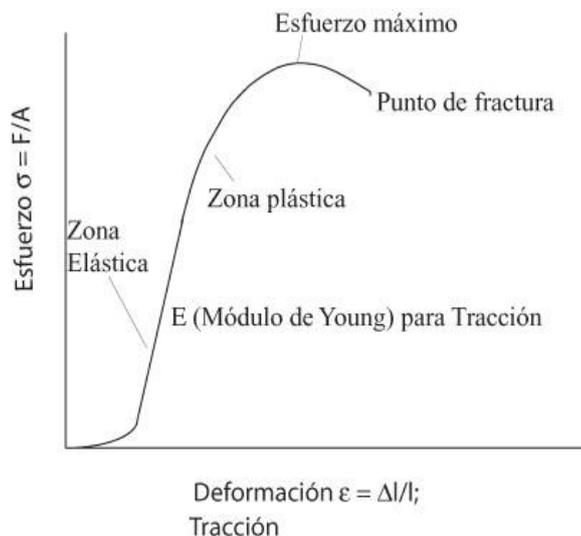


FIGURA 2

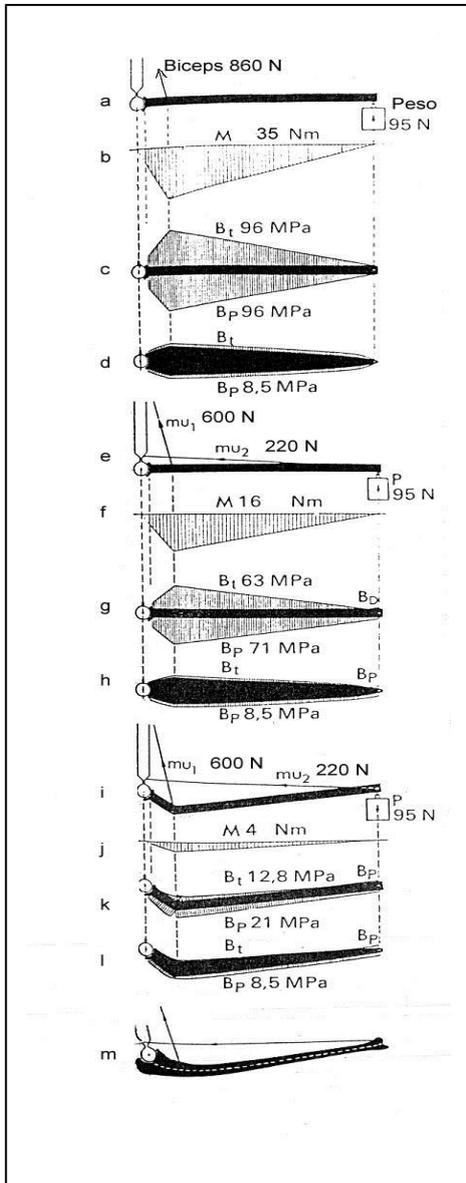
Una consecuencia de este planteamiento es darse cuenta de que nuestro sistema osteoarticular experimenta frecuentemente esfuerzos cercanos a estos valores máximos. Las fracturas deberían estar pues al orden del día. Aparte de los mecanismos de reparación ya mencionados, esto no es así por la adaptación dinámica de nuestros movimientos y posturas que contribuyen a evitar que el esfuerzo se concentre en un punto exclusivo de nuestro sistema osteoarticular. Por ejemplo en el caso de nuestras piernas, un cálculo sencillo basado en la base teórica que acabamos de desarrollar, nos permite concluir que una caída desde una altura pequeña puede producir la rotura de un hueso, por ejemplo la tibia si todo el esfuerzo se concentrara allí. Podemos caer de dos formas, bien doblando las rodillas, haciendo que la energía de la caída se contrarreste por la fuerza muscular multiplicada por el recorrido durante el que se ejerce, bien de forma rígida sin doblar las rodillas, situación en la que es la compresión ósea la que se somete el hueso produce una fuerza máxima que se ejerce durante el recorrido de la deformación hasta alcanzar la compresión máxima que un hueso puede aceptar.

Hemos visto que el esfuerzo máximo de compresión es de 170 Newtons/mm^2 . Si la sección de la tibia es de unos 3 cm^2 , su longitud $0,35 \text{ m}$ y la deformación, la variación de tamaño, máxima del 1,9%, y siendo la energía de la caída, mgh , ésta debe disiparse mediante la deformación de la tibia, es decir, ser igual a $F \Delta l$, por lo que el valor de la altura máxima en que una persona de unos 70 Kg de peso podría caer sin romperse la tibia sería de $h = (170)(300)(0,019)(0,35)/(700) = 0,48 \text{ m}$ que es el orden de magnitud de la altura máxima que podríamos soportar si caemos rígidamente sin doblar las piernas, y sin apoyarnos en ninguna otra parte del cuerpo. Viene a ser la altura de una silla. No es sorprendente pues, que con el envejecimiento, la pérdida de coordinación aumente la probabilidad de las fracturas.

Otro aspecto a mencionar en este análisis muy simplificado es que en los puntos críticos, por ejemplo, en las zonas más alejadas de los ejes centrales (también llamado neutros) de las deformaciones, por ejemplo, en los esfuerzos que se producen durante la deformación cuando se somete un cuerpo a flexión son muy superiores a los producidos por las deformaciones de compresión

o tracción pura. Lo mismo pasa en el caso de la deformación de torsión. Por tanto la estrategia del organismo es adoptar por un lado una forma denominada forma de resistencia uniforme, así como una disposición y estructura del sistema músculoosteoarticular que minimice dichas deformaciones, aunque sea a cambio de aumentar las fuerzas de compresión. Podemos ver un ejemplo muy claro de este asunto en el esquema representado en la Figura 3.

FIGURA 3



Consideremos en este caso que el cúbito, el hueso principal de nuestro brazo fuese un cilindro rígido a de unos 0,3 m de longitud y de 2 cm de diámetro transversal con el que tratamos de sostener un peso de 10 Kg o lo que es lo mismo una fuerza de 95 Newtons. Veremos que el bíceps que se encuentra insertado en la zona cercana de la articulación del codo, a unos 4 cm de la misma, tendría que realizar una fuerza de unos 860 Newtons para que el brazo permaneciese recto, pero claro, la consecuencia es que en el cilindro del cúbito se experimentaría una deformación lateral para contrarrestar el momento de la fuerza aplicada (momento que se calcula como el producto de la fuerza por la distancia de aplicación).

Esto nos lleva a visualizar un triángulo de momentos b que alcanza su valor máximo en el punto de inserción del bíceps y luego va disminuyendo hasta alcanzar la articulación, valor máximo que llega a alcanzar los 35 Newtons metro, un valor que no parece muy grande pero que produce que el cilindro c tienda a deformarse hacia abajo con el consiguiente alargamiento de la parte de arriba del cilindro y acortamiento de la parte de abajo, lo que lleva a un considerable esfuerzo de dobladura de 96 Megapascuales o en las unidades que hemos utilizado anteriormente de 96 Newtons/mm², muy cercano al valor de fractura del hueso que hemos calculado en el ejemplo anterior. La solución es aumentar el grosor del cúbito pero no uniformemente sino siguiendo el contorno del triangulo de momentos, dando lugar a lo que hemos denominado cuerpo de estructura uniforme d , que ahora experimenta un esfuerzo de dobladura de sólo 9,6 megapascuales, sólo un 10% del calculado originalmente y bastante más alejado del punto de fractura.

Pero no nos quedemos sólo en esto. Si pensamos que existen otros músculos como el braquiorradial o flexor de la mano que se representa un poco más abajo e , vemos que podemos aliviar el esfuerzo del bíceps y además disminuir un poco el grosor del cúbito h . Si además analizamos lo que pasa si introducimos un ángulo en el mismo, vemos como casi se anula el triángulo de momentos y el esfuerzo de dobladura, llegando a la estructura representada casi al final de la figura (k), que vemos que casi reproduce exactamente la morfología de nuestro cúbito, representada al final de la misma (l). Vemos pues que nuestro sistema músculoosteoarticular se ha optimizado para hacer frente a una serie de esfuerzos necesarios para nuestras actividades. Evidentemente en las actividades deportivas, estos límites se aproximan de forma peligrosa a los límites mencionados traspasando la barrera de lo posible. La selección de las constituciones más apropiadas, el entrenamiento, la técnica en la realización de los ejercicios, todos son aspectos que han ido evolucionando desde que se establece un determinado deporte para ir acercándose asintóticamente a estos máximos literales.

Por razones del espacio y porque este análisis sólo intentaba ilustrar unos conceptos que esperamos sean ya evidentes al lector, sólo hemos abordado unos aspectos mínimos. Por ejemplo, no hemos mencionado nada de las diferentes estrategias de la disposición y contracción de los distintos tipos de fibras musculares, ni la importancia de la oxigenación y de la vascularización o no de los distintos tejidos, etc.

CAMBIO GENÉTICO Y SELECCIÓN FENÉTICA. LOS LÍMITES REALES DE LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA.

Las especies biológicas se caracterizan por albergar un conjunto de variantes genéticas que tienen como consecuencia que sus fenotipos se muevan alrededor de unos valores medios que podemos considerar como representativos y optimizados desde la perspectiva de la tecnología biológica. Estos valores medios muestran oscilaciones poblacionales que permiten que los organismos sean seleccionados. Aquellos organismos más adaptados a las condiciones del medio ambiente tendrán una mayor probabilidad de reproducción y por tanto de transmitir sus variantes genéticas a la descendencia. De hecho esta variabilidad es el sustrato de la evolución biológica, que de forma gradual, lenta, puede llevar aparejada la desviación de esas características medias de forma que se mantenga el acoplamiento entre las consecuencias funcionales de estos cambios y las condiciones ambientales y la competición a la que los organismos de cada especie tienen que hacer frente.

A pesar de los enormes avances científicos de los que hemos sido testigos, seguimos siendo ignorantes de los mecanismos detallados que producen los diferentes fenotipos a partir de un genotipo determinado y de cómo las condiciones ambientales los modulan (Figura 4). Recordemos que llamamos fenotipo a las características anatómicas y funcionales de cada individuo de una especie determinado, mientras que genotipo es el conjunto de genes que el individuo contiene en su genoma. Sabemos sin duda que las características fenotípicas vienen determinadas por las propiedades del genotipo del organismo, pero no cómo este proceso se lleva a cabo en detalle. Recientemente, el proyecto genoma ha contribuido a culminar una etapa anterior de la investigación biológica.

Por primera vez en la historia de la Ciencia, conocemos el repertorio completo de los genes que se encuentran codificados en el genoma de unas cuantas especies modelo incluyendo la humana. Es de esperar que la lista de especies con el genoma secuenciado vaya incrementándose paulatinamente en los próximos años. Más lento va a ser el proceso por el cual identificaremos el papel fisiológico de los mismos. En estos momentos, podemos decir que sabemos lo que hacen una pequeña cantidad de los genes, entre el 10 al 20% de los que se encuentran en nuestro genoma. Probablemente, los que conocemos y que habían sido estudiados con anterioridad, corresponden a un subconjunto muy importante de nuestro genoma.

La pregunta es pues, ¿qué hace el otro 80% del genoma?. El primer paso para responderla será identificar qué hacen las proteínas por las que en general codifican. Incorporar a todo el repertorio genético los mecanismos detallados que nos permitan entender las propiedades fenotípicas de los organismos es un desafío aún más importante, que seguramente consumirá el esfuerzo de la comunidad científica durante los próximos decenios. Con esos mecanismos detallados acabaremos entendiendo por ejemplo la importancia del enorme número de isoformas distintas de los productos génicos que se generan en el organismo aumentando de forma exponencial la complejidad del proceso, o las consecuencias de las alteraciones genéticas, de las enfermedades producidas por las inevitables copias deficientes de algunos de dichos genes que necesariamente se albergan en nuestro genoma.

- B) La introducción de mejoras en el entrenamiento para desarrollar al máximo las características apropiadas para un tipo de actividad (a veces alejadas las unas de las otras). Evidentemente este aspecto puede también llevarse a límites inaceptables, bien por la utilización de tratamientos hormonales/farmacológicos, bien por la polarización abusiva de las vidas de personas muy jóvenes en esta dirección. De nuevo, hay que analizar las consecuencias de estos tratamientos en las personas comunes integrantes de nuestras sociedades para mejorar nuestra calidad de vida sin caer en las trampas de los excesos con consecuencias negativas para nuestro bienestar.
- C) Siempre puede esperarse un avance puramente metodológico en la forma como se lleva a cabo una actividad deportiva que permita desplazar aún más los límites de los que hemos hablado. Este factor es cada vez menos probable que juegue un papel destacado en la evolución futura del deporte.

En conclusión, las propiedades biomecánicas e intelectuales de la especie humana ponen un límite claro a su evolución. Hemos visto la imposibilidad actual (e incluso ética) de sobrepasar estos límites. ¿Cómo se podrá mantener la atención de las distintas comunidades humanas en los aspectos espectaculares del deporte? ¿Superaremos los aspectos atávicos y tribales con los que se nos manipula y engaña? La respuesta se encuentra como siempre en la educación, en el conocimiento y en el respeto a la diversidad. Esa diversidad tanto en el espectro de las especies biológicas como en la sociedad humana es nuestro patrimonio, es la herencia que hemos recibido de nuestros ancestros que se van fundiendo con los de otras especies biológicas conforme nos alejamos hacia atrás en el tiempo. Admiraremos, conservaremos, utilizaremos esta diversidad.

REFERENCIAS

- Gurdon, J.E. (1999): *The science of Strong Materials* 2d ed. Penguin, London.
- Kane, J.W.; Sternheim, M.M. (1998): *Física*, Reverté, Barcelona.
- Hoppe, W. y colaboradores (1982): *Biophysics*, Springer, Berlin.
- Vogel, S. (2000): *Ancas y palancas: Mecánica natural y mecánica humana* Tusquets, Barcelona.
- Vogel, S. (2002): *Prime mover a natural history of muscle*, Norton, London.

Páginas Web:

<http://knowcat.ii.uam.es/BDD>

<http://www.bq.uam.es/Clases/Medicina/biofisica/biofisica.html>

(En la primera de estas páginas, el lector interesado puede encontrar información en castellano sobre el estado de la Biología del Desarrollo. En el segundo y en breve se podrá disponer de acceso a los guiones de Biomecánica que facilitamos a los alumnos de Medicina en la Universidad Autónoma de Madrid.)