

# El fundamento de la fisiología del ejercicio

Francisco J. Calderón Montero

Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. INEF.

---

**Recibido:** 12.02.2015

**Aceptado:** 09.04.2015

## Resumen

Los dos grandes objetivos de estudio e investigación en fisiología del ejercicio son la respuesta o ajuste al ejercicio agudo y la adaptación morfo-funcional al entrenamiento. La respuesta es el cambio temporal de una función que desaparece una vez finalizado el ejercicio. La adaptación se produce cuando por una modificación de la estructura y/o función se produce una mejor respuesta frente a un mismo estímulo. A lo largo de la historia de la fisiología del ejercicio, estos dos grandes objetivos han sido llevados a cabo por fisiólogos con una formación muy sólida en el funcionamiento del organismo en condiciones de reposo, que les permitía aplicar dicha formación a una situación de estrés como es el ejercicio. En razón a ello, pienso es trascendental que todos aquellos que se dedican a los dos grandes objetivos de la fisiología del ejercicio sepan que hay que profundizar en los mecanismos que explican las diferentes funciones de los aparatos y sistemas del organismo en estado de reposo. De forma sencilla y elemental, en este artículo se repasa la respuesta y adaptación de: sistema cardiovascular, aparato respiratorio, metabolismo, los dos grandes ignorados de la fisiología del ejercicio (aparato digestivo y riñón) y finalmente el sistema nervioso. Este análisis elemental se basa en la experiencia personal de enseñar la fisiología humana durante más de 30 años, pero siempre intentando seguir el razonamiento coherente de que sucede durante el ejercicio al organismo en general y a cada uno de los aparatos y sistemas en particular. Para conseguir que un docente en fisiología del ejercicio alcance el mejor nivel, pienso que debe estudiar o repasar los textos de fisiología humana y llevar a cabo un razonamiento crítico de los dos grandes objetivos de estudio mencionados. Sólo de este modo el fisiólogo del ejercicio podrá intentar alcanzar un nivel de excelencia.

## Key words:

Fisiología del ejercicio.  
Respuesta cardiovascular.  
Respuesta respiratoria.  
Respuesta metabólica.  
Respuesta del sistema nervioso.

## The basis of exercise physiology

### Summary

The two main objectives of study and research in exercise physiology are the response or adjustment to acute exercise and training morph-functional adaptation. The response is the temporal change of a function that disappears once finished the exercise. Adaptation occurs when a change in the structure and / or function produces a better response to the same stimulus. Throughout the history of exercise physiology, these two major objectives have been carried out by physiologists with a very strong background in the functioning of the body at rest, which allowed them to apply this training to a stressful situation as is exercise. Because of this, I think it is crucial that all those engaged in the two main objectives of exercise physiology know you have to delve into the mechanisms that explain the different functions of the organ systems of the body at rest. Cardiovascular system, respiratory system, metabolism, two large ignored in exercise physiology (digestive and kidney) and finally the nervous system in this article are reviewed elementary and simple. This elemental analysis is based on personal experience of teaching human physiology for over 30 years, but always trying to keep consistent reasoning that happens during exercise the body in general and each particular organ systems. To get a teaching degree in exercise physiology reach the best level, I think you should study or review the texts of human physiology and conduct critical thinking of the two main objectives of the study mentioned. Only in this way exercise physiologist can try to reach a level of excellence.

## Palabras clave:

Exercise physiology.  
Response of cardiovascular system.  
Response of respiratory system.  
Response of metabolism.  
Response of the nervous system.

---

**Correspondencia:** Francisco J. Calderón Montero

E-mail: franciscojavier.calderon@upm.es

## Introducción

Cuando se realiza una pequeña revisión sobre la historia de la fisiología del ejercicio<sup>1-5</sup> se puede formular la siguiente pregunta: ¿la fisiología del ejercicio forma parte independiente de la fisiología, como parece apuntar los numerosos libros existentes, o es simplemente el resultado de aplicar el sentido común apoyado en el conocimiento de cómo funciona el organismo en estado de reposo?

De forma general y simple la fisiología del ejercicio ha abordado dos aspectos importantes: la respuesta o ajuste y la adaptación. Estos cambios pueden ser temporales y desaparecer después del ejercicio. Es lo que se conoce como son las **respuestas** o **ajustes**. Sin embargo, cuando las variaciones permanecen en el tiempo, bien sea de la estructura, de la función o ambos, facilitando una mejor respuesta frente al mismo estímulo se habla de **adaptaciones**. La consecuencia de la adaptación biológica es que el organismo responde mejor frente al mismo estímulo. Desde el punto de vista estrictamente fisiológico, es en los deportes denominados de alto componente dinámico y moderado estático<sup>6</sup> dónde se pueden valorar mejor la respuesta y adaptación del organismo. Un aspecto interesante a resaltar es como se aborda en los libros de fisiología del ejercicio el proceso de adaptación al entrenamiento. Normalmente, para cualquier variable fisiológica estudiada durante el ejercicio, se comparan sujetos sedentarios con entrenados y nunca personas de similar grado de entrenamiento.

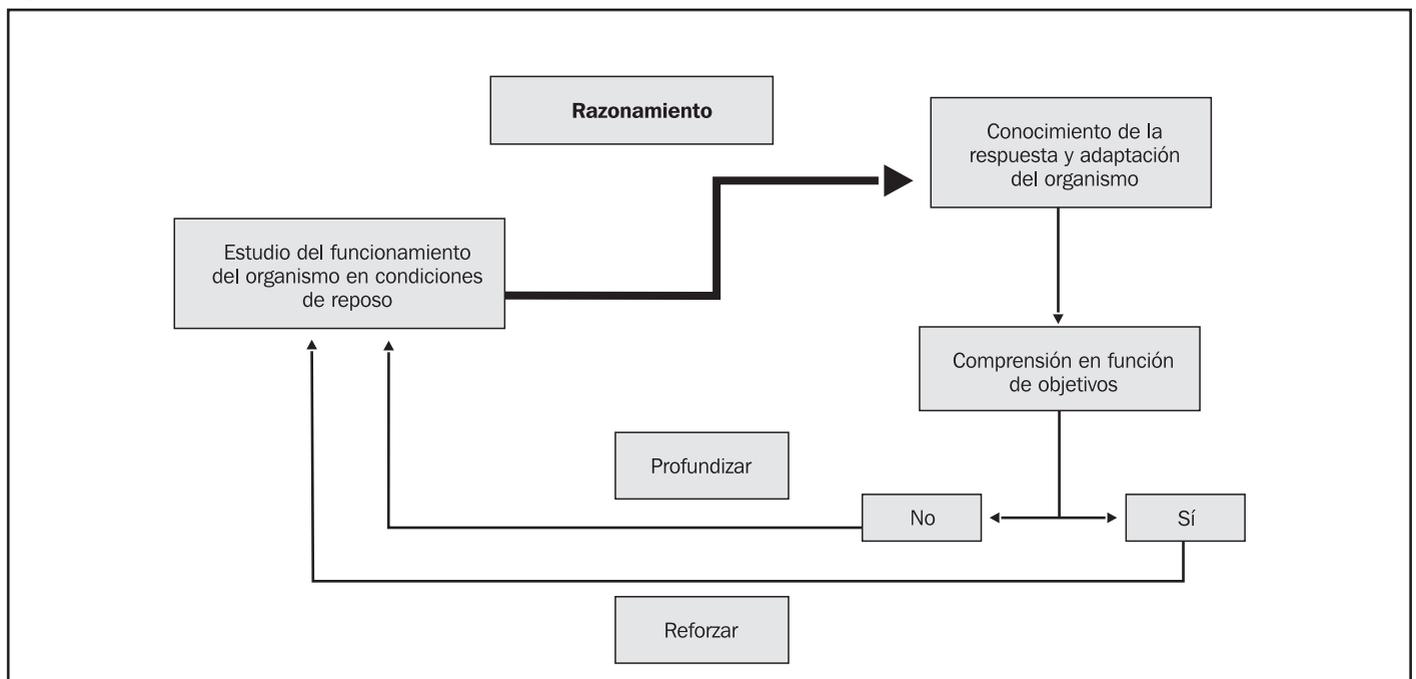
El ejemplo más simple de la diferencia entre respuesta y adaptación es la relación entre la frecuencia cardiaca e intensidad del ejercicio. La función entre estas dos variables es la misma ( $HR = a \cdot \text{intensidad} + b$ ) tanto si se trata de la respuesta como de la adaptación. La diferencia estriba en que a una intensidad relativa y submáxima, cuando se ha producido la adaptación de este órgano, la frecuencia cardiaca es menor.

Ahora bien, ¿Qué formación debe de tener una persona dedicada al estudio de la respuesta y adaptación al ejercicio y entrenamiento, respectivamente?. El denominado "fisiólogo del ejercicio" debería tener un conocimiento lo más profundo posible en el funcionamiento del organismo en condiciones de reposo y a ser posible una gran experiencia en modelos animales diferentes al ser humano. Esta era la formación de Archival Hill<sup>1</sup> o todos los que contribuyeron al conocimiento en fisiología con un interés en el ejercicio, como por ejemplo todos los que estuvieron trabajando en el laboratorio de Harvard<sup>3</sup> en Estados Unidos de Norteamérica o el gran desarrollo que experimentó la fisiología del ejercicio en los países escandinavos<sup>7,8</sup>. Cómo señala Calderón<sup>9</sup> de forma esquemática (Figura 1), dependiendo del nivel que se pretenda alcanzar, basta con tener conocimientos profundos de fisiología y emplear el razonamiento lógico que supone poner al organismo a una situación de estrés como es el ejercicio físico.

Esta concepción de la fisiología del ejercicio no es, naturalmente, compartida por la gran mayoría de los fisiólogos del ejercicio como se puede mostrar por el número de textos existentes<sup>5,10-16</sup>. Por la forma de abordar los diferentes temas, pensamos que estos autores opinan que ésta "parte de la fisiología humana" que tiene entidad propia. Cómo señalaba Pasteur "*no hay ciencias aplicadas sino aplicación de las ciencias*".

En los siguientes epígrafes se trata de demostrar la concepción formulada, analizando la respuesta y adaptación de diferentes aparatos y sistemas del organismo. Fácilmente se entenderá que el análisis tiene que ser elemental, de manera que las referencias bibliográficas son necesariamente trabajos de revisión y textos. Pensamos que es procedente afianzar esta concepción, ahora que la enseñanza de la fisiología del ejercicio ha dejado de ser patrimonio de los médicos y biólogos, cuya formación a todas luces es congruente con la concepción que se formula.

Figura 1.



## Comprensión de la respuesta y adaptación del corazón

El mayor grado de adaptación<sup>17,18</sup> se produce a consecuencia del entrenamiento de resistencia en deportes con "alto componente dinámico" y bajo-moderado estático de la clasificación de Mitchell<sup>6</sup>.

### Respuesta o ajuste del corazón al ejercicio dinámico de intensidad creciente

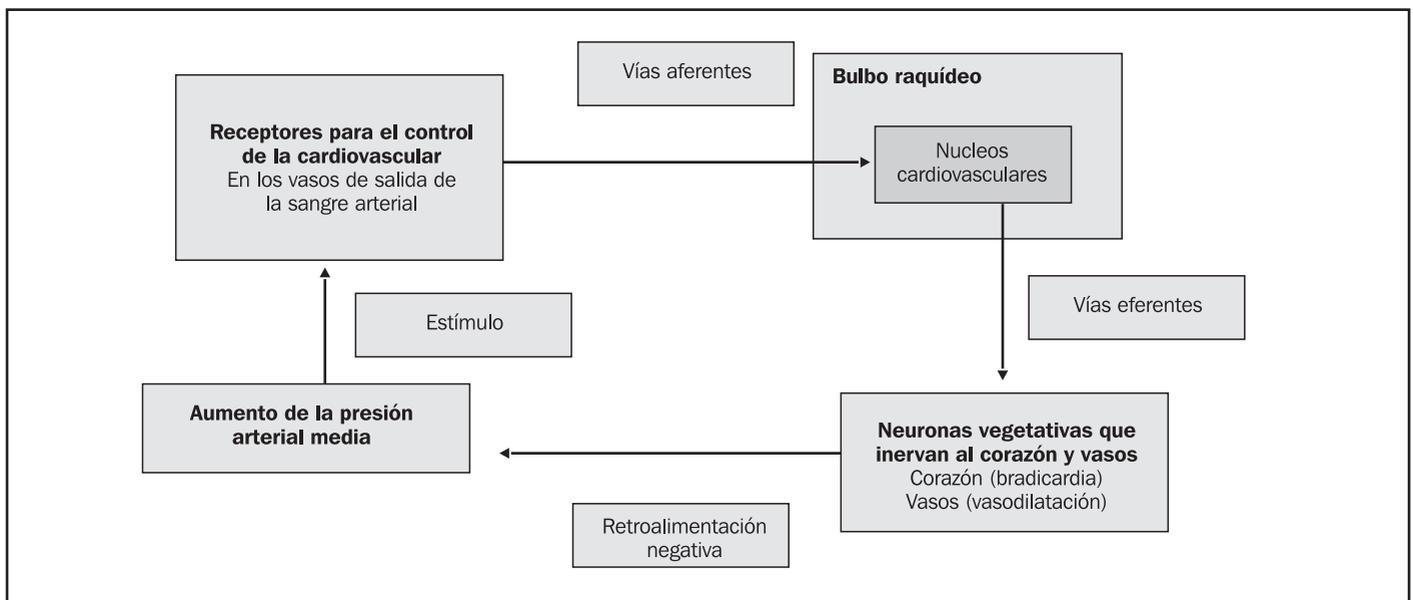
La función gasto cardíaco/intensidad ( $Q=a \cdot \text{intensidad}+b$ ) es intuitiva. Sin embargo, cuando se analizan los factores determinante del gasto cardíaco, volumen sistólico (VS) y frecuencia cardíaca (HR), es complejo definir las funciones VS/intensidad y FC/intensidad de forma aislada, dada la interacción entre ambas variables y la dificultad de aislar los factores que las afectan. Por ejemplo, la función ventricular sistólica depende de: la precarga, la postcarga, la contractilidad y la sinergia ventricular. La función diastólica depende de: la relajación, la distensibilidad, la función auricular, la competencia valvular, ritmo y frecuencia cardíaca y de otros factores (pericardio, precarga, postcarga y flujo coronario). A todos los factores, estrictamente fisiológicos, se añaden las condiciones mecánicas (posición, tipos de ejercicio, etc) y de otra índole (edad, sexo etc) que puede afectarles.

Determinar cómo se produce el incremento del gasto cardíaco y si la relación Q/intensidad es realmente lineal o considerando la linealidad si se produce un cambio de pendiente no es una tarea fácil si no se tiene conocimiento profundo, y aun teniéndolo, de los factores que determinan el gasto cardíaco. Porque además de los estrictamente mecánicos (véase más arriba) hay que tener en consideración los mecanismos neurofisiológicos (Figura 2). Por consiguiente, **para conocer en toda su dimensión la respuesta del corazón al ejercicio hay que estudiar en profundidad la fisiología cardíaca en reposo.**

## Adaptación del corazón al entrenamiento de resistencia

En la actualidad se puede afirmar que a consecuencia del entrenamiento se produce una dilatación de las cavidades cardíacas y espesores del miocardio de grado moderado. El proceso de adaptación cardíaca es un fenómeno complejo de analizar por varias razones. En primer lugar, porque para comprender el mecanismo es necesario recurrir a modelos experimentales en animales, de manera que la traslación al ser humano es difícil. En segundo lugar, porque las técnicas de imagen y de valoración de la función ventricular no permiten discriminar cambios morfológicos (diámetros y espesores del miocardio) o funcionales (parámetros de función ventricular). Tres estudios pueden ilustrar la dificultad señalada. En primer lugar, Calderón *et al*<sup>19</sup> realizaron un metaanálisis donde estudiaron las diferencias encontradas en las medidas ecocardiográficas entre dos situaciones entrenamiento y desentrenamiento. Los cambios registrados eran de 2 a 3 mm y las diferencias durante el entrenamiento eran de unas décimas de milímetro. Los autores señalan que la ecocardiografía es una técnica poco sensible a la hora de determinar pequeños cambios. Obviamente, el estudio presenta una considerable limitación a la hora de valorar la adaptación cardíaca al entrenamiento: no valoraron variaciones de volumen determinados por métodos muy precisos basados en figuras geométricas de los ventrículos. En segundo lugar, en un análisis longitudinal de 5 años, Calderón *et al*<sup>20</sup> encontraron que las dimensiones cardíacas se mantenían estables. Finalmente, Gledhill, Cox *et al*<sup>21</sup> para justificar que el volumen sistólico aumenta durante todo el ejercicio y no se produce "plateau", como era comúnmente admitido, sugieren que es debido a una mejor función sistólica y también a una mejora en la relajación y distensibilidad. **Estos tres ejemplos nos llevan a considerar la necesidad de estudiar en profundidad el proceso de adaptación cardíaca.**

Figura 2.



## Compresión de la respuesta y adaptación del aparato respiratorio

La función respiratoria durante el ejercicio ha sido considerablemente más estudiada que la morfología del pulmón. Basándose en el modelo monoalveolar simple pero irreal, las funciones de ventilación ( $V_E$ ), difusión ( $D_L$ ), relación ventilación/perfusión ( $V_A/Q$ ) y transporte sanguíneo de los gases ( $Hb-O_2$  y  $Hb-CO_2$ ) han sido ampliamente analizadas siempre en relación con la respuesta y menos con el proceso de adaptación.

### Respuesta de las funciones respiratorias. Ventilación ( $V_E$ ), difusión ( $D_L$ ), relación ventilación/perfusión ( $V_A/Q$ ) y transporte sanguíneo de los gases ( $Hb-O_2$ y $Hb-CO_2$ )

La relación ( $V_E = a \cdot \text{intensidad} + b$ ), es, en principio, lineal. Sin embargo, está sobradamente demostrado que a partir de cierta intensidad la relación  $V_E/\text{intensidad}$  pierde la linealidad. El mecanismo fisiológico que explica la pérdida de linealidad sigue siendo una incógnita. La  $D_L$  parece natural pensar que aumente en relación directa a la intensidad dado su forma de expresión más simple

$$D_L = \frac{S \cdot \Delta P_G \cdot K}{\delta}$$

Cuando en términos neurofisiológicos se produce un "mayor reclutamiento pulmonar" (aumento de la superficie de intercambio) la difusión aumenta de forma proporcional a las necesidades. Igualmente obvio es que la relación entre el aire que moviliza el alveolo y el flujo de sangre que circula por éste ( $V_A/Q$ ) debe mantenerse próximo a la unidad, lo que indicaría una proporcionalidad entre las funciones cardiaca y respiratoria. Finalmente, como el transporte de gases es muy dependiente de la hemoglobina y la concentración de ésta no cambia respecto al fenómeno de la respuesta, es obvio que, ajustando los efectos Haldane y Bohr, el mayor suministro de oxígeno y extracción de dióxido de carbono, sólo se produce por el incremento del gasto cardiaco.

Sin embargo, el análisis de sentido común realizado apoyado en el conocimiento de los parámetros respiratorios no es tan simple. De hecho, el ajuste entre la mecánica para la locomoción y la mecánica respiratoria que determinan la ventilación alveolar ( $V_A$ ) no se encuentren coordinadas a partir de cierta intensidad<sup>22</sup>. Por otra parte, los factores que determinan la "oxigenación" de la sangre ( $D_L$ ,  $Q$  y  $V_A/Q$ ) pueden verse modificados y desencadenar una "hipoxemia fisiológica"<sup>23</sup>.

### Adaptación del aparato respiratorio al entrenamiento de resistencia

Ha sido y es difícil "valorar" la adaptación al entrenamiento del aparato respiratorio. En relación a la morfología, no se ha demostrado que a consecuencia del entrenamiento aumente el tamaño de los pulmones. Respecto a la funcionalidad se puede distinguir entre valoración en reposo y durante el ejercicio. En reposo, por ejemplo, no se han demostrado de forma concluyente diferencias entre los datos espirométricos de deportistas respecto a los sedentarios. De hecho, las ecuaciones de predicción de los parámetros espirométricos sólo tienen

en cuenta la edad y la talla, como indican las normativas de la *American Thoracic Society* (ATS) y *European Respiratory Society* (ERS). Es posible que realizando ajustes con escalas alométricas<sup>24</sup> se puedan determinar diferencias. La mejor función del aparato respiratorio en esfuerzo ha sido demostrada desde hace tiempo<sup>25</sup>, pero se desconoce si el menor ajuste ventilatorio a intensidades submáximas es debido a una modificación de la estructura del parénquima pulmonar que posibilite una mejor distensibilidad pulmonar, a una adaptación de la musculatura respiratoria o ambos. Los músculos respiratorios, como cualquier otro músculo, experimentan una adaptación al entrenamiento<sup>22</sup> que posibilita una mayor eficiencia. Finalmente, olvidar que la mejor mecánica respiratoria tenga su origen en mecanismos neurofisiológicos, tanto de origen encefálico<sup>26</sup> como de origen reflejo<sup>27</sup>, es un error. Cuestión diferente es que se pueda demostrar, pero simplemente haciendo referencia al esquema de la Figura 3 es fácil intuir la adaptación de la función respiratoria por mecanismos neurofisiológicos.

**Se entiende que cuanto mayor sea el conocimiento de la función respiratoria en reposo mayor será la probabilidad de comprender los mecanismos que pudieran explicar la mejor respuesta respiratoria en relación al ejercicio cuando se produce el fenómeno de adaptación.**

## Compresión de la respuesta y adaptación del metabolismo y su regulación

Es necesario reseñar que el término "metabolismo" esté referido a una visión integrada de todos y cada uno de los "metabolismos de los tejidos y órganos implicados", lo cual *a priori* parece una tarea inabordable. Ciertamente es así, si se piensa en la ingente bibliografía por ejemplo sobre el metabolismo del tejido muscular durante el ejercicio. Por ejemplo, en la sección 12 del *Handbook of physiology*<sup>28</sup>, se dedican 9 capítulos (300 páginas) al control del metabolismo energético durante el ejercicio.

### Respuesta metabólica integrada al ejercicio de resistencia

Desde el punto de vista integrador, hay alguna o algunas variables que se deben de mantener constantes durante una nueva situación de homeostasis como la que se produce, por ejemplo, durante la maratón. La glucemia es la variable a mantener constante (Figura 4) durante el ejercicio de resistencia

La razón simple es que el sistema nervioso es gluco-dependiente<sup>29,30</sup>. Ciertamente no en sentido estricto, pues en determinadas circunstancias, lactancia y periodos de ayuno prolongado, puede utilizar otros combustibles<sup>30-32</sup>. Por tanto, durante el ejercicio de resistencia, el metabolismo en general y el hepático en particular tienen dos objetivos bien definidos: 1) la obtención de energía y 2) el mantenimiento de la glucosa. Para estos dos fines, la liberación de hormonas glucorreguladoras permite mantener los mecanismos intrínsecos de regulación interna de las diferentes vías metabólicas. Por ejemplo, las hormonas glucorreguladoras potencian el mecanismo interno de interconversión entre la glucógeno fosforilasa y la glucógeno sintasa. Al mismo tiempo, como las reservas de glucógeno hepático son limitadas, la naturaleza ha

Figura 3.

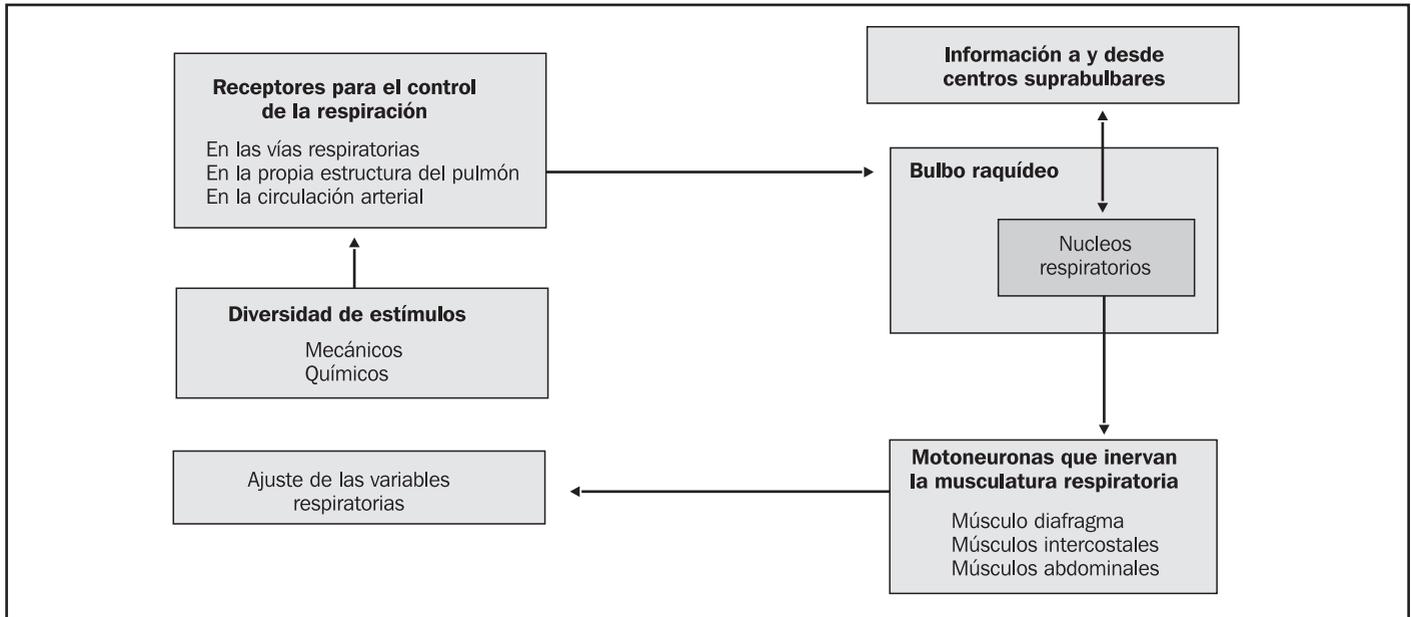
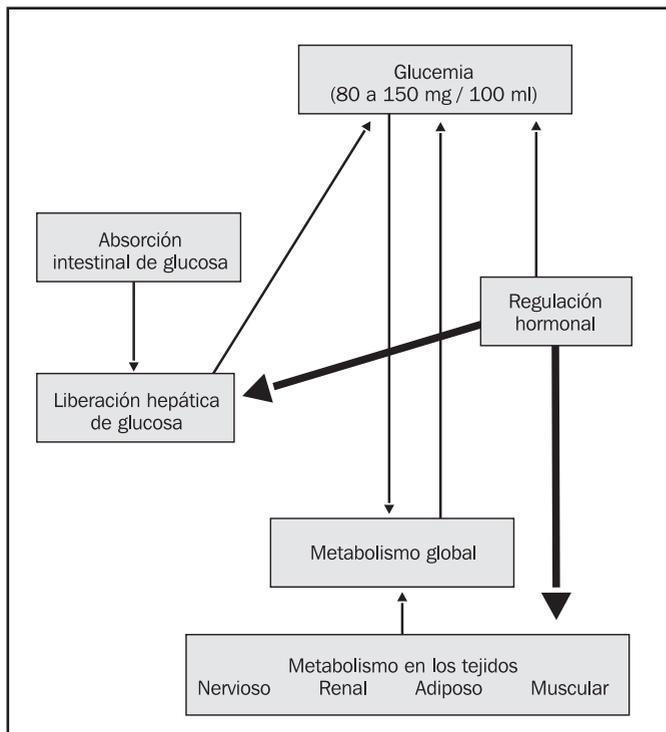


Figura 4.



encontrado la solución tanto para la obtención de energía como para mantener los niveles de glucosa constantes: utilizar los ácidos grasos como fuente de energía. De forma elemental, el ciclo glucosa/ácidos grasos<sup>33-35</sup> permite acometer estos dos objetivos. Curiosidad aparte, merece la consideración que realizan Powers y Howley en su libro<sup>36</sup> relativa a la división de las hormonas en catabólicas y anabólicas, de manera que las hormonas catabólicas aumentarían su concentración,

mientras las catalogadas como anabólicas descenderían sus niveles. Esta visión que puede ser relativamente cierta, por ejemplo para las hormonas pancreáticas, pierde razón de forma general. Así, la STH, claramente hormona clasificable como anabólica, aumenta su concentración relativa en relación a la intensidad del ejercicio.

### Adaptación metabólica integrada al entrenamiento de resistencia

Igualmente abundante es la investigación dedicada a conocer la adaptación del metabolismo a consecuencia del entrenamiento. Simplemente como dato, señalar que en el manual citado anteriormente<sup>28</sup> hay un capítulo<sup>37</sup> donde se aborda uno de los aspectos relativos a las posibilidades de adaptación del tejido protagonista durante el ejercicio.

El entrenamiento mejora la sensibilidad de los mecanismos intrínsecos de control de las rutas metabólicas a la acción de las hormonas<sup>38-41</sup>. De la misma manera, considerando la glucemia como variable objeto de control durante el ejercicio de intensidad submáxima y duración prolongada, parece lógico pensar que el proceso de adaptación afecte también a la actividad y sensibilidad, por ejemplo del hígado a las hormonas, principalmente glucorreguladoras<sup>42</sup>.

### Compresión de la respuesta y adaptación de los dos "grandes ignorados" de la fisiología del ejercicio: aparato digestivo y riñón

Así como en cualquier texto de fisiología del ejercicio hay capítulos dedicados a la respuesta y adaptación de los sistemas cardiovascular, respiratorio, endocrino y del metabolismo, sólo en alguno hay capítulos específicos sobre el aparato digestivo o el riñón<sup>13,43</sup>, pero claramente con

un enfoque fisiopatológico, salvo el de Barbany<sup>16</sup>, donde se explica la repercusión fisiológica que el ejercicio tiene sobre la función renal. Ni siquiera en un manual monográfico sobre ejercicio publicado por la sociedad americana de fisiología<sup>28</sup> se aborda las funciones digestiva y renal.

Dos pueden ser las razones a mi juicio. En primer lugar, se considera que durante el ejercicio estos dos sistemas son “silentes”. En segundo lugar, las dificultades experimentales de valoración de las funciones digestiva y renal en reposo se acentúan durante el ejercicio. No obstante, es cierto que si se han realizado estudios o revisiones<sup>44-50</sup>, por ejemplo, sobre función renal en relación con el ejercicio, pero siempre encaminadas a explicar las manifestaciones pseudopatológicas que se pueden producir a consecuencia del ejercicio.

Consideramos que es un error no prestar atención a estos dos sistemas. Entre otras razones el interés se puede formular en preguntas genéricas tales como: ¿Qué papel cumple el riñón durante la recuperación?, ¿Qué papel cumple el riñón durante ejercicios de duración prolongada?, ¿Cómo se puede saber de nutrición sin estudiar profundamente la función digestiva?, ¿Cómo procesa el hígado todos los nutrientes aportados por el intestino a través de la vena porta? ¿La reducción del flujo sanguíneo renal (FSR) repercute durante la realización del ejercicio sobre la función renal?

En resumen, **si se quiere conocer el papel que cumple el aparato digestivo y el riñón durante o después del ejercicio es necesario estudiar los principios fisiológicos en condiciones normales que rigen: 1) la digestión-absorción de los nutrientes y 2) las funciones glomerular y tubular de la nefrona.**

## Compresión de la respuesta y adaptación del sistema nervioso

Una mínima formación en anatomía y fisiología del Sistema Nervioso (SN) orienta hacia el papel que cumple durante el ejercicio. El SN gobierna tanto el control de la locomoción como la función de todos aquellos sistemas que permiten el aporte de oxígeno y sustratos metabólicos, como por ejemplo los sistemas cardiovascular (Figura 2) y respiratorio (Figura 3). Se comprenderá la dificultad de análisis de respuesta del SN al ejercicio.

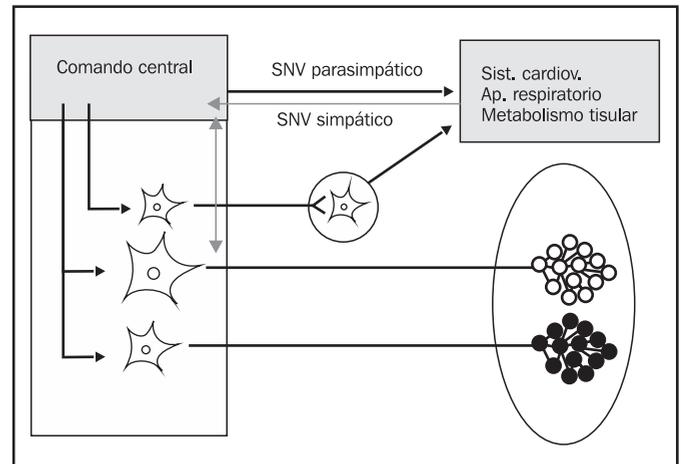
La complejidad es extrema cuando se analiza cómo el SN puede sufrir una adaptación a consecuencia del entrenamiento. La información que se posee proviene de estudios muy parciales bien en animales de experimentación o en seres humanos. Por ejemplo, la modificación de la función muscular con el entrenamiento a través de la información aportada mediante biopsias musculares, no deja de ser una visión sesgada de lo que probablemente ocurre, dado que se analiza el “final”, las fibras musculares, y se ignora lo que sucede “al principio”, las motoneuronas espinales del asta anterior de la médula.

No obstante, a pesar de las dificultades señaladas, a continuación se lleva a cabo un análisis especulativo, ciertamente con base científica, y de sentido común de cómo responde y se adapta el SN.

### Respuesta del sistema nervioso al ejercicio

La importancia del sistema nervioso en la comprensión de la respuesta integrada del organismo al ejercicio queda ilustrada en la Figura 5. Este modelo simplificado determina que:

Figura 5.



- El Sistema Nervioso Somático (SNS) debe de activar secuencialmente las unidades motoras en relación a la intensidad del ejercicio, siguiendo el principio de Hennemann<sup>51,52</sup>, a través de las vías descendentes motoras que establecen sinapsis con las unidades motoras de la musculatura implicada. Es decir, llevar a cabo un patrón motor básico como es la locomoción.
- El Sistema Nervioso Vegetativo (SNV) debe de activar las neuronas del asta intermedio lateral de la médula espinal al tiempo que modular la actividad de las neuronas localizadas en diferentes partes del telencéfalo. Es decir, activar el sistema toraco-lumbar (Sistema Nervioso Vegetativo Simpático = SNVS) y disminuir la actividad del sistema cráneo-caudal (Sistema Nervioso Vegetativo Parasimpático = SNVP).
- Al mismo tiempo el telencéfalo está recibiendo “señales aferentes” de diversa índole que le permiten modular el reclutamiento de las unidades motoras y la actividad de los sistemas cardiovascular y respiratorio en función de la intensidad del ejercicio.

Es fácil comprender el desconocimiento que se tiene de todos los aspectos considerados. Lo que parece obvio es la exquisita coordinación que se debe de producir entre las dos “partes” clásicamente descritas en los libros: SNS y SNV. El apartado 5 (*Locomotor and Respiration Interdependence*) del capítulo 11 del manual dirigido por Rowell y Shepherd<sup>28</sup> y más recientemente la revisión de Gossard *et al*<sup>53</sup> son suficientemente expresivos. En estos artículos se establece la relación entre el control del movimiento y el control neurovegetativo.

Sin embargo, el análisis de la Figura 5 determina los muchos interrogantes que se desconocen y que se analizan de forma simple.

- ¿Qué centro o centros nerviosos dirigen la coordinación somato-neurovegetativa?. Como la locomoción es extensiva en cualquier nivel de evolutivo del encéfalo, parece coherente que el comando central sea una “expresión funcional” de la relación entre el lóbulo límbico y el diencéfalo<sup>22</sup>.
- ¿Cómo se regula o controla el reclutamiento de las unidades motoras activas durante el ejercicio?. Mucha de la información disponible, siendo indirecta, procede del grado de depleción de glucógeno en las fibras musculares durante el ejercicio<sup>54,55</sup>. Estos

estudios confirman el principio establecido por Henemann<sup>52</sup> y posteriormente confirmado por Burke<sup>56</sup> relativo al orden de reclutamiento: unidades ST-unidades FST-unidades FT. La complejidad es enorme, porque a las características electrofisiológicas de las unidades motoras que permiten explicar el orden de reclutamiento<sup>56</sup> hay que añadirle la actividad de las vías descendentes sobre el conjunto de motoneuronas del asta anterior

- ¿Cómo se regula o controla las funciones cardiovascular y respiratoria al objeto de adecuarla a la locomoción?. Como señala Lemon<sup>57</sup>, cada una de las vías descendentes motoras puede llevar a cabo una serie de papeles funcionales concretos. Sin embargo, dichas funciones “aisladas” deben de estar coordinadas de forma conjunta debido a la necesidad de integrar funciones generales tales como “mantener el equilibrio y la postura” y “realizar y controlar” la locomoción”. En razón a esta idea las vías descendentes dan colaterales a los centros de control cardiovascular y respiratorio que permiten el control de la ventilación alveolar y el gasto cardiaco.

## Conclusión

En conclusión, entiendo que el conocimiento de los dos grandes objetivos de la fisiología del ejercicio, respuesta y adaptación requiere un conocimiento lo más profundo posible del funcionamiento del organismo en estado de reposo, objeto de estudio de la fisiología animal y más concretamente de la fisiología humana. Ceñirse sólo a explicar las variables fisiológicas durante el ejercicio, tales como el gasto cardiaco o la ventilación, de forma simple sin profundizar en los mecanismos que explican su modificación es un error. En mi opinión, la concepción simple de la fisiología del ejercicio sin considerar que hay que estudiar las funciones fisiológicas en estado de reposo puede conducir a un perjuicio para todos aquellos que desean realmente avanzar en el conocimiento de la respuesta y adaptación del organismo. Ahora que hay un debate sobre las personas responsables de realizar una prueba de esfuerzo, se debe de tener en consideración la necesidad de tener una buena formación. Ciertamente el esfuerzo al que se puede someter a un deportista durante una prueba de campo puede ser igual o superior al de una ergoespiometría. Pero, con independencia de cuestiones legales, cuando se realiza una prueba de esfuerzo hay que tener el juicio ético sobre cuáles son los conocimientos necesarios para estar al frente de la misma.

## Bibliografía

1. Bassett Jr DR. Scientific contributions of AV Hill: exercise physiology pioneer. *Journal of applied physiology*. 2002;93(5):1567-82.
2. Hale T. History of developments in sport and exercise physiology: AV Hill, maximal oxygen uptake, and oxygen debt. *Journal of sports sciences*. 2008;26(4):365-400.
3. Johnson A. “They Sweat for Science”: The Harvard Fatigue Laboratory and Self-Experimentation in American Exercise Physiology. *Journal of the History of Biology*. 2014:1-30.
4. Tipton CM. Contemporary exercise physiology: fifty years after the closure of Harvard Fatigue Laboratory. *Exercise and sport sciences reviews*. 1997;26:315-39.
5. Wilmore JH. Applied exercise physiology: A personal perspective of the past, present, and future. *Exercise and sport sciences reviews*. 2003;31(4):159-60.
6. Mitchell JH, Haskell W, Snell P, Van Camp SP. Task Force 8: classification of sports. *Journal of the American College of Cardiology*. 2005;45(8):1364-7.
7. Ottosson A. The First Historical Movements of Kinesiology: Scientification in the Borderline between Physical Culture and Medicine around 1850. *The International journal of the history of sport*. 2010;27(11):1892-919.
8. Pernow B. [The first three Nordic Nobel laureates in physiology or medicine.]. *Svensk medicinshistorisk tidskrift*. 1996;1(1):147-68.
9. Calderón Montero FJ. *Fisiología Humana. Aplicación a la actividad física*. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2012.
10. Costill DL, Wilmore JH, Kenney WL. Physiology of sport and exercise. *Physiology Of Sport And Exercise*-9780736094092-66, 78. 2012.
11. Hale T. *Exercise physiology: a thematic approach*. John Wiley & Sons; 2005.
12. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. *Essentials of exercise physiology*. Lippincott Williams & Wilkins; 2006.
13. Noble BJ. *Physiology of exercise and sport*. Times Mirror/Mosby College Publishing; 1986.
14. Scott K, Edward T. *Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance*. McGraw-Hill; 2001.
15. Chicharro JL, Vaquero AF. *Fisiología del ejercicio/Physiology of Exercise*. Ed. Médica Panamericana; 2006.
16. Barbany JR. *Fisiología del ejercicio físico y del entrenamiento*. Editorial Paidotribo; 2006.
17. Pelliccia A, Maron BJ, Spataro A, Proschan MA, Spirito P. The upper limit of physiologic cardiac hypertrophy in highly trained elite athletes. *New England Journal of Medicine*. 1991;324(5):295-301.
18. Serratos Fernández LJ. *Características morfológicas del corazón del deportista de elite. Estudio ecocardiográfico*. Madrid: Autónoma; 1998.
19. Montero FC, Peinado PB, Di Salvo V, Pigozzi F, Maffulli N. Cardiac adaptation to training and decreased training loads in endurance athletes: a systematic review. *British medical bulletin*. 2007;84(1):25-35.
20. Calderón FJ, Díaz V, Peinado AB, Benito PJ, Maffulli N. Cardiac dimensions over 5 years in highly trained long-distance runners and sprinters. *Physician and Sportsmedicine*. 2010;38(4).
21. Gledhill N, Cox D, Jamnik R. Endurance athletes’ stroke volume does not plateau: major advantage is diastolic function. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1994;26(9):1116-21.
22. Dempsey JA, Adams L, Ainsworth DM, Fregosi RF, Gallagher CG, Guz A, et al. Airway, lung, and respiratory muscle function during exercise. *Comprehensive Physiology*. 1996.
23. Johnson RL, Heigenhauser GJ, Hsia CC, Jones NL, Wagner PD. Determinants of gas exchange and acid-base balance during exercise. *Comprehensive Physiology*. 1996.
24. West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*. 1997;276(5309):122-6.
25. Yerg J, Seals DR, Hagberg JM, Holloszy J. Effect of endurance exercise training on ventilatory function in older individuals. *Journal of Applied Physiology*. 1985;58(3):791-4.
26. Waldrop TG, Eldridge FL, Iwamoto GA, Mitchell JH. Central neural control of respiration and circulation during exercise. *Comprehensive Physiology*. 1996.
27. Kaufman MP, Forster HV. Reflexes controlling circulatory, ventilatory and airway responses to exercise. *Comprehensive Physiology*. 1996.
28. Rowell LB, Shepherd JT. *Exercise: regulation and integration of multiple systems*. Published for the American Physiological Society by Oxford University Press; 1996.
29. Schönfeld P, Reiser G. Why does brain metabolism not favor burning of fatty acids to provide energy? Reflections on disadvantages of the use of free fatty acids as fuel for brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2013;33(10):1493-9.
30. Nalęcz K, Nalęcz M. Carnitine—a known compound, a novel function in neural cells. *Acta neurobiologiae experimentalis*. 1995;56(2):597-609.
31. Nalęcz KA, Miecz D, Berezowski V, Cecchelli R. Carnitine: transport and physiological functions in the brain. *Molecular aspects of medicine*. 2004;25(5):551-67.
32. Laeger T, Metges CC, Kuhla B. Role of  $\beta$ -hydroxybutyric acid in the central regulation of energy balance. *Appetite*. 2010;54(3):450-5.
33. Frayn K. The glucose-fatty acid cycle: a physiological perspective. *Biochemical Society Transactions*. 2003;31(Pt 6):1115-9.
34. Newsholme E. The glucose/fatty acid cycle and physical exhaustion. *Human Muscle Fatigue. Physiological Mechanisms*. 1981:89-101.
35. Newsholme E. *Glucose/fatty acid cycle: regulatory system*. Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif). 1992;9(3):271-3.
36. Powers SK, Howley ET. *Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance*. McGraw-Hill; 2004.
37. Booth FW, Baldwin KM. Muscle plasticity: energy demand and supply processes. *Comprehensive Physiology*. 1996.

38. Smekal G, von Duvillard SP, Pokan R, Tschan H, Baron R, Hofmann P, et al. Effect of endurance training on muscle fat metabolism during prolonged exercise: Agreements and disagreements. *Nutrition*. 2003;19(10):891-900.
39. Graham TE, Turcotte LP, Kiens B, Richter EA. Effect of endurance training on ammonia and amino acid metabolism in humans. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1997;29(5):646-53.
40. Hood DA, Terjung RL. Amino acid metabolism during exercise and following endurance training. *Sports Medicine*. 1990;9(1):23-35.
41. Hawley JA, Burke LM. Carbohydrate availability and training adaptation: effects on cell metabolism. *Exercise and sport sciences reviews*. 2010;38(4):152-60.
42. Coggan AR. Plasma glucose metabolism during exercise: effect of endurance training in humans. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1997;29(5):620-7.
43. Garrett WE, Kirkendall DT. *Exercise and sport science*. Lippincott Williams & Wilkins; 2000.
44. McKeever K. Effect of exercise on fluid balance and renal function in horses. *The Veterinary clinics of North America Equine practice*. 1998;14(1):23-44.
45. Poortmans JR. Exercise and renal function. *Sports Medicine*. 1984;1(2):125-53.
46. Luciani G, Giungi S, Di Mugno M. [Kidney and sports]. *Urologia*. 2009;77(2):107-11.
47. Poortmans JR, Vanderstraeten J. Kidney function during exercise in healthy and diseased humans. *Sports Medicine*. 1994;18(6):419-37.
48. Castenfors J. Renal function during prolonged exercise. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1977;301(1):151-9.
49. Castenfors J. Renal function during exercise. With special reference to exercise proteinuria and the release of renin. *Acta physiologica Scandinavica Supplementum*. 1966;293:1-44.
50. Hinchcliff K, Reinhart G, Burr J, Swenson R. Exercise-associated hyponatremia in Alaskan sled dogs: urinary and hormonal responses. *Journal of Applied Physiology*. 1997;83(3):824-9.
51. Henneman E. Recruitment of motoneurons: the size principle. *Progress in clinical neurophysiology*. 1981;9:26-60.
52. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol*. 1965;28:560-80.
53. Gossard J-P, Dubuc R, Kolta A. The interactions between locomotion and respiration. Breathe, Walk, and Chew: The Neural, Challenge. 2010;187:173.
54. Vøllestad NK, Blom PCS. Effect of varying exercise intensity on glycogen depletion in human muscle fibres. *Acta physiologica scandinavica*. 1985;125(3):395-405.
55. Gollnick P, Piehl K, Saltin B. Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *The Journal of physiology*. 1974;241(1):45-57.
56. Burke R. Motor units: anatomy, physiology, and functional organization. *Comprehensive Physiology*. 1981.
57. Lemon RN. Descending pathways in motor control. *Annu Rev Neurosci*. 2008;31:195-218.