

Fisiología Humana

Aplicación al ejercicio

Fisiología Humana

Aplicación al ejercicio

Francisco Javier Calderón Montero

Doctor en Medicina y Cirugía, Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid

Médico Especialista en Medicina de la Educación Física y del Deporte, Escuela Profesional de Medicina de la Educación Física y del Deporte, Universidad Complutense de Madrid

Profesor titular de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, Instituto Nacional de Educación Física, Universidad Politécnica de Madrid



Buenos Aires - Bogotá - Caracas - Madrid - México - Porto Alegre
www.medicapanamericana.com

Colaboradores

Pedro José Benito Peinado

Doctor en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte y Profesor de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Madrid

Jesús Javier Rojo González

Doctor en Medicina y Profesor de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Madrid

Ana Belén Peinado Lozano

Doctora en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte y Profesora de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Madrid

Irma Lorenzo Capellá

Doctora en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte y Profesora de la Universidad Camilo José Cela de Madrid

A mi padre

*Porque el «azar» de la herencia sólo me ha legado
tu sentido común, pero no tu inteligencia;
porque tu proceder en la vida ha sido y es un ejemplo*

A Ana

*Mi cerebro volvería a escribir las palabras
que mi corazón impulsivo pronunció
hace treinta años: «Gracias por amar mis defectos»*

Prólogo

En los últimos cuarenta años, los docentes que nos interesamos por el movimiento, la actividad física y el deporte hemos asistido al acelerado desarrollo de la fisiología del ejercicio.

Como consecuencia de ello, se han publicado gran cantidad de libros, con títulos específicos dedicados a las adaptaciones fisiológicas al esfuerzo. Muchos de estos libros son recopilaciones voluntariosas y exhaustivas de la opinión o la experiencia de distintos científicos sobre determinados aspectos adaptativos; sin embargo, muy a menudo, la opinión del autor del libro, su personal interpretación, no se explicita. Cada vez más se trata de obras enciclopédicas, en las que se exponen los problemas y las diferentes soluciones propuestas, pero el recopilador evita exponer claramente su interpretación.

Creo que la formación profunda en biología, bioquímica, física, fisiología, fisiopatología, educación física, entrenamiento y deporte es necesaria, a fin de entender y valorar adecuadamente las adaptaciones fisiológicas al esfuerzo.

Efectivamente, la fisiología del ejercicio no tiene entidad propia y sólo el conocimiento profundo de la fisiología –tanto humana como animal– y la aplicación de los conocimientos de ciencias paralelas a ella, junto con el razonamiento adecuado, pueden conducir a entender y valorar lo que sucede durante el ejercicio.

El profesor Calderón, a quien conozco desde que comenzó a estudiar Medicina y Ciencias de la Actividad Física, ha tenido un recorrido brillante y minucioso, por todas las disciplinas que pueden aportar comprensión a la fisiología, desde fisiología comparada hasta técnicas de aprendizaje del movimiento, pasando por matemáticas, bioquímica, patología, etcétera.

Por todo ello, este libro que ahora presenta es, en mi opinión, una de esas pocas obras maduras, que muy de vez en cuando aparecen, llena de información, razonamiento, interpretaciones originales y sugestivos interrogantes, rebotante de entusiasmo por la verdad científica y la sencillez. He disfrutado con la lectura de sus capítulos y, especialmente, con su acertada «conducción razonada» por los sugestivos caminos de la interpretación fisiológica de los procesos adaptativos al ejercicio físico, tarea muy difícil de lograr.

Estoy seguro de que los estudiantes que lean esta obra entenderán cómo es posible explicar de forma sencilla las complicadas adaptaciones al ejercicio.

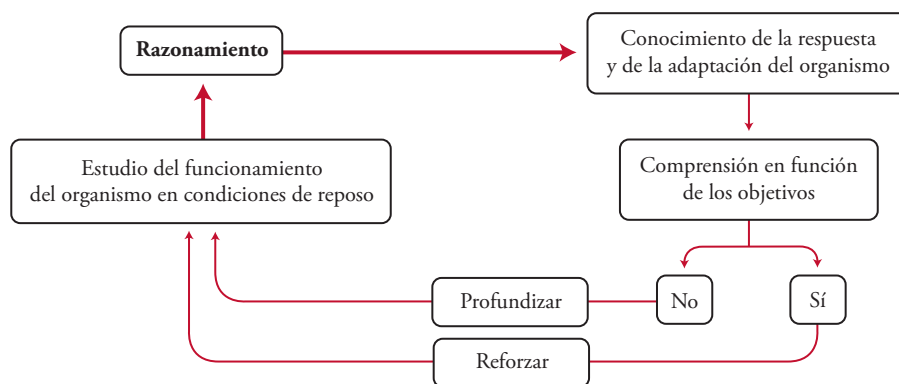
JULIO CÉSAR LEGIDO ARCE
Catedrático Emérito, Universidad Complutense de Madrid
Premio Internacional Angiolino Quarenghi 2011

Prefacio

Tengo dos pasiones profesionales: la fisiología y la enseñanza. A veces pienso que la intensidad de estas pasiones linda con lo patológico, pues sólo leo libros y artículos de fisiología. He tenido la suerte de aunar mis dos pasiones profesionales ejerciendo de profesor de fisiología en la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte del Instituto Nacional de Educación Física de Madrid desde hace aproximadamente 25 años. Utilizando un término anglosajón, puedo decir que mi actividad laboral constituye un «*hobby remunerado*».

Este libro surge precisamente por las dos pasiones mencionadas, íntimamente unidas a la actividad física y al deporte. Al comienzo de mi vida en la enseñanza, y con una perspectiva equivocada, pensaba que la fisiología del ejercicio tenía entidad propia. Tal era el convencimiento, que adquiría cada libro de fisiología del ejercicio que se publicaba. Cuando por azares del destino comencé a impartir clases de fisiología «a secas» (actividad que continúo desarrollando), empecé a darme cuenta de que estaba equivocado: *la fisiología del ejercicio no tiene entidad propia*. Simplemente, hay que intentar saber cómo funciona el organismo en condiciones de reposo y comenzar a *analizar* cómo se modifican las diferentes variables que permiten realizar el ejercicio: no hay ciencias aplicadas, sino aplicación de las ciencias. Con el paso de los años, he ratificado la idea de que únicamente con el *raciocinio*, apoyado en el conocimiento del funcionamiento del organismo en reposo, se puede deducir lo que sucede durante el ejercicio.

El esquema adjunto resume lo señalado. Dos fenómenos generales concurren en el ejercicio: la respuesta o ajuste y la adaptación. La *respuesta* consiste en los cambios momentáneos, temporales, que desaparecen una vez finalizado el ejercicio. La *adaptación* es el proceso por el cual los cambios persisten durante un tiempo y favorecen una respuesta mejor frente al mismo estímulo. La adaptación se consigue realizando ejercicio de forma sistemática y sistematizadamente, es decir, mediante el entrenamiento, término que abruma a los no deportistas.



Soy consciente de que, en muchas ocasiones, el razonamiento no alcanza a explicar completamente la relación fisiología/ejercicio, sobre todo la adaptación del organismo al entrenamiento. Esto sucede cuando, intelectualmente, una persona no se conforma con la explicación alcanzada, de manera que debe estudiar más profundamente el tema. En caso contrario, lo único que se debe hacer es reforzar lo aprendido. Pues bien, éste es el

«espíritu» que ha guiado este libro: intentar que los alumnos –mediante el razonamiento lógico y sobre la base del estudio de las funciones fisiológicas en reposo– sean capaces de *razonar* la respuesta y la adaptación del organismo.

Con esta concepción, el libro presenta los conocimientos de fisiología humana, expuestos de la forma más sencilla y clara posible, en siete secciones. La división de la fisiología en las secciones señaladas obedece a dos razones fundamentales, íntimamente ligadas: a los lectores a los que va dirigido el libro y a la concepción de integración que éste persigue. Los alumnos y potenciales lectores deben alcanzar los conocimientos más sólidos posibles en cuanto a la organización y el funcionamiento del organismo en estado de reposo, como base para razonar la respuesta al ejercicio y la adaptación al entrenamiento.

Algunas de las secciones son obvias para cualquier persona interesada en la biología, como por ejemplo las secciones I (Sistema cardiovascular) y II (Sistema respiratorio). La sección III (Líquidos corporales y función renal) describe una parte de la fisiología comúnmente omitida en los textos de fisiología del ejercicio: el control de los líquidos corporales, a través, principalmente, de la función renal (cap. 11) y del estado ácido-básico (cap. 12). Otras secciones pueden resultar, cuanto menos, llamativas, como la sección IV (Sistema digestivo y metabolismo), que agrupa conocimientos de la fisiología del aparato digestivo y del metabolismo, o la sección V (Sistema endocrino), que ofrece una visión de la función hormonal general (cap. 16) y luego aborda las hormonas que se hallan bajo el control hipotálamo-hipofisario (cap. 17) y las hormonas de la homeostasis del calcio y de la glucosa (cap. 18). Resumir la neurofisiología (sección VI) en cuatro capítulos no es tarea fácil, aunque sea desde una visión «aislada» como el control motor. No obstante, el lector advertirá que, para comprender cabalmente la respuesta «organizada» del organismo al ejercicio, debe conocer –aunque sea de forma elemental– la neurofisiología. En un intento de unir neurofisiología y ejercicio, en el capítulo 22 (Neurofisiología y cualidades físicas) se expone la importancia de conocer dónde y cómo se controla el movimiento. Por último, la sección VII (Fisiología integrada) constituye un resumen de la idea general del libro: la *integración*.

Es necesario señalar un aspecto que considero trascendental para entender todo el texto pero, sobre todo, los dos últimos capítulos. El ejercicio dinámico es la única actividad animal capaz de poner en funcionamiento a todo el organismo. Por lo tanto, el ejercicio es un paradigma de comprensión de cómo el conjunto del organismo reacciona de forma inteligente ante el estrés, dado que es la actividad que mayor estrés desencadena en el organismo. La respuesta inteligente es la *proporcionalidad*. Cualquier variable fisiológica cuya respuesta se analice durante un ejercicio de intensidad creciente obedece a una función muy simple, pero muy lógica: la *función lineal* (a más demanda, mayor incremento de la variable). Sin embargo, la función lineal tiene un inconveniente fisiológico que se enuncia en forma de pregunta: ¿cómo «conocen» los sistemas de control cuando el organismo se encuentra al límite? Parece lógico también que, en algún momento, la pérdida de la proporcionalidad sea el resultado del análisis de los centros de gobierno de la respuesta al ejercicio.

Un ejemplo simple e intuitivo de la vida cotidiana aclarará la idea de *integración* que persigue este libro. Cuando una persona camina «a paso vivo», debe aumentar el número de veces que su corazón se contrae (incremento de la frecuencia cardíaca), debe aumentar el número de respiraciones (incremento de la frecuencia respiratoria) y, además, debe mover más rápido la musculatura, sobre todo la de los miembros inferiores. Estos ajustes o respuestas son los más evidentes, pero también se producen otros (incrementos del volumen de sangre bombeado en cada latido o del volumen de aire movilizado en un ciclo respiratorio). Para mayor complejidad de integración, si se desea conversar (para que «el paseo» no sea tan aburrido), se debe coordinar el mecanismo del lenguaje con la respiración. Como se requiere mayor cantidad de energía, el metabolismo aumenta su actividad. Parte de la energía de los sustratos se transforma en calor, de manera que es necesario eliminarlo, dado que la temperatura es una variable que es objeto de control. La mejor forma de perder calor es la evaporación: otro problema para el organismo.

Es evidente, pues, que mediante el ejercicio se han puesto en marcha: *a)* el sistema cardiovascular (caps. 1 a 4); *b)* el aparato respiratorio (caps. 5 a 8); *c)* el sistema sensitivomotor (caps. 19 a 21), y *d)* el metabolismo (caps. 14 y 15). Pero, además, durante el ejercicio hay órganos aparentemente «silentes»: aparato digestivo (cap. 13) y riñón (cap. 11). Puede afirmarse, intuitivamente, que el riñón debe intervenir para conservar la mayor cantidad de agua, y que el aparato digestivo resulta necesario, por ejemplo, para «rellenar» los sustratos, si una persona decide caminar una distancia equivalente a la que recorre un ave migratoria.

Con este ejemplo tan sencillo y elemental, espero que los lectores de este libro pongan todo su empeño en intentar *razonar* cómo el organismo responde de forma integrada al ejercicio. Sólo de esta forma el lector podrá *entender* el ejercicio físico como fenómeno de estrés, ya sea desde el punto de vista de la aplicación a la salud como de la aplicación al rendimiento deportivo.

Presentación de la obra

ESTRUCTURA DEL LIBRO

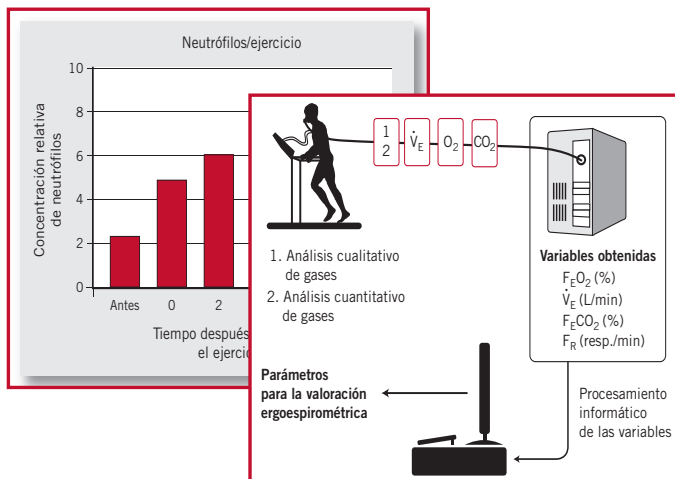
Con el fin de reforzar la concepción de la obra sobre la base del estudio de las funciones fisiológicas en reposo y la respuesta y la adaptación del organismo, cada capítulo está diseñado de manera uniforme, y apoyado con iconos y elementos que facilitan su comprensión.

- *Vinculación:* al comienzo de cada capítulo se incluye un texto que sitúa el tema en el contexto del libro e indica los capítulos que tienen mayor relación con el tema descrito.



Este capítulo aborda el estudio general del sistema cardiovascular. A partir de la comprensión del funcionamiento unitario del sistema, se analizan sus componentes: la bomba cardíaca (cap. 2) y el sistema vascular (cap. 3). Para finalizar la parte correspondiente a la fisiología del sistema cardiovascular, en el capítulo 4 se «regresa» a una visión global con el conocimiento del funcionamiento de las partes que lo constituyen: el corazón y la circulación.

- *Introducción:* en ella se analiza la perspectiva general del capítulo.
- *Apartados:* se desarrollan los apartados cuyo contenido se entiende como sustancial para que el lector pueda *razonar* lo enunciado, en relación con la respuesta y la adaptación del organismo. La fisiología ha evolucionado de forma notable, sobre todo a nivel molecular. Sin embargo, en función de los lectores a quienes está dirigido este texto, se ha tratado de no exponer los mecanismos moleculares.



- *Figuras:* se ha procurado que las figuras presentadas en el libro sean muy simples, aunque ello implique cierto alejamiento de la realidad.
- *Apartados relacionados con la respuesta y la adaptación del órgano o el sistema* que se analiza en el capítulo correspondiente: estos apartados se desarrollan intentando emplear el sentido común, sustentado en la asimilación de los apartados precedentes a los cuales se hace referencia.



PROBLEMAS DE COAGULACIÓN Y EJERCICIO

Como se ha visto de forma muy elemental, la coagulación de la sangre es un proceso complejo (Fig. 10-4). El interés de los investigadores por la relación coagulación-ejercicio proviene fundamentalmente de todas aquellas afecciones del sistema cardiovascular que requieren el control del proceso de la coagulación como

conocidos de estas enfermedades son la hemofilia y la enfermedad de Von Willebrand.



Para completar y comprobar la asimilación de los conceptos básicos de la hemodinámica aplicados a la respuesta del sistema cardiovascular al ejercicio físico, el lector puede contestar a la siguiente cuestión:

❖ Las siguientes valores corresponden a los parámetros de la ecuación general de la hemodinámica:

$$\begin{aligned} PAM \text{ (mm Hg)} &= 150 \text{ Q (L/min)} = 30 \\ &\text{y} \\ RPT \text{ (mm Hg} \times \text{min/L)} &= 5 \end{aligned}$$

❖ Explique y razone si estos valores corresponden a un estado de reposo o de esfuerzo.

En el [sitio web](#) del libro, el lector podrá encontrar más preguntas relativas a la aplicación de la hemodinámica al ejercicio (sección I, Sistema cardiovascular).

es importante que el lector conozca, conocido los procesos de la coagulación, que los que no han recibido el ejercicio en los estudios de estas afecciones. Pueden ser:

- La mayor parte de los estudios indican que los marcadores de la coagulación aumentan con el ejercicio, si bien el efecto sobre el fibrinógeno no es concluyente.
- El entrenamiento parece influir en el número y la función de las plaquetas.
- La fibrinólisis aumenta de forma aguda durante el ejercicio, siendo la magnitud del cambio determinada por el estado de los componentes de la fibrinólisis en reposo.

La importancia del proceso de coagulación-fibrinólisis se relaciona con la mortalidad y los riesgos asociados de los enfermos con enfermedades del sistema cardiovascular. Por este motivo, desde hace tiempo, la medicina busca los mejores marcadores.

• *Preguntas:* sirven de guía y son ampliadas en el sitio web.

- *Recuadros relativos a patología y ejercicio:* en ellos se describe, de forma muy elemental, cómo se puede «utilizar» el ejercicio (en el diagnóstico) o los beneficios del entrenamiento en una determinada enfermedad (ayuda terapéutica). Se consideró conveniente su inclusión, debido a que los profesionales de la actividad física se encuentran, cada vez con mayor frecuencia, con personas enfermas que deben realizar ejercicio físico.

SITIO WEB COMPLEMENTARIO

El material que se presenta en el sitio web tiene dos objetivos. El primero y más importante es ayudar al lector a asimilar los contenidos expuestos en el libro. Es obvio que la mejor manera de comprobar la asimilación racional de dichos contenidos es mediante la evaluación, con independencia de la forma de evaluar. El segundo objetivo es aportar una información suplementaria, en particular para los dos últimos capítulos del libro, pues —como se expone a lo largo de éstos— es importante que el lector adquiera la idea de que el ejercicio físico es la «actividad animal» más común y que mayor estrés desencadena en el organismo, que responde de forma integrada. Por ello, la cuantificación de la respuesta mediante la ergoespirometría es fundamental.

■ Estructura

El material del sitio web se ha organizado por bloques que agrupan secciones del libro:

- I. *Sistema cardiovascular:* se incluyen preguntas de todos los capítulos correspondientes a la fisiología del sistema cardiovascular (caps. 1 a 4).
- II. *Sistema respiratorio:* se incluyen preguntas de todos los capítulos correspondientes a la fisiología del aparato respiratorio (caps. 5 a 8).
- III. *Líquidos corporales y función renal:* se incluyen preguntas de los capítulos de líquidos corporales (cap. 9), sangre (cap. 10), riñón (cap. 11) y equilibrio ácido-básico (cap. 12).
- IV. *Sistema digestivo y metabolismo:* se incluyen las preguntas de los capítulos de fisiología del aparato digestivo (cap. 13) y de metabolismo (caps. 14 y 15).
- V. *Sistema endocrino:* se incluyen preguntas de los capítulos correspondientes a la fisiología del sistema endocrino (caps. 16 a 18).
- VI. *Neurofisiología:* se incluyen las tablas y las figuras de los capítulos correspondientes a neurofisiología (caps. 19 a 22).
- VII. *Fisiología integrada:* se incluyen preguntas correspondientes a los capítulos 23 y 24.

Esta distribución obedece a criterios de prioridad. Se considera que el lector interesado en la respuesta y la adaptación del organismo debe conocer con relativa profundidad e independencia el sistema cardiovascular, el sistema respiratorio, el metabolismo y la regulación endocrina. De ahí que figuren en carpetas independientes. Tal vez el lector piense que el tema «líquidos corporales y función renal» tenga un papel secundario, pero el autor otorga mucha importancia a la función renal y, por ello, se presenta en una carpeta independiente. Por otra parte, la idea integradora que persigue este libro determina que se presente una única sección para los temas de

los capítulos 23 y 24. Finalmente, es necesario señalar que, aun cuando la importancia del sistema nervioso en el control durante el ejercicio es esencial, las preguntas de *neurofisiología* se han incluido en la carpeta de *integración*, debido a la complejidad del funcionamiento del sistema nervioso durante el ejercicio.

■ Recursos

- *Figuras y tablas del libro*: se incluyen todas; para consulta exclusiva del docente.
- *Preguntas*: la comprensión de la respuesta y la adaptación del organismo al ejercicio y al entrenamiento es el resultado del raciocinio basado en el conocimiento del funcionamiento del organismo en condiciones de reposo. Por este motivo, el autor se ha centrado con mayor interés en *preguntas abiertas* para discurrir, si bien también se incluyen *preguntas de opción múltiple*. En cualquiera de los dos tipos de preguntas, se exponen las respuestas haciendo referencia a los capítulos correspondientes del libro. Como es fácil comprender, algunas de las cuestiones de las preguntas abiertas son simplemente una «guía».
- *Material complementario* (sección VII, Fisiología integrada): acorde con los objetivos señalados anteriormente, el material que se presenta es el correspondiente a la valoración integrada de la respuesta del organismo al ejercicio mediante la ergoespirometría.

■ Método general de respuesta a las preguntas

Es probable que el lector que se enfrente por primera vez a la fisiología y experimente cierta «impaciencia» y «ansiedad» de acudir primero a la página web sin haber intentado comprender el sentido de esta obra, se sienta «aturdido» por las preguntas. Este apartado pretende «conducir» al lector, a fin de que no experimente la «desesperación del principiante».

Las preguntas, aparentemente, son complejas. Sin embargo, cuando el lector lea las respuestas, se dará cuenta de que no es así. Todas las preguntas, referidas a tablas o figuras, comienzan siempre de la misma manera: «*Describe la tabla o figura de forma razonada*».

La razón es bien simple. En mis años de experiencia en la enseñanza de la fisiología he comprobado, por los motivos que sean, que los alumnos no son capaces de discurrir porque desconocen lo más elemental: *expresar en palabras lo que indica una gráfica o tabla*. Por este motivo, y aunque parezca de «Perogrullo», a continuación se indica el proceso «mental» que hay que seguir para contestar de forma razonable a las preguntas que se formulan:

1. Cuando la pregunta se refiera a una figura, hay que proceder de la siguiente forma: redactar con palabras lo que representa la figura —normalmente una función—, *sin olvidar el significado de las coordenadas!* En el eje X siempre se representa la variable independiente, y en el eje Y, la variable dependiente. En términos vulgares, la variable Y es la que cambia en función de la variación de X. Por lo tanto, en términos simples, la «lectura» siempre se hace de la misma forma: «*qué le sucede a la variable Y cuando cambia la variable X*».

2. Cuando la pregunta se refiera a una tabla, debe procederse de forma similar, es decir, redactar con palabras la evolución de los datos mostrados en la tabla.

3. En ambos casos (figura o tabla), el paso definitivo es interpretar desde el punto de vista fisiológico lo que se observa. Para ello, es condición *sine qua non* estudiar previamente el capítulo o los capítulos correspondientes. Posteriormente, la pregunta se puede analizar e interpretar en función de los conocimientos asimilados por el lector y de las respuestas dadas por el autor.

Agradecimientos

Al Dr. José María Álvaro-Gracia Sanfiz, la persona que me facilitó el camino a la enseñanza. Al Dr. Julio César Legido Arce, el «padre» de la Medicina Deportiva, porque me ha enseñado cómo «proteger siempre a los amigos».

A todo el equipo de Editorial Médica Panamericana. A Horacio Argente, director editorial, por su visión avanzada. A la directora de contenidos editoriales, Elena Feduchi, por todos sus consejos a fin de mejorar el libro. A José Carlos Cabrero, que me facilitó el contacto y que en una ocasión me dijo una frase realmente impactante: «Los autores tienen la idea de hacer un libro ‘espejo’ y no saben que detrás de éste realmente no está la ‘figura’ del autor, sino la de sus alumnos».

Índice de capítulos

SECCIÓN I

SISTEMA CARDIOVASCULAR

- 1 Características generales del sistema cardiovascular..... 3
- 2 Fisiología cardíaca 11
- 3 Fisiología de la circulación 31
- 4 Regulación cardiovascular 47

SECCIÓN II

SISTEMA RESPIRATORIO

- 5 Introducción a la fisiología respiratoria..... 61
- 6 Mecánica respiratoria 71
- 7 Intercambio y transporte de los gases 81
- 8 Regulación de la respiración 95

SECCIÓN III

LÍQUIDOS CORPORALES Y FUNCIÓN RENAL

- 9 Fisiología de los líquidos corporales..... 109
- 10 Sangre..... 121
- 11 El riñón como órgano de control de los líquidos corporales 133
- 12 Regulación del estado ácido-básico 147

SECCIÓN IV

SISTEMA DIGESTIVO Y METABOLISMO

- 13 Fisiología del aparato digestivo..... 161
- 14 Conceptos generales sobre metabolismo..... 179
- 15 Metabolismo en reposo y en ejercicio..... 201

SECCIÓN V

SISTEMA ENDOCRINO

- 16 Principios generales sobre la regulación endocrina del metabolismo 217
- 17 Hormonas bajo el control hipotálamo-hipofisario..... 229
- 18 Hormonas de la homeostasis del calcio y de la glucosa..... 251

SECCIÓN VI

NEUROFISIOLOGÍA

- 19 Descripción morfofuncional del sistema nervioso 269
- 20 Origen y control del movimiento..... 283
- 21 Control vegetativo del medio interno 301
- 22 Neurofisiología y cualidades físicas..... 311

SECCIÓN VII
FISIOLOGÍA INTEGRADA

23 Análisis integrado de la respuesta del organismo
al ejercicio 327

24 Ergoespirometría: paradigma de análisis
integrado de la respuesta del organismo
al ejercicio 335

Índice analítico 347