

FISIOLOGÍA DEL ESFUERZO Y DEL DEPORTE

Jack H. Wilmore

*Profesor emérito de la Universidad
de Texas en Austin*

David L. Costill

*Cátedra en Ciencias del Ejercicio, John y Janice Fisher
Laboratorio de Rendimiento Humano
Universidad de Ball State*

6ª Edición

Revisada y aumentada



ÍNDICE

Prólogo	IX
Agradecimientos	XIII
Créditos fotográficos	XIV



Introducción a la fisiología del esfuerzo y del deporte	XVI
Enfoque de la fisiología del esfuerzo y del deporte	3
Perspectiva histórica	4
Reacciones fisiológicas agudas al ejercicio	14
Adaptaciones fisiológicas crónicas al entrenamiento	21
Investigación: base del conocimiento	23

Parte I Cuestiones esenciales del movimiento 33



Capítulo 1. Control muscular del movimiento	34
Estructura y función de los músculos esqueléticos	37
Músculos esqueléticos y ejercicio	46



Capítulo 2. Control neurológico del movimiento	62
Revisión del sistema nervioso	65
Estructura y función del sistema nervioso	65
Sistema nervioso central (SNC)	74
Sistema nervioso periférico (SNP)	76
Integración sensoriomotora	79
Reacción motora	86



Capítulo 3. Adaptaciones neuromusculares al entrenamiento resistido	90
Terminología	93
Entrenamiento resistido y ganancias en la forma física muscular	95
Mecanismos de las ganancias de la fuerza muscular	96
Inflamación muscular	106
Diseño de programas de entrenamiento resistido	112
Entrenamiento resistido para poblaciones especiales	118

Parte II Energía para el movimiento

127

Capítulo 4. Metabolismo, energía y sistemas básicos de energía

129

Fuentes energéticas	130
Bioenergética: producción de ATP	132
Medición de la utilización de energía durante el ejercicio	144
Consumo energético en reposo y durante el ejercicio	150
La fatiga y sus causas	159

Capítulo 5. Regulación hormonal del ejercicio

170

Naturaleza de las hormonas	173
Glándulas endocrinas y sus hormonas	177
Respuesta hormonal al ejercicio	185
Efectos hormonales sobre el metabolismo y la energía	185
Efectos hormonales sobre el equilibrio de los fluidos y electrolitos durante el ejercicio	191

Capítulo 6. Adaptaciones metabólicas al entrenamiento

198

Adaptaciones al entrenamiento aeróbico	200
Entrenamiento del sistema aeróbico	209
Adaptaciones al entrenamiento anaeróbico	211

Parte III Función cardiorrespiratoria y rendimiento

221

Capítulo 7. Control cardiovascular durante el ejercicio

222

Estructura y función del sistema cardiovascular	224
Respuesta cardiovascular al ejercicio	241

Capítulo 8. Regulación respiratoria durante el ejercicio

262

Ventilación pulmonar	264
Difusión pulmonar	267
Transporte de oxígeno y de dióxido de carbono	271
Intercambio de gases en los músculos	274
Regulación de la ventilación pulmonar	277
Ventilación y metabolismo energético	282
Limitaciones respiratorias al rendimiento	285
Regulación respiratoria del equilibrio acidobásico	286



Capítulo 9. Adaptaciones cardiovasculares y respiratorias al entrenamiento 294

Resistencia: muscular y cardiorrespiratoria	297
Evaluación de la resistencia cardiorrespiratoria	297
Adaptaciones cardiovasculares al entrenamiento	298
Adaptaciones respiratorias al entrenamiento	312
Adaptaciones metabólicas al entrenamiento	313
Mejora de la resistencia cardiorrespiratoria a largo plazo	316
Factores que influyen en la respuesta al entrenamiento aeróbico	318
Resistencia cardiorrespiratoria y rendimiento	323

Parte IV Influencias ambientales sobre el rendimiento 331



Capítulo 10. Regulación térmica y ejercicio 332

Mecanismos de regulación de la temperatura corporal	334
Respuestas fisiológicas al ejercicio con altas temperaturas	341
Riesgos para la salud durante la realización de ejercicios en ambientes calurosos	345
Aclimatación al ejercicio en ambientes calurosos	350
Ejercicio en ambientes fríos	353
Respuestas fisiológicas al ejercicio en ambientes fríos	356
Riesgos para la salud durante el ejercicio en ambientes fríos	358
Aclimatación al frío	360



Capítulo 11. Ejercicios en ambientes hipobáricos, hiperbáricos y de microgravedad 364





Ambientes hipobáricos: ejercicio en altitud	366
Condiciones hiperbáricas: ejercicio bajo el agua	382
Ambientes de microgravedad: ejercicio en el espacio	391

Parte V Optimización del rendimiento deportivo 405









Capítulo 12. Entrenamiento para el deporte 406

Optimización de un modelo de entrenamiento	409
Entrenamiento excesivo	410
Extralimitación	413
Sobreentrenamiento	413
Afinamiento para el máximo rendimiento	423
Desentrenamiento	425
Reentrenamiento	432

	Capítulo 13. Nutrición y deporte	438	
	Las seis clases de nutrientes	440	
	Equilibrio del agua y de los electrolitos	453	
	Dieta del deportista	466	
	Diseño de bebidas deportivas	470	
	Capítulo 14. Peso corporal, composición corporal y deporte	480	
	Constitución, tamaño y composición corporales	482	
	Valoración de la composición corporal	484	
	Composición corporal y rendimiento deportivo	490	
	Estándares de peso	493	
	Logro de un peso óptimo	498	
	Capítulo 15. Ayudas ergogénicas y rendimiento	506	
	Investigación de las ayudas ergogénicas	510	
	Agentes farmacológicos	512	
	Agentes hormonales	523	
	Agentes fisiológicos	532	
	Agentes nutricionales	541	
	Otros agentes nutricionales	543	

Parte VI Poblaciones especiales en el deporte y en el ejercicio **549**

	Capítulo 16. Niños y adolescentes en el deporte y el ejercicio	550	
	Composición corporal: crecimiento y desarrollo de los tejidos	552	
	Respuestas fisiológicas al ejercicio intenso	557	
	Adaptaciones fisiológicas al entrenamiento	564	
	Capacidad motora y rendimiento deportivo	568	
	Aspectos especiales	570	
	Capítulo 17. El envejecimiento en el deporte y el ejercicio	578	
	Tamaño y composición corporales	581	
	Respuestas fisiológicas al ejercicio intenso	582	
	Adaptaciones fisiológicas al entrenamiento	595	
	Rendimiento deportivo	597	
	Consideraciones especiales	600	



Capítulo 18. Diferencias sexuales en el deporte y el ejercicio

608



Tamaño y composición corporal	611
Respuestas fisiológicas al ejercicio intenso	614
Adaptaciones fisiológicas a los ejercicios de entrenamiento	621
Capacidad deportiva	624
Consideraciones especiales	625

Parte VII Actividad física para la salud y la forma física

647



Capítulo 19. Programación de ejercicios para la salud y la forma física

648



Autorización médica	652
Prescripción del ejercicio	658
Control de la intensidad del ejercicio	663
Programa de ejercicios	667
Ejercicio y rehabilitación de personas con enfermedades	673



Capítulo 20. Enfermedades cardiovasculares y actividad física

678



Tipos de enfermedades cardiovasculares	681
Comprensión del proceso de la enfermedad	686
Determinación del riesgo individual	689
Prevención mediante la actividad física	694
Riesgo de ataque cardíaco y de muerte durante el ejercicio	702



Capítulo 21. Obesidad, diabetes y actividad física

710



Obesidad	712
Diabetes	734

Glosario	745
Índice alfabético	759
Abreviaturas científicas comunes y conversiones	775

PRÓLOGO

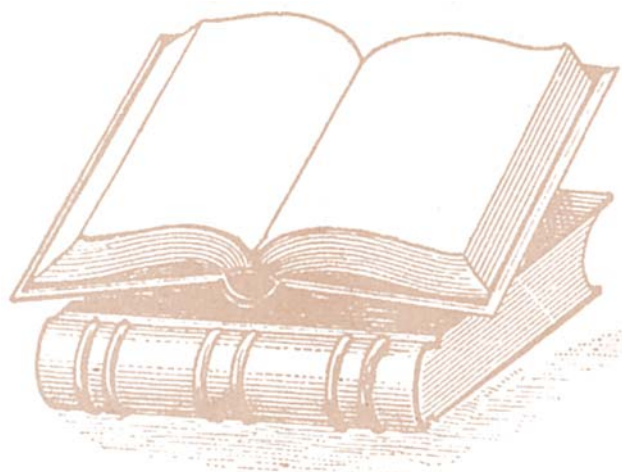
Nuestro cuerpo es una máquina asombrosamente compleja. La totalidad de sus células y tejidos se comunican entre sí, y si pensamos en los numerosos procesos que tienen lugar en cualquier momento en nuestro cuerpo, resulta verdaderamente notable que todos los sistemas corporales funcionen tan bien juntos. Incluso al estar sentado leyendo este libro, nuestro corazón bombea sangre al cuerpo, nuestros intestinos digieren y absorben nutrientes, nuestros riñones eliminan los productos de desecho, los pulmones aportan oxígeno, y nuestros músculos sostienen el libro mientras el cerebro se concentra en la lectura. Aunque podamos tener la sensación de que estamos descansando, nuestro cuerpo está fisiológicamente muy activo. Imaginemos entonces lo mucho más activos que nuestros sistemas corporales están cuando llevamos a cabo movimientos activos. Conforme nuestra actividad física aumenta, también lo hace la actividad fisiológica de nuestros músculos. Los músculos activos requieren más nutrientes, más oxígeno, más actividad metabólica y por lo tanto más eliminación de productos de desecho. ¿Cómo reacciona nuestro cuerpo a las elevadas exigencias fisiológicas de la actividad física?

Ésta es la cuestión clave cuando estudiamos la fisiología del esfuerzo y del deporte, a la que damos respuesta en este libro. La *Fisiología del esfuerzo y del deporte* nos introduce en dichos campos. Nuestro objetivo es construir sobre la base de los conocimientos desarrollados con los trabajos de un curso sobre anatomía y fisiología, y aplicar los principios aprendidos en relación con el rendimiento del cuerpo y sus reacciones a la actividad física.

Comenzamos en el capítulo 1 con un análisis histórico de la fisiología del esfuerzo y del deporte tal como ha surgido de las disciplinas madres, que son la anatomía y la fisiología, y explicamos los principios básicos que se usarán a lo largo del texto. En cada una de las partes I hasta la III, ana-

lizamos los sistemas fisiológicos seleccionados, concentrándonos en sus reacciones a las series agudas de ejercicio y considerando por último cómo se adaptan estos sistemas a la exposición a largo plazo al ejercicio (entrenamiento). En la parte I nos centramos en cómo los sistemas muscular y nervioso se coordinan para producir el movimiento corporal. En la parte II tratamos cómo los sistemas energéticos básicos proporcionan la energía necesaria para el movimiento y la función del sistema endocrino en la regulación del metabolismo. En la parte III contemplamos los sistemas cardiovascular y respiratorio (cómo transportan los nutrientes y el oxígeno a los músculos activos y cómo se llevan los productos de desecho de dichos músculos durante la actividad física).

En la parte IV cambiamos la perspectiva para examinar el impacto del ambiente externo sobre el rendimiento físico. Consideramos la reacción del cuerpo al calor y al frío, y luego examinamos el impacto de las bajas presiones atmosféricas que se experimentan a gran altura y de las altas presiones atmosféricas que se experimentan al bucear.



Concluimos considerando los efectos de un ambiente único (el de la pequeña gravedad), el que se experimenta en un viaje espacial.

En la parte V desviamos nuestra atención al modo en que los deportistas pueden optimizar el rendimiento físico. Evaluamos los efectos de distintas intensidades de entrenamiento. Pasamos revista a las necesidades dietéticas especiales de los deportistas y la forma en que la nutrición puede mejorar el rendimiento. Tenemos en cuenta la importancia de una composición corporal adecuada para el rendimiento. Finalmente, abordamos el empleo de ayudas ergogénicas: sustancias cuyo propósito es mejorar la capacidad para el ejercicio.

En la parte VI examinamos consideraciones especiales para grupos específicos de población de deportistas. Observamos primero los procesos de crecimiento y desarrollo y cómo estos afectan a las capacidades de rendimiento de los deportistas jóvenes. Evaluamos los cambios que tienen lugar en el rendimiento físico a medida que envejecemos y exploramos las formas en que la actividad física puede prolongar nuestra juventud. Por último, examinamos los temas concernientes al género y especialmente las cuestiones fisiológicas de los deportistas.

En la parte VII, la última del libro, dirigimos nuestra atención a la aplicación de la fisiología del esfuerzo y del deporte para la prevención y tratamiento de diversas enfermedades, y el uso del ejercicio para la rehabilitación. Nos centramos en las enfermedades cardiovasculares, la obesidad y la diabetes, y después cerramos el libro con una discusión sobre la programación del ejercicio para mantener la salud y el *fitness*.

La *Fisiología del esfuerzo y del deporte* presenta un enfoque novedoso del estudio de la fisiología del esfuerzo y del deporte. Está diseñado para el lector estudiante, con el objeto de hacer su aprendizaje fácil y agradable. Este texto es global, pero no queremos que el lector se sienta abrumado por su tamaño o su alcance. Hemos incluido características especiales que sirven de ayuda para ir avanzando por el libro.

Una vez que comenzamos una parte, encontramos un breve texto que describe los contenidos de los capítulos de esta parte. Todos los capítulos, por lo tanto, comienzan con una visión general y un esquema del capítulo con números de página para facilitar la localización del material. Dentro de un capítulo, los puntos clave están enmarcados

formado por músculo, tendón y hueso en condiciones normales. Como veremos en el capítulo 3, es muy probable que la reducción del potencial postsináptico inhibitorio sea un factor principal que explica el aumento de la fuerza que experimentamos después de un período de entrenamiento contra resistencia.

Por suma se entiende el efecto acumulativo de todos los potenciales graduados individuales procesados por la eminencia axónica.

Punto clave

Ahora que hemos considerado cuidadosamente la función de las unidades más básicas del sistema nervioso, las neuronas, estamos listos para examinar cómo funcionan juntas estas células. Las neuronas individuales se agrupan en haces. En el sistema nervioso central (encéfalo y médula espinal), estos haces reciben la denominación de tractos o caminos. Los haces de neuronas en el sistema nervioso periférico reciben el nombre de nervios.

Los potenciales postsinápticos excitatorios son despolarizaciones de la membrana postsináptica. Los potenciales postsinápticos inhibitorios son hiperpolarizaciones de esta membrana.

Un solo terminal presináptico no puede generar una despolarización suficiente como para activar un potencial de acción. Se necesitan múltiples señales. Éstas pueden venir de numerosas neuronas o de una sola cuando varios terminales del axón liberan neurotransmisores repetida y rápidamente.

La eminencia del axón mantiene un control total de todos los potenciales postsinápticos excitatorios y de los inhibitorios. Cuando su suma satisface o supera el umbral de la despolarización, tiene lugar un potencial de acción. Este proceso de acumulación de señales de entrada es conocido como suma.

Cuadros de repaso

Sistema nervioso central (SNC)

Para comprender cómo incluso los estímulos menores puede causar actividad muscular, debemos recurrir a continuación la complejidad del sistema nervioso. Dirijamos nuestra atención a los diversos componentes del sistema nervioso y a cómo efectúan el movimiento. En la figura 2.5 se relacionan estos componentes. En esta sección vamos a considerar una visión general de los componentes del sistema nervioso central. Comenzaremos brevemente sus funciones.

El sistema nervioso central tiene 100.000 millones de neuronas.

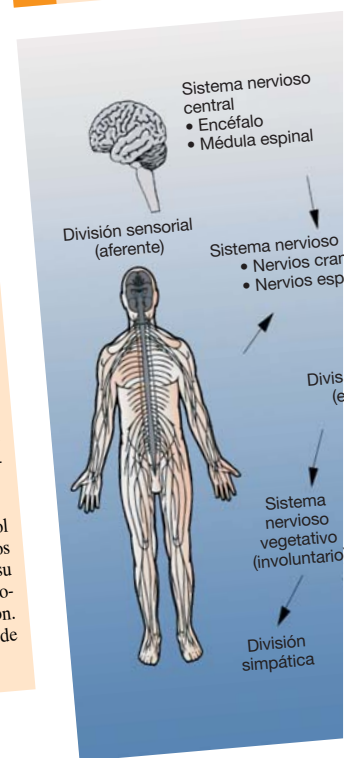


Figura 2.5 Organización funcional del sistema nervioso

en recuadros azules para una rápida referencia. Los puntos clave se ponen de relieve en el texto en azul, se relacionan al final del capítulo y se de-

finen en el glosario al final del libro. Los recuadros de análisis difundidos por todos los capítulos resumen los puntos importantes presentados.

CONTROL NEUROLÓGICO DEL MOVIMIENTO

Encéfalo

Nuestro encéfalo se compone de varias partes. Para nuestros propósitos, lo subdividiremos en cuatro regiones:

1. El cerebro.
2. El diencefalo.
3. El cerebelo.
4. El tronco cerebral.

En la figura 2.6 se ilustran estas partes del encéfalo. Veámoslas brevemente.

Cerebro

El cerebro se compone de los hemisferios cerebrales derecho e izquierdo. Éstos están conectados entre sí por haces de fibras (tractos) que reciben la denominación de **cuerpo caloso**, permitiendo que los dos hemisferios se comuniquen entre sí. La corteza cerebral forma la porción exterior de los hemisferios cerebrales y se considera que es el lugar de la mente y del intelecto. También se le llama sustancia gris, lo cual refleja simplemente su color distintivo por falta de mielina en los cuerpos celulares localizados en esta área. La corteza cerebral es nuestro cerebro consciente. Nos permite pensar, ser conscientes de los estímulos sensores y controlar voluntariamente nuestros movimientos.

El cerebro consta de cinco lóbulos: cuatro lóbulos exteriores y la ínsula central, que no vamos a tratar. Sus cuatro lóbulos principales tienen las funciones generales siguientes:

1. **El lóbulo frontal:** intelecto general y control motor.
2. **El lóbulo temporal:** entrada auditora y su interpretación.
3. **El lóbulo parietal:** entrada sensora general y su interpretación.
4. **El lóbulo occipital:** entrada visual y su interpretación.

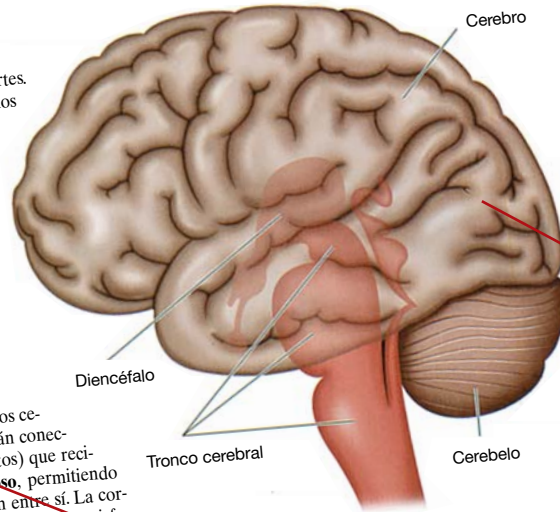


Figura 2.6 Las cuatro regiones principales del encéfalo.

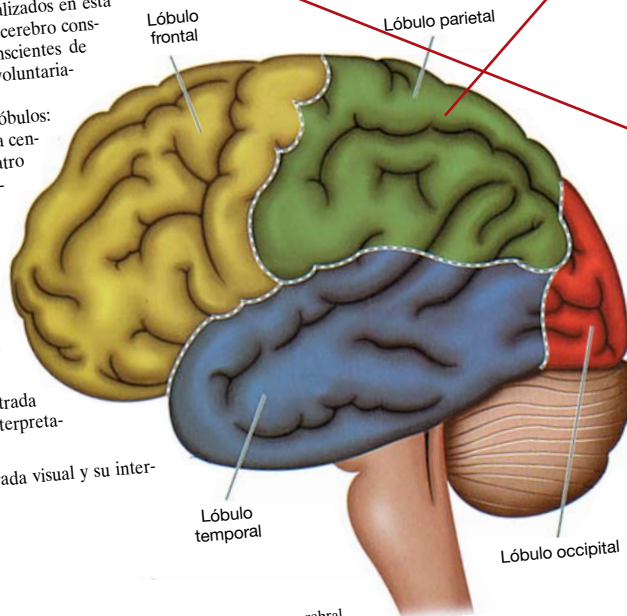


Figura 2.7 Áreas funcionales de la corteza cerebral.

Índice cromático de los capítulos

Dibujos anatómicos a todo color

Término clave

Al final del capítulo, se relacionan las expresiones clave para verificar la comprensión de nuestro vocabulario. Las cuestiones para estudiar permiten examinar nuestros conocimientos del contenido del capítulo. También aparecen referencias numeradas a lo largo de todo el texto, al igual que varias lecturas seleccionadas, que proporcionan información adicional sobre cualquier tema de especial interés dentro del capítulo. Por último, al final del libro hallaremos un glosario completo que incluye definiciones de todas las expresiones clave, un índice minucioso y una tabla de conversiones y de equivalentes métricos para una fácil referencia.

Muchos lectores leerán este libro únicamente porque es un texto obligatorio para un curso que se les exige. Pero tenemos la esperanza de que la información les seduzca tanto como para continuar estudiando esta área relativamente nueva y emocionante. Pretendemos al menos incrementar el interés y la comprensión del lector sobre las maravillosas capacidades de su cuerpo para llevar a cabo esfuerzos físicos, para adaptarse a situaciones de estrés y para mejorar sus capacidades fisiológicas. Lo que el lector aprenda aquí será práctico no sólo para todo aquel que siga una carrera en la ciencia del ejercicio o del deporte, sino también para cualquiera que quiera ser activo, sano y que desee estar en buena forma.

Lista de términos clave empleados en el capítulo

Expresiones clave

conducción saltatoria
despolarización
engrama
hiperpolarización
huso muscular
impulso nervioso
integración sensomotora
neurotransmisor
órgano tendinoso de Golgi
potencial de acción
potencial de membrana en reposo
potencial graduado
potencial postsináptico excitatorio
potencial postsináptico inhibitorio
principio de la movilización ordinaria
reflejo motor
sinapsis
sumación
umbral
unión neuromuscular
vaina de mielina

Cuestiones para estudiar

1. Nombrar las diferentes regiones de una neurona.
2. Explicar el potencial de membrana en reposo. ¿Qué lo produce? ¿Cómo se mantiene?
3. Describir un potencial de acción. ¿Qué se precisa antes de que se dispare un potencial de acción? Una vez se ha disparado, ¿cuál es la secuencia de acontecimientos?
4. Explicar cómo se transmite un impulso eléctrico desde una neurona presináptica hasta una neurona postsináptica. Describir una sinapsis y una unión neuromuscular.
5. ¿Cómo se genera un potencial de acción en una neurona postsináptica?
6. ¿Cuáles son las divisiones principales del sistema nervioso? ¿Cuáles son sus funciones más importantes?
7. ¿Qué centros del cerebro tienen funciones importantes

tes en el control del movimiento, y cuáles son estas funciones?

8. ¿En qué se diferencian los sistemas simpático y parasimpático? ¿Cuál es su trascendencia para llevar a cabo actividades físicas?
9. Explicar cómo se producen los movimientos en respuesta al contacto con un objeto caliente.
10. Describir la función de los husos musculares en el control de la acción muscular.
11. Describir la función del órgano tendinoso de Golgi en el control de la acción muscular.
12. ¿Qué es una unidad motora, y cómo se movilizan las unidades motoras?

Bibliografía

1. Edstrom, L., & Grimby, L. (1986). Effect of exercise on the motor unit. *Muscle and Nerve*, 9, 104-126.
2. Guyton, A.C., & Hall, J.E. (1996). *Textbook of medical physiology* (9.ª ed.). Filadelfia Saunders.
3. Marieb, E.N. (1995). *Human anatomy and physiology* (3.ª ed., p. 387) Nueva York: Benjamin/Cummings.
4. Petajan, J.H., Gappmaier, E., White, A.T., Spencer, M.K., Mino, L., & Hicks, R.W. (1996). Impact of aerobic training on fitness and quality of life in multiple sclerosis. *Annals of Neurology*, 39, 432-441.
5. Pette, D., & Vrbova, G. (1985). Neural control of phenotypic expression in mammalian muscle fibers. *Muscle and Nerve*, 8, 676-689.

Lecturas seleccionadas

- Binder, M.D., Heckman, C.J., & Powers, R.K. (1996). The physiological control of motoneuron activity. En L.B. Rowell & J.T. Shepherd (Eds.), *Handbook of physiology: Section 12. Exercise: Regulation and integration of multiple systems* (págs. 3-53). Nueva York: Oxford University Press.
- Christensen, N.J., & Galbo, H. (1983). Sympathetic nervous activity during exercise. *Annual Review of Physiology*, 45, 139-153.

Bibliografía sobre el material usado en el capítulo

Preguntas para probar tus conocimientos

Lecturas adicionales seleccionadas para ampliar conocimientos