

25 Fisiología integrada III: ejercicio

Uno de los aspectos fascinantes de la fisiología humana durante el ejercicio es que nos brinda información básica acerca de la naturaleza y el rango de capacidades funcionales de los distintos sistemas.

Per-Olof Astrand y Kaare Rodahl, Textbook of Work Physiology, 1977

Red de interacción de proteínas

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

25.1 Metabolismo y ejercicio 787

25.1.1 Identifique las fuentes de ATP usadas por los músculos en actividad durante el ejercicio aeróbico y anaeróbico y durante el ejercicio de baja intensidad y de alta intensidad.

25.1.2 Compare las vías metabólicas de producción de ATP durante el ejercicio aeróbico y anaeróbico.

25.1.3 Describa los cambios en los niveles plasmáticos de hormonas durante el ejercicio y explique cómo los efectos de las hormonas sobre el metabolismo de la glucosa ayudan al ejercicio muscular.

25.1.4 Explique cómo cuantifican los fisiólogos la intensidad de los períodos de ejercicios.

25.1.5 Identifique los factores que pueden limitar el ejercicio.

25.2 Respuestas ventilatorias al ejercicio 790

25.2.1 Describa los cambios en el consumo de oxígeno y la ventilación durante y después del ejercicio y explique cómo se producen estos cambios.

25.2.2 Explique los cambios en los gases en sangre arterial y venosa y en el pH del plasma durante el ejercicio en distintas intensidades.

25.3 Respuestas cardiovasculares al ejercicio 791

25.3.1 Explique cómo varían el gasto cardíaco, el flujo sanguíneo a los tejidos y la presión arterial durante el ejercicio en distintas intensidades.

25.3.2 Explique los mecanismos de control que influyen en la presión arterial y el flujo sanguíneo, y describa cómo varían durante el ejercicio.

25.4 Respuestas anticipadas al ejercicio 793

25.4.1 Describa los reflejos de prealimentación que anticipan los desafíos en la homeostasis durante el ejercicio.

25.5 Regulación de la temperatura durante el ejercicio 794

25.5.1 Diagrame las respuestas termorreguladoras homeostáticas y los mecanismos que se ponen en marcha durante los períodos de ejercicio.

25.6 Ejercicio y salud 794

25.6.1 Describa la influencia del ejercicio sobre distintos aspectos de la salud, especificando lo que está comprobado y lo que está sugerido.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

- 104 Metabolismo aerobio y anaerobio
- 17 Reflejos de anteroalimentación
- 388 Metabolismo muscular
- 395 Contracción isométrica e isotónica
- 464 Control de la frecuencia cardíaca y la contractilidad
- 492 Control de la tensión arterial
- 488 Control local del flujo sanguíneo
- 552 Ventilación alveolar
- 580 Quimiorreceptores respiratorios
- 636 Deshidratación
- 708 Insulina
- 719 Termorregulación

En julio de 2008, el mundo siguió con ansiedad el camino de Michael Phelps hacia el récord de su octava medalla olímpica en natación en los juegos de 2008. El trabajo realizado por Phelps y otros cientos de atletas olímpicos en todo el mundo representa uno de los desafíos más comunes a la homeostasis del cuerpo: el ejercicio. El ejercicio puede hacerse de muchas maneras. La carrera a distancia, la natación y el ciclismo son ejemplos de ejercicio de resistencia dinámica. El levantamiento de pesas y el entrenamiento de fuerza son ejemplos de ejercicios de fuerza muscular. En este capítulo examinamos los ejercicios dinámicos como un desafío a la homeostasis en el que hay una respuesta integrada de múltiples sistemas del cuerpo.

El ejercicio es un ejemplo ideal para enseñar la integración fisiológica. Todos estamos familiarizados con el ejercicio, y, a excepción del alpinismo de grandes alturas o el buceo en profundidad, no requiere condiciones ambientales especiales. Además, el ejercicio es un estado fisiológico normal, no es un estado patológico, aunque puede ser afectado por enfermedades y, en exceso, puede producir lesiones.

Además de ser un excelente ejemplo didáctico, la fisiología del ejercicio es un área muy activa de investigación fisiológica integral. Aún no se comprende del todo el funcionamiento coordinado de múltiples sistemas del cuerpo debido a las complejas interacciones entre los mecanismos de control nervioso y locales. Los investigadores utilizan una combinación de modelos animales y estudios en sujetos humanos, incluyendo atletas de elite,

PROBLEMA RELACIONADO Hipertermia maligna

Zach, de siete años, saltó del autobús de la escuela y corrió a los brazos de su madre luego de un largo día de escuela. “Estás algo caliente, Zach. ¿Te sientes bien?” “Hacia calor en la clase de gimnasia pero estoy bien. ¿Puedo ir a jugar con Jacob?” “Sí, pero vuelve a casa en una hora.” “Está bien, mamá, te veré luego.” Y Zach salió. Treinta minutos después sonó el timbre. Era Jacob. “¡Venga rápido, algo le pasa a Zach! ¡Creo que tiene una convulsión!” En poco tiempo, los servicios de emergencia estaban llevando a Zach al hospital.

787 789 793 794 796

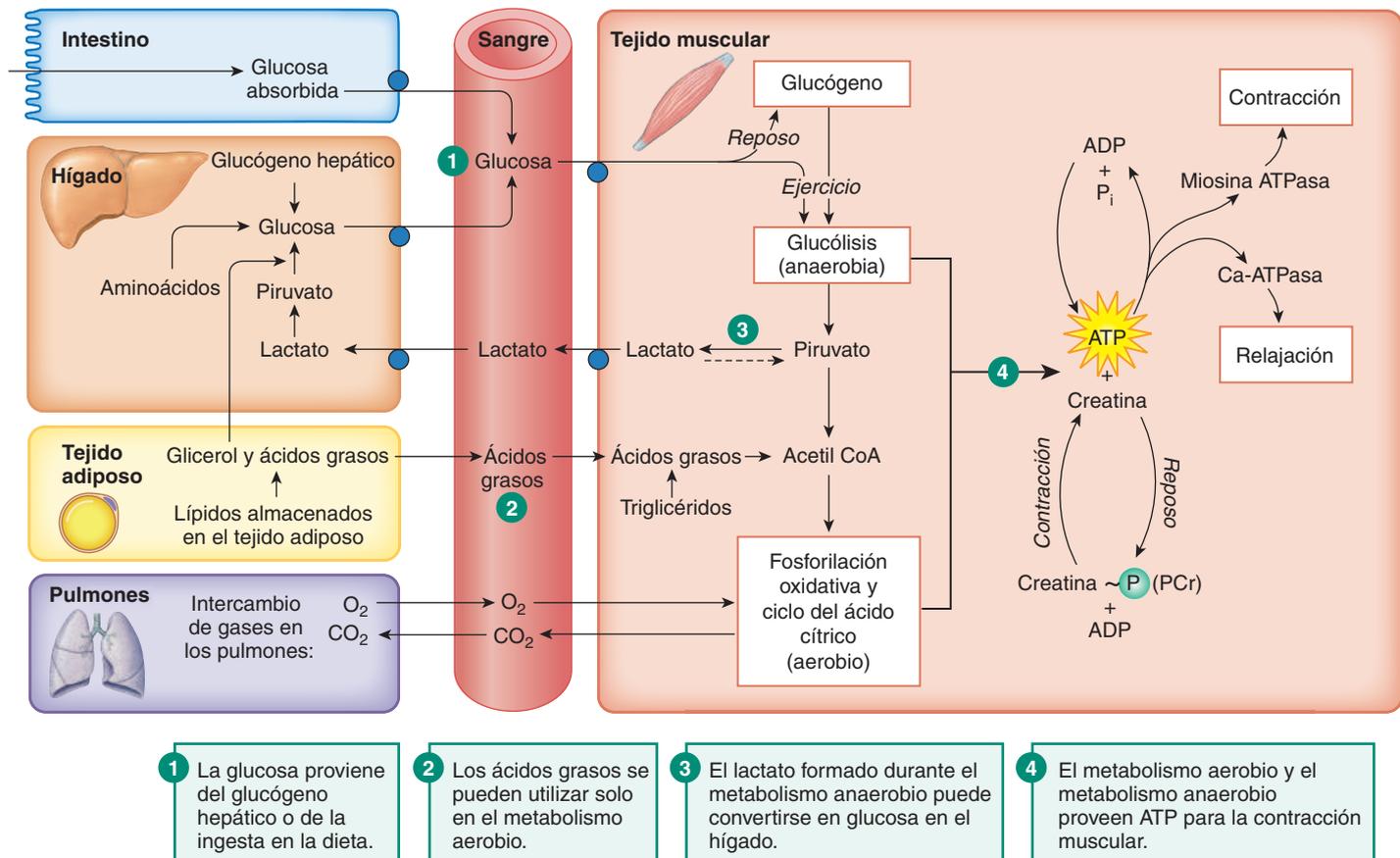
para poder explicar cómo se adapta el cuerpo a las demandas metabólicas del ejercicio. Este capítulo no intenta ser una explicación completa de la fisiología del ejercicio. Para mayor información, se puede consultar un texto de fisiología del ejercicio.

25.1 Metabolismo y ejercicio

El ejercicio comienza con la contracción del músculo esquelético, un proceso activo que requiere ATP para obtener energía. ¿De dónde proviene el ATP necesario para la contracción muscular?

FIGURA 25.1 Resumen del metabolismo muscular

El ATP necesario para la contracción muscular se produce en forma continua mediante el metabolismo aerobio de la glucosa y los ácidos grasos. Durante períodos breves de actividad intensa, cuando la demanda de ATP excede la velocidad de producción aerobia de ATP, la glucólisis anaerobia produce ATP, lactato y H⁺.



Una pequeña cantidad se encuentra en la fibra muscular al comienzo de la contracción (**Fig. 25.1 1**). Cuando este ATP es utilizado para la contracción muscular y se transforma en ADP, otro compuesto de fosfato, la **fosfocreatina (PCr)**, transfiere energía desde su enlace de fosfato de alta energía unido al ADP. Esta transferencia repone el ATP necesario para el músculo (p. 388).

La combinación del ATP muscular y la fosfocreatina es suficiente para abastecer la energía necesaria para 15 segundos de ejercicio intenso, como una carrera corta o el levantamiento de pesas. Luego, las fibras musculares deben formar nuevo ATP a partir de la energía almacenada en los nutrientes. Algunas de estas moléculas se encuentran en la misma fibra muscular. Otras deben moverse desde el hígado y el tejido adiposo y ser transportadas hacia los músculos a través de la circulación.

Los sustratos primarios para la producción de energía son los carbohidratos y las grasas. La producción más eficaz de ATP ocurre a través de las vías aerobias como la vía de la glucólisis-ciclo del ácido cítrico (p. 104). Si la célula tiene las cantidades adecuadas de oxígeno para realizar la fosforilación oxidativa, puede metabolizar la glucosa y los ácidos grasos para obtener ATP (**Fig. 25.1 1, 2**).

Si los requerimientos de oxígeno de una fibra muscular exceden el aporte de oxígeno, la producción de energía a partir de los ácidos grasos disminuye y el metabolismo de la glucosa se realiza por vías anaerobias. En condiciones de bajo nivel de oxígeno, si la célula no tiene oxígeno suficiente para la fosforilación oxidativa, el producto final de la glucólisis –el piruvato– se convierte en lactato **3** en lugar de convertirse en acetil CoA y entrar en el ciclo del ácido cítrico (p. 109). En general, el ejercicio que depende del metabolismo anaerobio no puede sostenerse durante un tiempo prolongado. Las células que obtienen su ATP mediante el metabolismo anaerobio de la glucosa a lactato realizan *metabolismo glucolítico*.

La ventaja del metabolismo anaerobio es su velocidad, pues produce ATP 2,5 veces más rápido que las vías aerobias (**Fig. 25.2**). Pero esta ventaja se acompaña de dos desventajas: 1) el metabolismo anaerobio forma solo 2 ATP por cada molécula de glucosa, comparado con un promedio de 30-32 ATP por molécula de glucosa en el metabolismo oxidativo y 2) el metabolismo anaerobio produce H^+ , que contribuye a un estado de acidosis metabólica (aunque el CO_2 generado durante el ejercicio es una fuente más importante de ácido). Durante el ejercicio casi siempre utilizamos una combinación de metabolismo aerobio y anaerobio.

¿De dónde proviene la glucosa necesaria para la producción aerobia y anaerobia de ATP? El cuerpo tiene tres fuentes de glucosa: la glucosa disuelta en el plasma, los depósitos intracelulares de glucógeno en el músculo y el hígado, y la formación de “nueva” glucosa en el hígado por *gluconeogénesis* (p. 706). Los depósitos de glucógeno del músculo y del hígado brindan el sustrato para obtener energía suficiente para liberar unas 2000 kcal (equivalente a unos 30 km de carrera en una persona promedio), lo que es más que suficiente para el ejercicio normal. Sin embargo, la glucosa sola no es suficiente para obtener el ATP en atletas de resistencia como corredores de maratones. Para cubrir sus demandas de energía, los atletas deben utilizar la energía almacenada en las grasas.

En realidad, el ejercicio aeróbico de cualquier duración utiliza ácidos grasos y glucosa como sustratos para la producción de ATP. Unos 30 minutos después de comenzado el ejercicio aeróbico, aumenta la concentración de ácidos grasos libres en la sangre. Esto indica que se están movilizando las grasas del tejido adiposo. Sin embargo, la descomposición de los ácidos grasos mediante el proceso de β -oxidación (p. 706) es más lenta que el metabolismo de la glucosa a través de la glucólisis, de modo que las fibras musculares utilizan una combinación de ácidos grasos y glucosa para cubrir sus necesidades energéticas.

Durante el ejercicio a baja intensidad, la mayor parte de la energía para la producción de ATP proviene de las grasas (**Fig. 25.3**) y por ello la caminata es una buena forma de perder peso. Al aumentar la intensidad del ejercicio, el ATP se consume más rápidamente, y las fibras musculares comienzan a utilizar una mayor proporción de glucosa. Cuando el ejercicio excede el 70% del máximo, los carbohidratos se convierten en la principal fuente de energía.

El entrenamiento aeróbico aumenta los depósitos de grasa y de glucógeno en las fibras musculares. El entrenamiento de resistencia también aumenta la actividad de las enzimas que participan en la β -oxidación y convierte las fibras musculares de contracción rápida glucolíticas en fibras de contracción rápida glucolíticas oxidativas (p. 390).

Las hormonas regulan el metabolismo durante el ejercicio

Varias hormonas que influyen en el metabolismo de la glucosa y las grasas cambian su patrón de secreción durante el ejercicio.

FIGURA 25.2 Metabolismo aerobio y metabolismo anaerobio

El metabolismo anaerobio produce ATP 2,5 veces más rápido que el metabolismo anaerobio, pero el metabolismo aerobio puede abastecer al ejercicio durante horas.

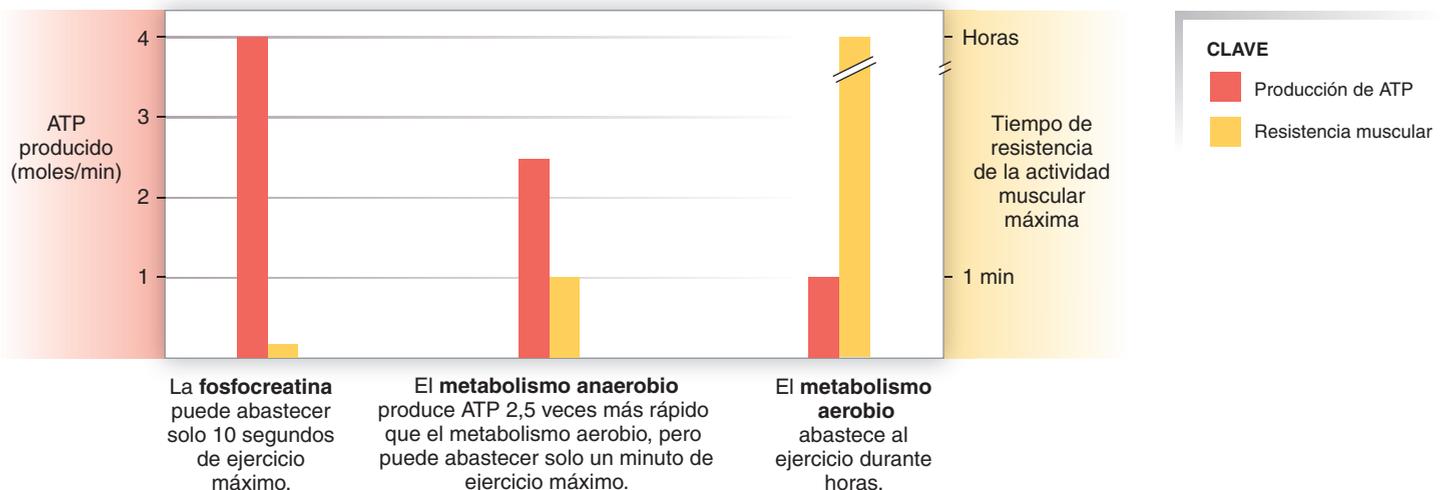
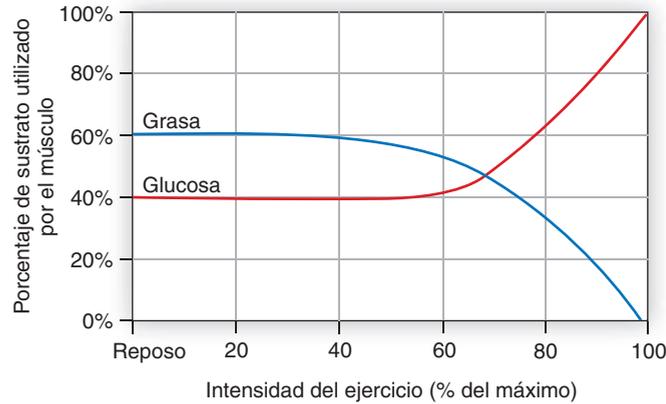


FIGURA 25.3 Uso del sustrato de energía durante el ejercicio

En el ejercicio de baja intensidad, el músculo obtiene más energía de las grasas que de la glucosa. Durante el ejercicio de alta intensidad (niveles superiores al 70% del máximo), la principal fuente de energía es la glucosa.



Datos de G. A. Brooks y J. Mercier.
J App Physiol 76: 2253–2261, 1994.

Las concentraciones plasmáticas de glucagón, cortisol, las catecolaminas (epinefrina y norepinefrina) y la hormona de crecimiento aumentan durante el ejercicio. El cortisol y las catecolaminas, junto con la hormona de crecimiento, promueven la conversión de los triglicéridos en glicerol y ácidos grasos. El glucagón, las catecolaminas y el cortisol también movilizan al glucógeno hepático, lo que aumenta los niveles de glucosa en el plasma. Durante el ejercicio es necesario un medio hormonal que favorezca la conversión de glucógeno en glucosa, pues la glucosa es el principal sustrato de energía para el músculo en actividad.

Si bien las concentraciones plasmáticas de glucosa aumentan con el ejercicio, la secreción de insulina disminuye. Esta respuesta es contraria a lo que se podría predecir, pues un aumento de la glucosa plasmática estimula la liberación de insulina. Sin embargo, durante el ejercicio, la secreción de insulina se suprime, probablemente por estimulación simpática de las células beta del páncreas.

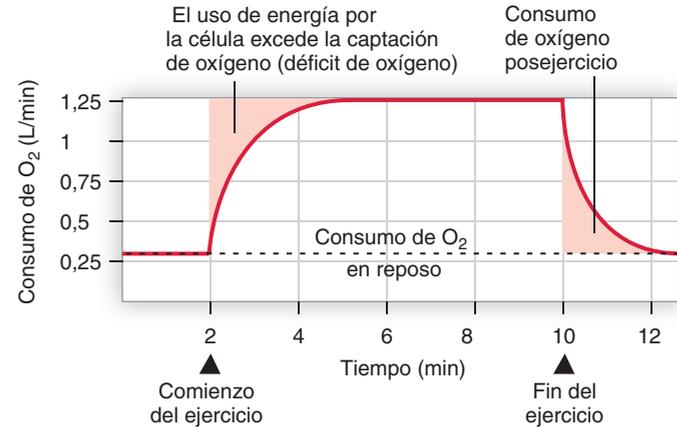
¿Cuál sería la ventaja de niveles más bajos de insulina durante el ejercicio? Por un lado, menos insulina significa que el resto de las células del cuerpo reducen la captación de glucosa, para dejar que la glucosa sanguínea sea utilizada por los músculos. Por otro lado, las células musculares en actividad no son afectadas por los bajos niveles de insulina pues no requieren insulina para captar glucosa. La contracción muscular estimula la translocación de transportadores GLUT4 independiente de insulina a la membrana muscular, aumentando la captación de glucosa en proporción a la actividad contráctil.

El consumo de oxígeno se relaciona con la intensidad del ejercicio

Las actividades que llamamos ejercicio varían en intensidad y duración, desde la explosión de energía rápida y breve en una carrera corta o en levantamiento de pesas, hasta el esfuerzo sostenido de un maratonista. Los fisiólogos cuantifican la intensidad de un período de ejercicio midiendo el consumo de oxígeno (VO_2). El **consumo de oxígeno** se refiere a que el oxígeno es utilizado, o consumido, durante la fosforilación oxidativa, al combinarse con el hidrógeno en la mitocondria para formar agua (p. 108).

FIGURA 25.4 Consumo de oxígeno y ejercicio

El suministro de oxígeno a las células en actividad es menor que el uso de la energía, y se crea un déficit de oxígeno. Este déficit de oxígeno es compensado por el consumo de oxígeno posejercicio.



El consumo de oxígeno es una medida de la respiración celular y se mide en litros de oxígeno consumido por minuto. La *tasa máxima de consumo de oxígeno de una persona* ($\text{VO}_{2\text{máx}}$) es un indicador de la capacidad de realizar ejercicios de resistencia. Cuanto mayor es la $\text{VO}_{2\text{máx}}$, mayor es la capacidad de la persona de realizar un trabajo.

Una característica metabólica del ejercicio es el aumento del consumo de oxígeno que persiste incluso después de que cesa la actividad (**Fig. 25.4**). Cuando el ejercicio comienza, el consumo de oxígeno aumenta tan rápidamente que no alcanza a compensarse con el suministro de oxígeno a los músculos. Durante este tiempo, el ATP necesario para la contracción muscular proviene de las reservas de ATP del músculo, la fosfocreatina y el metabolismo aerobio realizado con el oxígeno almacenado en la mioglobina del músculo y la hemoglobina de la sangre (p. 391).

PROBLEMA RELACIONADO

Cuando la ambulancia llegó a la sala de emergencia, Zach estaba confundido, tenía una frecuencia cardíaca acelerada (*taquicardia*) y una temperatura de 40,5 °C. El médico de emergencias pensó que podría tener un golpe de calor por ejercicios, pero al examinarlo notó que su mandíbula estaba apretada. El Dr. Jones le preguntó a la madre de Zach si él había tenido algún problema con el ejercicio antes de este evento. “Pues, sí” respondió la madre. “Se ha quejado de calambres musculares y su orina ha estado oscura. Tenemos una cita con su médico mañana por este motivo.” La combinación de fiebre alta, mandíbula apretada, calambres musculares y orina oscura le hizo pensar al Dr. Jones en hipertermia maligna y no en golpe de calor. La *hipertermia maligna* es una afección potencialmente fatal causada por una mutación en el gen que codifica al receptor de rianodina (RyR) del músculo esquelético. Se desencadena durante una cirugía por exposición a ciertos anestésicos o al relajante muscular succinilcolina. Pero hay evidencias que indican que algunas personas susceptibles a hipertermia maligna pueden desarrollar esta afección luego de un ejercicio intenso o una exposición al calor.

P1: ¿Dónde se encuentra el RyR en las fibras del músculo esquelético y cuál es su papel en la contracción muscular?

El uso de estos depósitos musculares crea un déficit de oxígeno pues su reemplazo requiere el metabolismo aerobio y la captación de oxígeno. Una vez que cesa el ejercicio, el consumo de oxígeno tarda un tiempo en volver al nivel de reposo. El **consumo de oxígeno excesivo posejercicio** (llamado anteriormente deuda de oxígeno) representa el oxígeno utilizado para metabolizar el lactato, restaurar el ATP y los niveles de fosfocreatina, y reponer el oxígeno unido a la mioglobina. Otros factores que participan en la elevación del consumo de oxígeno posejercicio incluyen el aumento de la temperatura corporal y las catecolaminas circulantes.

Factores que limitan al ejercicio

¿Qué factores limitan la capacidad de ejercicio de una persona? En cierta forma, la respuesta depende del tipo de ejercicio. El entrenamiento de fuerza muscular depende en gran medida del metabolismo anaerobio para cubrir las necesidades de energía. La situación es más compleja con el ejercicio aerobio de resistencia. ¿El factor limitante en el ejercicio aerobio es la capacidad del músculo en actividad de utilizar el oxígeno en forma eficaz? ¿O es la capacidad de transporte de oxígeno del sistema cardiovascular a los tejidos? ¿O lo es la capacidad del sistema respiratorio de proveer oxígeno a la sangre?

Un posible factor limitante en el ejercicio es la capacidad de las fibras musculares de obtener y utilizar el oxígeno. Si el número de mitocondrias en el músculo es limitado, o si el oxígeno que reciben es insuficiente, las fibras musculares no podrán producir ATP con rapidez. Los datos sugieren que el metabolismo muscular no es el factor limitante de la capacidad máxima de ejercicio, aunque se ha demostrado que el metabolismo muscular influye en la capacidad submáxima de ejercicio. Esto explica el aumento del número de mitocondrias y capilares en el músculo con el entrenamiento de resistencia.

La pregunta acerca de si el factor limitante del ejercicio máximo sería el sistema pulmonar o el aparato cardiovascular se resolvió cuando los investigadores demostraron que la ventilación llega solo al 65% de su máximo cuando el gasto cardíaco llega al 90% de su valor máximo. A partir de esta información, los fisiólogos del ejercicio concluyeron que el principal factor que determina el consumo máximo de oxígeno es la capacidad de transporte de oxígeno y nutrientes del aparato cardiovascular al músculo a una velocidad que permita el metabolismo aerobio. Uno de los objetivos del entrenamiento es mejorar la eficacia cardíaca.

A continuación, examinaremos los reflejos que integran las funciones respiratoria y cardiovascular durante el ejercicio.

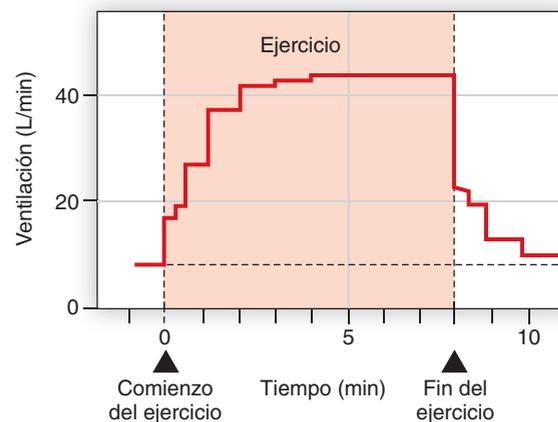
25.2 Respuestas ventilatorias al ejercicio

¿Qué ocurre con la respiración durante el ejercicio? El ejercicio se asocia con un aumento de la frecuencia y la profundidad respiratoria, lo que produce un aumento de la ventilación alveolar (p. 553). La **hiperventilación** o **hiperpnea en el ejercicio** se debe a una combinación de señales de prealimentación de neuronas centrales de la corteza motora y del estímulo sensitivo de los receptores periféricos.

Cuando comienza el ejercicio, los mecanorreceptores y los propioceptores (p. 417) de los músculos y las articulaciones envían información acerca del movimiento hacia la corteza motora. Las vías descendentes de la corteza motora hacia el centro de control de la respiración del bulbo raquídeo aumentan la ventilación en forma inmediata (**Fig. 25.5**).

FIGURA 25.5 Ventilación y ejercicio

La tasa de ventilación aumenta bruscamente al comenzar el ejercicio, a pesar de que no ha variado la P_{CO_2} ni la P_{O_2} arteriales. Esto sugiere que existe un componente de prealimentación en la respuesta ventilatoria.



Modificado de P. Dejours. *Handbook of Physiology*. Washington, D.C.: American Physiological Society, 1964.

Si continúa la contracción muscular, la información sensitiva vuelve al centro de control respiratorio para asegurar que la ventilación se adecue al uso de oxígeno en los tejidos. Entre los receptores sensitivos que participan en la respuesta secundaria se incluyen los quimiorreceptores centrales, carotídeos y aórticos que detectan la P_{CO_2} , el pH y la P_{O_2} (p. 580); los propioceptores en las articulaciones, y receptores ubicados en el músculo en actividad. Antiguamente se creía que los receptores pulmonares al estiramiento tenían un papel en esta respuesta, pero se comprobó que los pacientes con trasplantes de corazón-pulmón, en los que están ausentes las conexiones neurales entre el pulmón y el cerebro, tienen una respuesta ventilatoria normal al ejercicio.

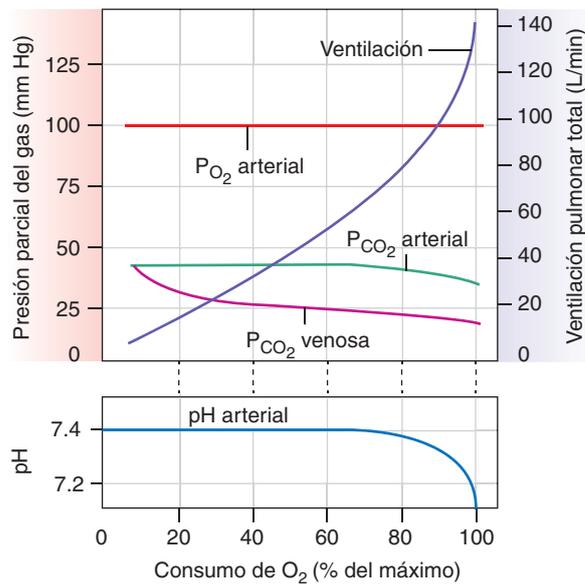
La hiperventilación durante el ejercicio mantiene un valor casi normal de P_{O_2} y P_{CO_2} en sangre arterial, aumentando la ventilación alveolar en proporción al nivel de ejercicio. La compensación es tan efectiva que, si se controlan la P_{O_2} , la P_{CO_2} y el pH en sangre arterial durante el ejercicio leve a moderado, no se observan cambios significativos (**Fig. 25.6**). Esta observación significa que las causas de aumento de la ventilación durante el ejercicio leve a moderado no son las que se creían -reducción de la P_{O_2} arterial, elevación de la P_{CO_2} arterial y disminución del pH del plasma-. Es probable que los quimiorreceptores o el centro de control de la respiración del bulbo raquídeo, o ambos, respondan a otras señales inducidas por el ejercicio.

Estas señales podrían ser diversos factores, entre ellos el estímulo simpático al cuerpo carotídeo y cambios en la concentración plasmática de K^+ . Incluso durante el ejercicio leve, el K^+ extracelular aumenta pues los potenciales de acción repetidos en las fibras musculares permiten la salida de K^+ fuera de la célula. Los quimiorreceptores carotídeos responden al aumento del K^+ aumentando la ventilación. Sin embargo, los cambios en la concentración de K^+ son lentos, y este mecanismo no explica el rápido aumento inicial en la ventilación al comenzar la actividad.

Es probable que el aumento inicial en la ventilación se deba al estímulo sensitivo de los mecanorreceptores del músculo combinado con vías descendentes paralelas desde la corteza motora ha-

FIGURA 25.6 Gases en sangre y ejercicio

Los gases y el pH en sangre arterial se mantienen estables durante el ejercicio submáximo.



? PREGUNTAS DE LA FIGURA

1. La ventilación aumenta con el ejercicio. ¿Por qué no aumenta también la P_{O_2} ?
2. ¿Qué ocurre con el transporte de O_2 hacia las células al aumentar el ejercicio?
3. ¿Por qué disminuye la P_{O_2} venosa?
4. Por qué no aumenta la P_{CO_2} arterial con el ejercicio?
5. ¿Por qué disminuye la P_{CO_2} arterial con el ejercicio máximo?

Basado en P. O. Astrand y cols. *Textbook of Work Physiology*, 4.ª ed. New York: McGraw Hill, 2003.

cia los centros de control de la respiración. Una vez comenzado el ejercicio, los estímulos sensitivos adecuan la ventilación a las necesidades metabólicas.

Evalúe sus conocimientos

1. Si la P_{O_2} venosa disminuye al aumentar la intensidad del ejercicio, ¿qué ocurre con la P_{O_2} en las células musculares al aumentar la intensidad del ejercicio?

25.3 Respuestas cardiovasculares al ejercicio

Al comenzar el ejercicio, la información mecanosensitiva de las extremidades en actividad, combinada con información de las vías descendentes de la corteza motora, activan el centro de control cardiovascular del bulbo raquídeo. El centro responde con estímulos simpáticos que aumentan el gasto cardíaco y producen vasoconstricción en muchas arteriolas periféricas.

El gasto cardíaco aumenta durante el ejercicio

Durante el ejercicio intenso, el gasto cardíaco aumenta en forma notable. En individuos no entrenados, aumenta hasta cuatro veces, de 5 L/min a 20 L/min. En atletas entrenados, puede aumentar de seis a ocho veces y llegar hasta 40 L/min. El transporte de oxígeno en el aparato cardiovascular es el factor primario que determina la tolerancia al ejercicio, y por ello los atletas entrenados son capaces de realizar un ejercicio más intenso.

El gasto cardíaco está determinado por la frecuencia cardíaca y el volumen de eyección:

$$\text{Gasto cardíaco} = \text{frecuencia cardíaca} \times \text{volumen de eyección}$$

Si consideramos los factores que influyen en la frecuencia cardíaca y en el volumen de eyección, tenemos que

$$\text{Gasto cardíaco} = (\text{frecuencia del nodo SA} + \text{estímulo del sistema nervioso autónomo}) \times (\text{retorno venoso} + \text{fuerza de contracción})$$

¿Cuál de estos factores tiene mayor efecto sobre el gasto cardíaco durante el ejercicio en un corazón sano? Durante el ejercicio, la contracción muscular y los movimientos inspiratorios profundos aumentan el retorno venoso (p. 466). Sería simple postular que las fibras del músculo cardíaco se estiran en respuesta al aumento del retorno venoso, aumentando así la contractilidad.

Sin embargo, el llenado excesivo de los ventrículos podría ser peligroso, pues el estiramiento podría dañar las fibras. Un factor que contrarresta el aumento del retorno venoso es el aumento de la frecuencia cardíaca. Si el intervalo entre las contracciones es más breve, el tiempo de llenado del corazón es menor y es menos probable que se dañe por un estiramiento excesivo.

El cambio inicial en la frecuencia cardíaca al comienzo del ejercicio se debe a una disminución de la actividad parasimpática en el nodo sinusal (SA) (p. 464]. Al disminuir la inhibición colinérgica, aumenta la frecuencia cardíaca desde su valor en reposo a unos 100 latidos por minuto, la frecuencia intrínseca del marcapasos del nodo sinusal. En ese momento aumenta el estímulo simpático del centro de control cardiovascular.

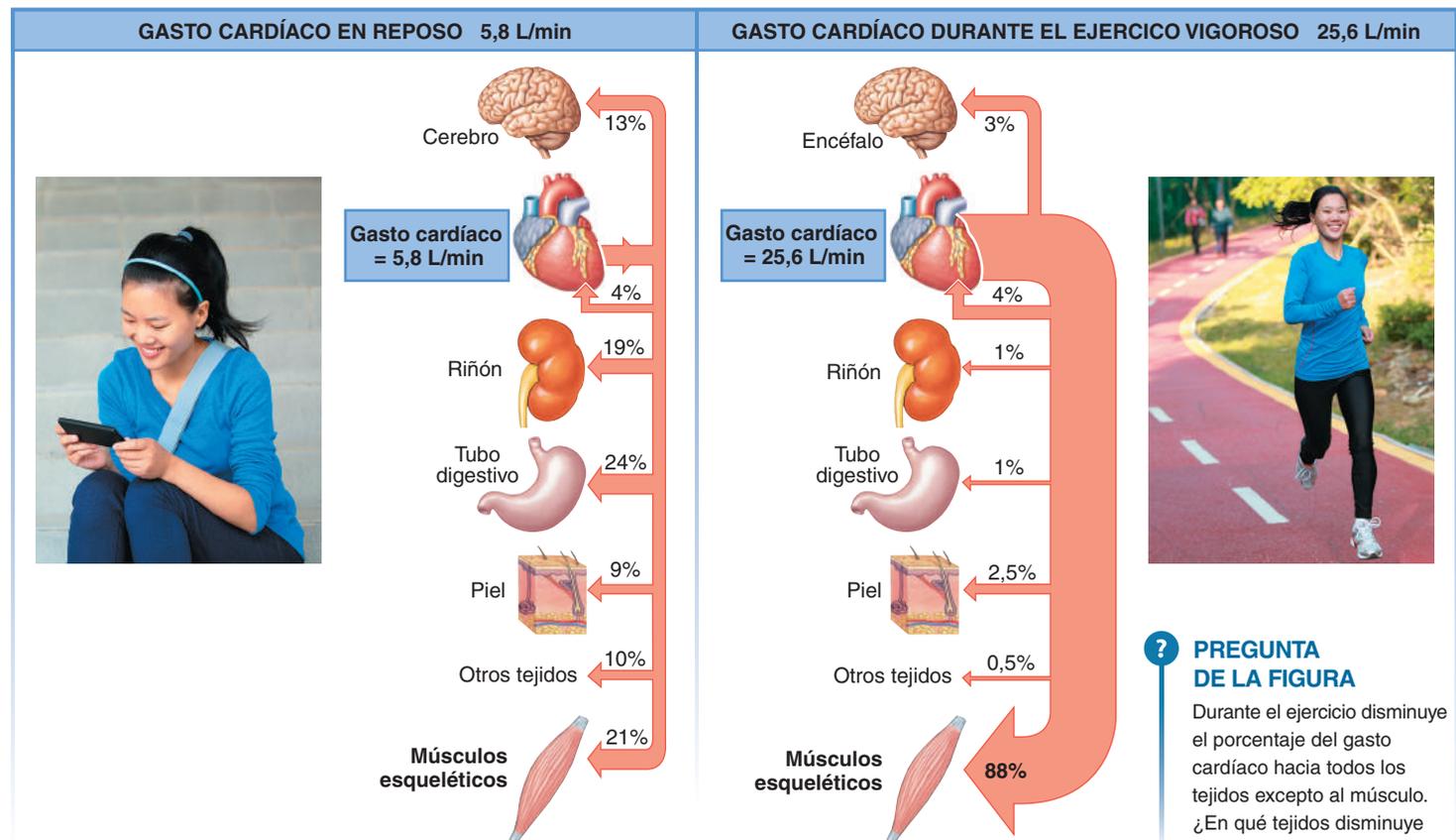
La estimulación simpática tiene dos efectos sobre el corazón. En primer lugar, aumenta la contractilidad, es decir que el corazón envía más sangre por cada latido (aumento del volumen de eyección). En segundo lugar, la inervación simpática aumenta la frecuencia cardíaca, y el corazón tiene menos tiempo de relajación, lo que lo protege del llenado excesivo. El aumento de la frecuencia cardíaca combinado con un mayor volumen de eyección, aumentan el gasto cardíaco durante el ejercicio.

El flujo sanguíneo al músculo aumenta durante el ejercicio

En reposo, el músculo esquelético recibe menos de un cuarto del gasto cardíaco, equivalente a 1,2 L/min. Durante el ejercicio, las reacciones locales y reflejas producen un aumento significativo del flujo sanguíneo periférico (Fig. 25.7). Durante el ejercicio intenso en atletas entrenados, el aumento del gasto cardíaco y la vasodilatación pueden aumentar el flujo sanguíneo en el músculo en actividad hasta más de 22 L/min. La distribución relativa del flujo sanguíneo a los tejidos también varía. Un 88% del gasto cardíaco se deriva al músculo en actividad, comparado con un 21% en reposo.

FIGURA 25.7 Distribución del flujo sanguíneo durante el ejercicio

El flujo sanguíneo se distribuye de manera diferente durante el reposo y durante el ejercicio. En los tejidos que no están en actividad se produce vasoconstricción y en el músculo en actividad se produce vasodilatación. Esto deriva el flujo sanguíneo hacia los músculos.



La redistribución del flujo sanguíneo durante el ejercicio se debe a una combinación de vasodilatación en las arteriolas del músculo esquelético y vasoconstricción en otros tejidos. Al comienzo del ejercicio, las señales simpáticas del centro de control cardiovascular producen vasoconstricción en los tejidos periféricos. Cuando el músculo está activo, se producen cambios en el microambiente del tejido muscular: disminuye la concentración de O_2 en el tejido, aumenta la temperatura, el CO_2 y el ácido en el líquido intersticial que rodea a las fibras musculares. Todos estos factores actúan como señales paracrinas que producen vasodilatación local que anula la señal simpática de vasoconstricción. El resultado neto es la derivación del flujo sanguíneo desde los tejidos inactivos hacia los músculos en actividad, en donde es necesario.

Durante el ejercicio la tensión arterial aumenta levemente

¿Qué ocurre con la tensión arterial durante el ejercicio? La tensión arterial periférica está determinada por la combinación del gasto cardíaco y la resistencia periférica (p. 484):

$$\text{Tensión arterial media} = \text{gasto cardíaco} \times \text{resistencia periférica}$$

El gasto cardíaco aumenta durante el ejercicio, lo que contribuye al aumento de la tensión arterial. Los cambios debidos a la resistencia periférica son más difíciles de predecir, pues algunas arteriolas se contraen mientras que otras se dilatan.

La vasodilatación en el músculo esquelético disminuye la resistencia periférica al flujo sanguíneo. Al mismo tiempo, la vasoconstricción inducida por el estímulo simpático en los tejidos en reposo compensa la vasodilatación en forma parcial. En consecuencia, la resistencia periférica total al flujo sanguíneo disminuye en forma notable al comenzar el ejercicio y llega a un valor mínimo al 75% del $VO_{2\text{máx}}$ (Fig 25.8a).

Si no hay otra compensación, esta disminución de la resistencia periférica produciría una fuerte disminución en la tensión arterial. Sin embargo, el aumento del gasto cardíaco compensa la disminución de la resistencia periférica. Si se monitoriza la tensión arterial durante el ejercicio, la tensión arterial media aumenta levemente con la intensidad del ejercicio (Fig. 25.8b). Sin embargo, este aumento sugiere que los reflejos barorreceptores normales que controlan la tensión arterial funcionan en forma diferente durante el ejercicio.

Evalúe sus conocimientos

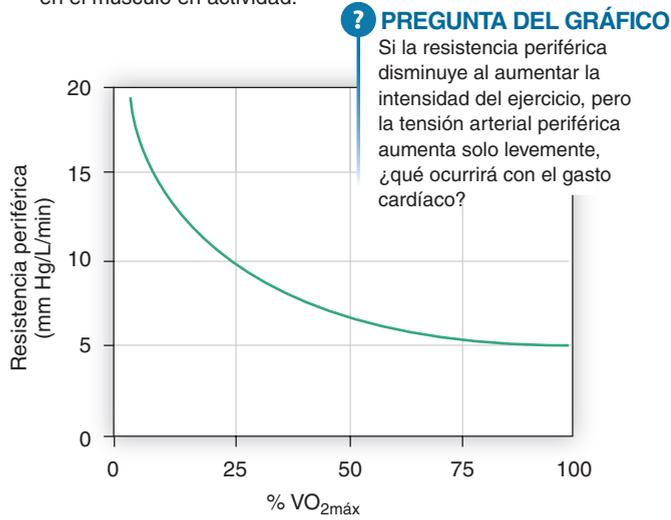
- En la **figura 25.8b**, ¿por qué la línea de la tensión arterial media se acerca más a la presión diastólica en lugar de estar centrada entre la presión sistólica y la diastólica? (*Pista:* ¿cuál es la ecuación para calcular la tensión arterial media?).

El reflejo barorreceptor se ajusta al ejercicio

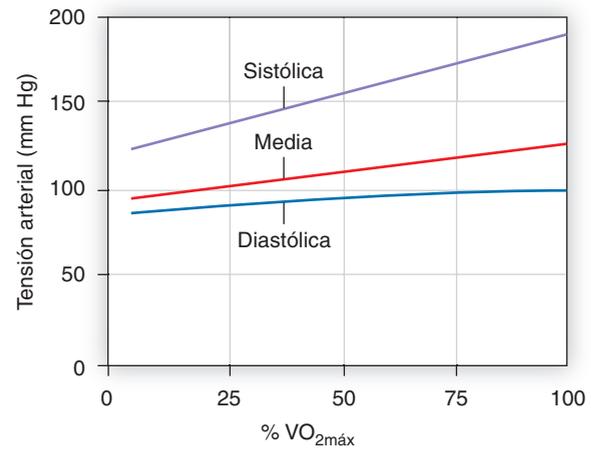
Normalmente, la homeostasis de la tensión arterial es regulada por barorreceptores periféricos en la carótida y en los cuerpos

FIGURA 25.8 Tensión arterial y ejercicio

(a) La resistencia periférica disminuye debido a la vasodilatación en el músculo en actividad.



(b) La tensión arterial media aumenta levemente a pesar de la disminución de la resistencia.



aórticos: un aumento de la tensión arterial inicia respuestas que retornan la tensión al valor normal. Pero durante el ejercicio, la tensión arterial aumenta sin activación de la compensación homeostática. ¿Qué ocurre con el reflejo barorreceptor normal durante el ejercicio?

Existen varias teorías. Según una de ellas, las señales de la corteza motora durante el ejercicio ajustan el umbral del barorreceptor arterial a una presión más alta. Por ello, la tensión arterial puede aumentar levemente sin que se desencadenen las respuestas de regulación homeostática.

Según otra teoría, las señales en las neuronas barorreceptoras aferentes se bloquean en la médula espinal por inhibición presináptica (p. 261) antes de la sinapsis de las neuronas aferentes con neuronas del sistema nervioso central. Esta inhibición central inactiva el reflejo barorreceptor durante el ejercicio.

Una tercera teoría se basa en la existencia de quimiorreceptores en el músculo sensibles a metabolitos producidos durante el ejercicio intenso (posiblemente H⁺). Al ser estimulados, estos quimiorreceptores indican al SNC que el flujo sanguíneo a los tejidos no es adecuado para eliminar los metabolitos del músculo o mantener al músculo en el metabolismo aerobio. El estímulo de los quimiorreceptores es reforzado por el estímulo sensitivo de los mecanorreceptores de las extremidades en actividad. La respuesta del SNC a estos estímulos es anular el reflejo barorreceptor y elevar la tensión arterial para mejorar la perfusión al músculo. Los mismos supuestos quimiorreceptores musculares podrían participar en las respuestas ventilatorias al ejercicio.

25.4 Respuestas anticipadas al ejercicio

Existe un elemento de *anteroalimentación* importante (p. 17) en las respuestas fisiológicas al ejercicio. Es fácil explicar los cambios fisiológicos que ocurren durante el ejercicio como reacciones a la alteración de la homeostasis. Sin embargo, muchos de esos cambios ocurren en ausencia de los estímulos normales, o antes de que estos se produzcan. Por ejemplo, como sabemos, la frecuencia respiratoria aumenta al comienzo del ejercicio (**Fig. 25.5**), aunque los experimentos han demostrado que la P_{O₂} y la P_{CO₂} arterial no se modifican (**Fig. 25.6**).

¿Cómo funciona la respuesta de prealimentación? Según un modelo, al comenzar el ejercicio, los propioceptores de los músculos y las articulaciones envían información a la corteza motora del cerebro. Las señales descendentes de la corteza motora llegan a los músculos en actividad y también a través de vías paralelas a los centros de control cardiovascular y respiratorio y al sistema límbico del encéfalo.

Las respuestas del sistema límbico y de los centros de control cardiovascular desencadenan una descarga simpática generalizada. Como consecuencia de esto, al inicio del ejercicio se observa un leve aumento de la tensión arterial. La respuesta simpática produce vasoconstricción generalizada, y aumento de la tensión arterial. Una vez comenzado el ejercicio, este aumento de la tensión arterial compensa la disminución resultante de la vasodilatación muscular.

PROBLEMA RELACIONADO

En la hipertermia maligna, los receptores de rianodina quedan abiertos más tiempo que lo normal y permiten la liberación de un exceso de Ca²⁺ del retículo sarcoplásmico. El aumento del Ca²⁺ en el citosol produce una contracción muscular continua, que aumenta la demanda celular de ATP. El consumo de oxígeno y la producción de CO₂ aumentan. Si las demandas de ATP del músculo exceden la disponibilidad de O₂, el metabolismo se vuelve anaerobio. La producción de lactato y otros ácidos crean un estado de acidosis metabólica. Por último, el Ca²⁺ citoplásmico elevado activa enzimas que producen la degradación del músculo (rabdomiólisis). El Dr. Jones pidió estudios de sangre y de orina para orientar el diagnóstico.

P2: ¿Qué aspecto de la fisiopatología de la hipertermia maligna explica la fiebre alta de Zach?

P3: Los estudios de laboratorio incluyen la concentración plasmática de K⁺ y los niveles en orina de mioglobina, una proteína muscular similar a la hemoglobina. ¿Cuáles serían los resultados de estos estudios en un paciente que sufre de hipertermia maligna (comparado con un paciente normal)?

Al continuar el ejercicio, las compensaciones reactivas se superponen con los cambios de prealimentación. Por ejemplo, cuando el ejercicio llega a un 50% de la capacidad aerobia, los quimiorreceptores del músculo detectan la acumulación de H^+ , lactato y otros metabolitos, y envían esta información a los centros de control del encéfalo. Estos centros de control mantienen los cambios en la ventilación y la circulación que se iniciaron por prealimentación. Así, es probable que en la integración de los sistemas durante el ejercicio participen vías reflejas comunes y vías reflejas centrales únicas.

25.5 Regulación de la temperatura durante el ejercicio

Al continuar el ejercicio, el calor liberado por el metabolismo crea un desafío adicional a la homeostasis. La mayor parte de la energía liberada durante el metabolismo no se convierte en ATP sino que se libera como calor. (La eficacia de la conversión de energía a partir de sustratos orgánicos a ATP es de solo un 20-25%). Al continuar el ejercicio, la producción de calor excede a la pérdida de calor, y la temperatura corporal aumenta. Durante las actividades de resistencia, la temperatura corporal puede llegar a 40-42 °C, lo que normalmente consideraríamos fiebre.

Este aumento de la temperatura corporal durante el ejercicio desencadena dos mecanismos de termorregulación: la transpiración y el aumento del flujo sanguíneo cutáneo (p. 719). Ambos mecanismos ayudan a regular la temperatura corporal, pero también pueden alterar la homeostasis. La transpiración disminuye la temperatura corporal al enfriar el cuerpo por evaporación, pero la pérdida de líquido del compartimento extracelular puede producir deshidratación y una disminución importante en el volumen sanguíneo. La transpiración es un líquido hipotónico, y la pérdida de agua adicional aumenta la osmolaridad del cuerpo. La combinación de la disminución del volumen del líquido extracelular y el aumento de la osmolaridad durante el ejercicio prolongado ponen en acción las vías homeostáticas complejas para superar la deshidratación, como la sed y la retención de agua en los riñones (Fig. 20.13, p. 638).

El otro mecanismo termorregulador –aumento del flujo sanguíneo a la piel– produce pérdida de calor corporal hacia el medioambiente por convección (p. 720). Sin embargo, el aumento de la repuesta simpática durante el ejercicio produce vasoconstricción cutánea, que se opone a la respuesta termorreguladora. El control primario de la vasodilatación en zonas pilosas de la piel, como el tronco y las extremidades, durante el ejercicio, proviene de un sistema vasodilatador simpático. La activación de estas neuronas simpáticas secretoras de acetilcolina con el aumento de la temperatura dilata algunos vasos sanguíneos cutáneos sin alterar la vasoconstricción simpática en otros tejidos del cuerpo.

Si bien la vasodilatación cutánea es esencial para la termorregulación, puede afectar la homeostasis al disminuir la resistencia periférica y derivar el flujo sanguíneo de los músculos. Ante estas demandas contradictorias, el organismo da prioridad a la termorregulación. Sin embargo, si la presión venosa central disminuye por debajo de un valor mínimo crítico, el cuerpo abandona la termorregulación para mantener el flujo sanguíneo al encéfalo.

El grado en que el cuerpo puede ajustarse a ambas demandas depende del tipo de ejercicio y de su intensidad y duración. El ejercicio extenuante en ambiente cálido y húmedo puede afectar los mecanismos termorreguladores normales y causar un golpe

de calor, que puede ser fatal. A menos que se tomen medidas urgentes para enfriar el cuerpo, la temperatura corporal puede subir hasta 43 °C (109 °F).

El cuerpo se puede adaptar al ejercicio repetido en ambientes cálidos mediante una **aclimatación**. En este proceso, los mecanismos fisiológicos varían para adecuarse al cambio en las condiciones ambientales. A medida que el cuerpo se ajusta al ejercicio en el calor, la transpiración comienza antes y su volumen aumenta al doble o al triple, para aumentar el enfriamiento por evaporación. Con la aclimatación, la transpiración se vuelve más diluida; el aumento de aldosterona produce reabsorción de sal en las glándulas sudoríparas. La pérdida de sal en una persona no aclimatada que realiza ejercicio en el calor puede llegar a 30 g de NaCl por día, pero luego de un mes de aclimatación este valor disminuye a 3 g.

Evalúe sus conocimientos

- Los nervios vasodilatadores de la piel activos se clasifican como neuronas simpáticas, a pesar de que secretan ACh. ¿En qué se basa esta identificación como neuronas simpáticas?

25.6 Ejercicio y salud

La actividad física tiene muchos efectos positivos sobre el cuerpo humano. El estilo de vida del ser humano ha variado notablemente desde la época en que éramos cazadores-recolectores, pero nuestro cuerpo funciona mejor con un cierto nivel de actividad física. Algunas afecciones frecuentes –como hipertensión, accidente cerebrovascular y diabetes mellitus– mejoran con la actividad física. Sin embargo, para muchas personas es difícil adquirir el hábito de realizar ejercicios en forma regular como estilo de vida. En esta sección, veremos los efectos del ejercicio sobre la salud.

PROBLEMA RELACIONADO

La temperatura de Zach continuó subiendo y su situación empeoró rápidamente a pesar de los esfuerzos por enfriar su cuerpo con hielo. Los estudios de sangre indicaron hiperpotasemia. Aunque los resultados de los estudios de orina aún no estaban listos, la muestra de orina tenía un color oscuro, lo que indicaba la presencia de mioglobina (*mioglobinuria*). Esta evidencia fue suficiente para que el Dr. Jones sospechara que Zach tenía hipertermia maligna. Rápidamente le indicó dantroleno, un fármaco que inhibe la liberación de Ca^{2+} del retículo sarcoplásmico del músculo esquelético. Luego de unos minutos de recibirlo, los músculos de Zach comenzaron a relajarse y su temperatura comenzó a descender. Fue admitido en la unidad de cuidados intensivos para continuar el tratamiento a fin de corregir su hiperpotasemia y mioglobinuria, que podrían producir insuficiencia renal si no se tratan.

P4: ¿Por qué es peligrosa la hiperpotasemia?

P5: Una vez que se detiene la fuga de Ca^{2+} del retículo sarcoplásmico, ¿cómo eliminan el Ca^{2+} del citoplasma las células del músculo esquelético?

El ejercicio disminuye el riesgo de enfermedad cardiovascular

En la década de 1950, los científicos demostraron que entre los hombres que realizaban actividad física la frecuencia de ataque cardíaco era menor que en hombres que tenían una vida sedentaria. A partir de estos estudios comenzaron muchas investigaciones acerca de la relación exacta entre las enfermedades cardiovasculares y el ejercicio. Los científicos han demostrado que el ejercicio tiene efectos positivos en hombres y mujeres. Esos beneficios incluyen disminución de la tensión arterial, disminución de los niveles de triglicéridos en el plasma y elevación de los niveles de colesterol HDL en el plasma. La hipertensión es un importante factor de riesgo de accidente cerebrovascular, y los niveles elevados de triglicéridos y bajos de colesterol HDL se asocian con el desarrollo de aterosclerosis y mayor riesgo de ataque cardíaco.

El ejercicio reduce el riesgo de muerte o enfermedad por causas cardiovasculares, aunque aún no se conoce del todo el mecanismo exacto de este beneficio. Incluso el ejercicio leve como la caminata tiene importantes beneficios para la salud que pueden reducir el riesgo de enfermedad cardiovascular o diabetes y las complicaciones de la obesidad en un 23% de los adultos norteamericanos que tienen un estilo de vida sedentario.

El ejercicio puede mejorar la diabetes mellitus tipo 2

El ejercicio regular es eficaz para prevenir y aliviar la diabetes mellitus tipo 2 y sus complicaciones, como la retinopatía microvascular (p. 479), la neuropatía diabética (p. 366), y la enfermedad

cardiovascular (p. 501)]. Con el ejercicio regular, las fibras del músculo esquelético hacen regulación positiva del número de transportadores de glucosa GLUT4 y del número de receptores de insulina en su membrana. El aumento de transportadores GLUT4 independientes de la insulina disminuye la dependencia del músculo de insulina para la captación de glucosa. La captación de glucosa en el músculo en actividad también ayuda a corregir la hiperglucemia en la diabetes.

Con el ejercicio, la regulación positiva de los receptores de insulina hace que las fibras musculares se vuelvan más sensibles a la insulina. Se necesita menor cantidad de insulina para lograr la misma respuesta que antes requería mayor cantidad. Dado que las células responden a niveles más bajos de insulina, el páncreas endocrino secreta menos insulina. Esto disminuye la sobrecarga del páncreas, con una menor incidencia de diabetes mellitus tipo 2.

La **figura 25.9** muestra los efectos de siete días de ejercicio sobre la utilización de la glucosa y la secreción de insulina en hombres con diabetes tipo 2 leve. A los individuos que participaron en el experimento se les realizó una prueba de tolerancia a la glucosa, en la que debían ingerir 100 g de glucosa luego de un ayuno de toda la noche. Se evaluaron los niveles de glucosa en plasma antes de ingerir la glucosa y luego durante 120 minutos. Se midió en forma simultánea el nivel de insulina en el plasma.

El gráfico de la **figura 25.9a** muestra las pruebas de tolerancia a la glucosa en los sujetos control (línea azul) y en los hombres diabéticos antes y después del ejercicio (líneas roja y verde, respectivamente). La **figura 25.9b** muestra la secreción concurrente de insulina en los tres grupos. Luego de solo siete días de ejercicio, la prueba de tolerancia a la glucosa y la secreción de insulina en los sujetos diabéticos se modificó, acercándose a los valores

CAPÍTULO 25

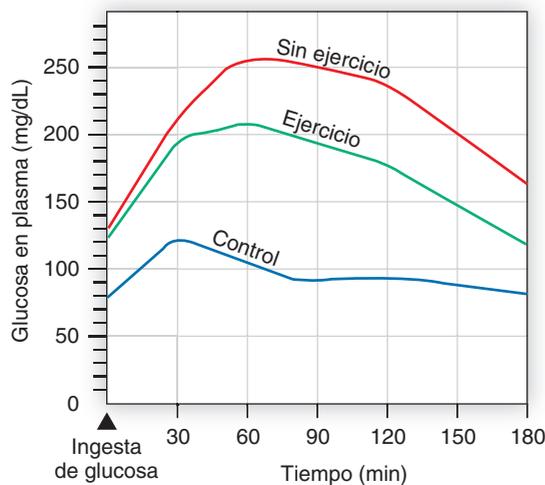
FIGURA 25.9 El ejercicio mejora la tolerancia a la glucosa y la secreción de insulina

Los experimentos incluyeron hombres normales (línea azul), hombres con diabetes tipo 2 que no realizaron actividad física (línea roja) y los mismos hombres diabéticos luego de siete días de ejercicios (línea verde).

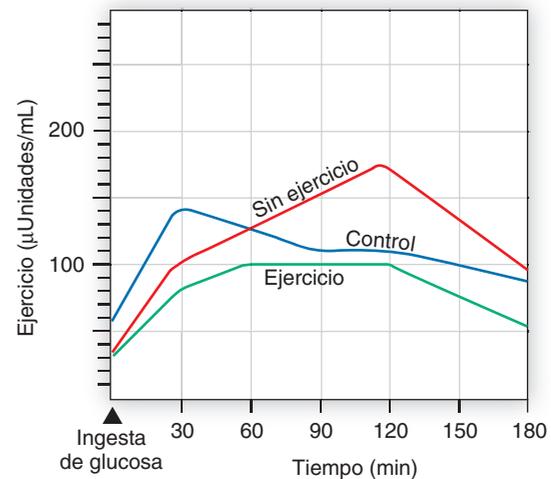
CLAVE

- Controles normales
- Diabetes tipo 2, sin ejercicio
- Diabetes tipo 2, después de 7 días de ejercicio

(a) Glucosa en plasma durante la prueba de tolerancia a la glucosa



(b) Insulina en plasma durante la prueba de tolerancia a la glucosa



Datos de B. R. Seals y cols. *J App Physiol* 56(6): 1521-1525, 1984; y M. A. Rogers y cols. *Diabetes Care* 11: 613-618, 1988.

de los sujetos control normales. Estos resultados demuestran los efectos benéficos del ejercicio sobre el transporte de glucosa y el metabolismo, y apoyan la recomendación de realizar un programa regular de ejercicios en pacientes con diabetes tipo 2.

El ejercicio puede influir en el estrés y en el sistema inmunitario

La interacción entre el ejercicio y el sistema inmunitario es un tema de salud al que se le está prestando gran atención, y la “inmunología del ejercicio” se ha convertido en una nueva disciplina científica. Distintos estudios epidemiológicos en grandes poblaciones sugieren que el ejercicio se asocia con una menor incidencia de enfermedades y una mayor longevidad. Además, muchas personas creen que el ejercicio mejora la inmunidad, previene el cáncer y ayuda a pacientes infectados por el HIV a combatir el sida.

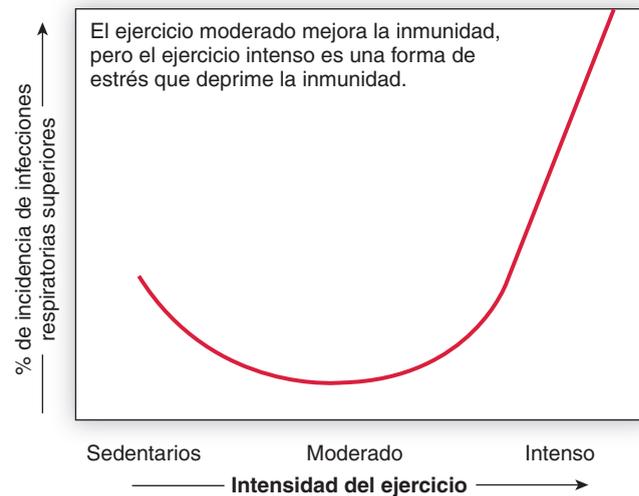
Sin embargo, pocas investigaciones controladas brindan evidencias que apoyen estos puntos de vista. Por otro lado, otras evidencias sugieren que el ejercicio intenso es una forma de estrés que suprime la respuesta inmunitaria. La supresión inmunitaria puede deberse a la liberación de corticosteroides, o a la liberación de interferón- γ durante el ejercicio intenso.

Los investigadores han representado la relación entre el ejercicio y la inmunidad como una curva en forma de J (Fig. 25.10). Las personas que realizan ejercicio moderado tienen un sistema inmunitario más eficaz que las personas sedentarias. Pero aquellos que realizan ejercicio intenso pueden tener una disminución de la función inmunitaria debido al estrés que representa el ejercicio.

Otra área de la fisiología del ejercicio con resultados contradictorios es el efecto del ejercicio sobre el estrés, la depresión y otros parámetros psicológicos. La investigación ha demostrado una relación inversa entre el ejercicio y la depresión: las personas que realizan ejercicio en forma regular son menos propensas a sufrir depresión que las personas que no lo realizan. Existe esta asociación, pero es difícil asociar los dos parámetros como causa y efecto. ¿El ejercicio hace que las personas estén menos deprimidas? ¿O es que los individuos con depresión realizan menos actividad física porque están deprimidos? ¿Qué factores fisiológicos participan?

FIGURA 25.10 Función inmunitaria y ejercicio

Los individuos que realizan ejercicios con moderación tienen menos infecciones respiratorias superiores que individuos sedentarios o individuos que realizan ejercicios intensos.



En muchos estudios publicados se demuestra que el ejercicio regular es eficaz para reducir la depresión. Pero un análisis cuidadoso de los diseños de estos experimentos sugiere que las conclusiones de algunos estudios pueden ser exageradas. Los sujetos de muchos de estos experimentos fueron tratados al mismo tiempo con fármacos y psicoterapia, por lo que es difícil atribuir su mejoría solo al ejercicio. Además, la participación en estudios sobre el ejercicio les da a los sujetos la oportunidad de interacción social, otro factor que podría ayudar a reducir el estrés y la depresión.

La afirmación de que el ejercicio reduce la depresión proviene de estudios que demuestran un aumento del nivel de serotonina en el cerebro con el ejercicio. Los fármacos que aumentan la actividad de la serotonina, como los inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina (p. 297), se utilizan actualmente para tratar la depresión. Sería deseable encontrar una forma de lograr los mismos resultados sin utilizar fármacos. En la actualidad se están realizando estudios clínicos acerca de los efectos del ejercicio sobre la depresión.

PROBLEMA RELACIONADO CONCLUSIÓN

Hipertermia maligna

Zach fue afortunado porque el médico que lo atendió estaba familiarizado con los signos de hipertermia maligna: este diagnóstico por lo general no se considera, a menos que el paciente esté en una cirugía y bajo anestesia. Si no se trata, la hipertermia maligna puede ser fatal en horas. Zach pasó dos días en el hospital y se recuperó por completo gracias a la administración temprana de dantroleno y el tratamiento de los síntomas de rhabdomiólisis.

Zach y su familia fueron derivados a un especialista, que recomendó realizar una *prueba de contractura con cafeína-halotano* para confirmar el diagnóstico de hipertermia maligna. En esta prueba se toma una muestra del músculo esquelético mediante cirugía y se coloca en una solución que contiene cafeína y halotano (un anestésico común). Si el músculo se contrae mientras está

sumergido en la solución, el individuo se considera susceptible a hipertermia maligna. Se les realizó la prueba a Zach y a su padre, y en ambos el resultado fue positivo. Los estudios genéticos revelaron que Zach y su padre tienen el gen RyR defectuoso. La hipertermia maligna es una enfermedad hereditaria autosómica dominante; eso significa que una persona que hereda una copia del gen mutado tendrá la enfermedad.

En este problema relacionado se presentó la hipertermia maligna, una enfermedad genética de difícil diagnóstico. Para mayor información acerca de hipertermia maligna, véase la bibliografía de la Asociación de Hipertermia Maligna de los Estados Unidos en www.mhaus.org. A continuación, compare sus respuestas con la información del siguiente cuadro y evalúe su comprensión de este tema.

Continúa en la página siguiente

PROBLEMA RELACIONADO CONCLUSIÓN

Continuación

Pregunta	Datos	Integración y análisis
P1: ¿Dónde se encuentra el RyR en el músculo esquelético y cuál es su función en la contracción muscular?	El RyR es un canal de Ca^{2+} ubicado sobre el retículo sarcoplásmico (p. 386).	La apertura de los canales de RyR permite la salida de Ca^{2+} hacia el citoplasma y desencadena la contracción muscular.
P2: ¿Qué aspecto de la fisiopatología de la hipertermia maligna explica la fiebre alta de Zach?	La conversión de energía química en enlaces de fosfato de alta energía del ATP tiene una eficacia del 25%, y el resto de la energía se pierde como calor.	La contracción muscular requiere ATP. El ATP se produce a través del metabolismo aerobio, y el calor es un subproducto del metabolismo.
P3: ¿Cómo serán los resultados de la $[\text{K}^+]$ en plasma y de la mioglobina en orina en un paciente con hipertermia maligna?	Las células musculares tienen altas concentraciones de K^+ y de mioglobina.	La degradación muscular libera K^+ y mioglobina hacia el líquido extracelular, y por lo tanto la $[\text{K}^+]$ en el plasma será elevada y la mioglobina filtrada se excretará en la orina.
P4: ¿Por qué es peligrosa la hiperpotasemia?	La relación entre la $[\text{K}^+]$ en el líquido extracelular y la $[\text{K}^+]$ en el líquido intracelular es el principal determinante del potencial de membrana.	La hiperpotasemia puede producir arritmias cardíacas peligrosas pues una $[\text{K}^+]$ elevada despolariza las células.
P5: ¿Cómo eliminan el Ca^{2+} del citoplasma las células del músculo esquelético?	El calcio está más concentrado en el líquido extracelular y en el retículo sarcoplásmico que en el citoplasma.	Una bomba de Ca^{2+} -ATPasa transporta el Ca^{2+} hacia el retículo sarcoplásmico.

Este problema fue desarrollado por Douglas Shannon cuando era estudiante en la Universidad de Texas y se preparaba para ingresar en el programa de Asistencia Médica de la Facultad de Medicina de la University of Texas.

787 — 789 — 793 — 794 — 796

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo estudiamos el ejercicio y los desafíos fisiológicos que presenta. La *integración* y la *coordinación* entre los *sistemas de control fisiológico del cuerpo* mantienen al medio interno relativamente constante, a pesar de los desafíos a la homeostasis que presenta el ejercicio.

25.1 Metabolismo y ejercicio

- El músculo en actividad requiere un suministro constante de ATP proveniente del metabolismo o de la conversión de la fosfocreatina (p. 787; Fig. 25.1).
- Los carbohidratos y las grasas son el principal sustrato de energía. La glucosa se puede metabolizar mediante las vías oxidativa y anaerobia, pero el metabolismo de los ácidos grasos requiere oxígeno (p. 788; Fig. 25.1).
- El **metabolismo glucolítico** anaerobio convierte a la glucosa en lactato y en H^+ . Es 2,5 veces más rápido que las vías aerobias, pero no es tan eficaz en la producción de ATP (p. 788; Fig. 25.2).
- El glucagón, el cortisol, las catecolaminas y la hormona del crecimiento influyen en el metabolismo de la glucosa y los ácidos grasos durante el ejercicio. Estas hormonas favorecen la conversión de glucógeno en glucosa (p. 788).
- Las concentraciones de glucosa en el plasma aumentan con el ejercicio, pero la secreción de insulina disminuye. Esta respuesta reduce la captación de glucosa en la mayoría de las células, y la glucosa queda disponible para ser utilizada por el músculo en actividad (p. 789).
- El **consumo de oxígeno** (VO_2) indica la intensidad del ejercicio. La velocidad máxima de consumo de oxígeno de una persona ($\text{VO}_{2\text{máx}}$) es indicador de su capacidad de realizar ejercicios de resistencia (p. 789).

- El consumo de oxígeno aumenta rápidamente al comenzar el ejercicio. El **consumo de oxígeno excesivo posejercicio** se debe a que continúa el metabolismo, al aumento de la temperatura corporal y a las catecolaminas circulantes (p. 790; Fig. 25.4).
- Con el entrenamiento de resistencia aumentan el número y el tamaño de las mitocondrias en el músculo (p. 790).
- Durante el ejercicio máximo, la capacidad del aparato cardiovascular de transportar oxígeno y nutrientes es el factor limitante primario (p. 790).

25.2 Respuestas ventilatorias al ejercicio

- La hiperventilación durante el ejercicio se produce por señales de prealimentación desde la corteza motora y retroalimentación sensitiva desde los receptores sensitivos periféricos (p. 790; Fig. 25.5).
- La P_{O_2} , la P_{CO_2} y el pH arteriales no se modifican en forma significativa durante el ejercicio leve a moderado (p. 790; Fig. 25.6).

25.3 Respuestas cardiovasculares al ejercicio

- El gasto cardíaco aumenta con el ejercicio debido al aumento del retorno venoso y por la estimulación simpática que incrementa la frecuencia y la contractilidad cardíacas (p. 791; Fig. 25.7).
- El flujo sanguíneo en el músculo en actividad aumenta en forma notable cuando se dilatan las arteriolas del músculo esquelético. Las arteriolas de otros tejidos se contraen (p. 791; Fig. 25.7).
- La disminución de O_2 y glucosa en los tejidos o el aumento de la temperatura, el CO_2 y el ácido en el músculo actúan como señales paracrinas y producen vasodilatación local (p. 792).

15. La tensión arterial media aumenta levemente al aumentar la intensidad del ejercicio. Los barorreceptores que controlan la tensión arterial modifican su umbral durante el ejercicio (p. 792; **Fig. 25.8**).

25.4 Respuestas anticipadas al ejercicio

16. Cuando comienza el ejercicio, las respuestas de prealimentación impiden una alteración significativa de la homeostasis (p. 793).

25.5 Regulación de la temperatura durante el ejercicio

17. El calor liberado durante el ejercicio se disipa mediante la transpiración y el aumento del flujo sanguíneo cutáneo (p. 794).

25.6 Ejercicio y salud

18. La actividad física p. (p. 794).
19. Diversos estudios sugieren que la liberación de serotonina durante el ejercicio puede ayudar a aliviar la depresión (p. 796).

PREGUNTAS DE REVISIÓN

Además de trabajar con estas preguntas y controlar sus respuestas en la p. A-33, repase los objetivos de aprendizaje al comienzo de este capítulo.

Nivel uno Revisión de datos y términos

- Nombre los dos compuestos del músculo que almacenan energía en forma de enlaces de fosfato de alta energía.
- La producción de energía más eficaz es a través de la vía *aerobia/anaerobia*. Utilizando estas vías, se puede metabolizar *glucosa/ácidos grasos/ambos/ninguno* para obtener ATP.
- ¿Cuáles son las diferencias entre el metabolismo aerobio y el anaerobio?
- Enumere tres fuentes de glucosa que pueden metabolizarse a ATP, en forma directa o indirecta.
- Enumere cuatro hormonas que promueven la conversión de triglicéridos a ácidos grasos. ¿Qué efectos tienen estas hormonas sobre los niveles de glucosa en el plasma?
- ¿Qué significa deuda de oxígeno, y cómo se relaciona esta con el consumo de oxígeno posejercicio?
- ¿Qué sistema es el factor limitante del ejercicio máximo?
- En los eventos de resistencia, la temperatura corporal puede llegar a los 40-42 °C. ¿Cuál es la temperatura corporal normal? ¿Cuáles son los dos mecanismos termorreguladores que se desencadenan por este cambio de temperatura durante el ejercicio?

Nivel dos Revisión de conceptos

- Mapa conceptual: esquematice los cambios metabólicos, cardiovasculares y respiratorios que ocurren durante el ejercicio. Incluya las señales hacia y desde el sistema nervioso, y muestre qué áreas específicas señalizan y coordinan la respuesta al ejercicio.
- ¿Qué produce la disminución de la secreción de insulina durante el ejercicio y por qué esta secreción es adaptativa?
- Indique dos ventajas y dos desventajas de la glucólisis anaerobia.
- Compare los términos de cada ítem, en relación con el ejercicio:
 - ATP, ADP, PCr
 - mioglobina, hemoglobina

13. Indique a qué área del encéfalo corresponde el control de cada respuesta del listado. Puede haber una, más de una, o ninguna para cada área. Algunas respuestas pueden asociarse con más de un área del encéfalo.

a. protuberancia	1. cambios en el gasto cardíaco
b. bulbo raquídeo	2. vasoconstricción
c. mesencéfalo	3. hiperventilación en el ejercicio
d. corteza motora	4. aumento del volumen minuto
e. hipotálamo	5. aumento de la frecuencia cardíaca
f. cerebelo	6. coordinación del movimiento del músculo esquelético
g. no participa el encéfalo (control local)	

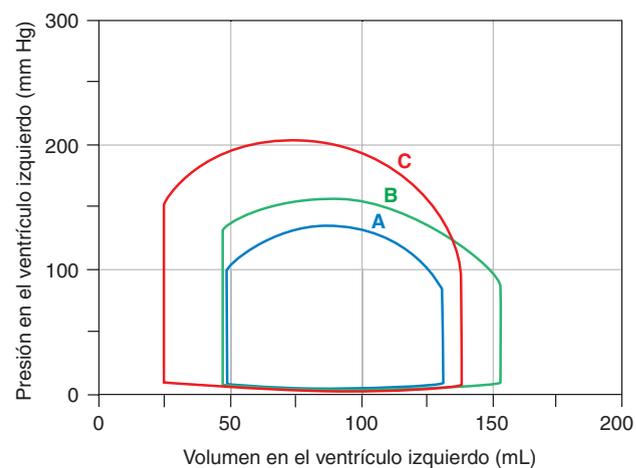
- Para cada uno de los siguientes parámetros, especifique si aumentan, disminuyen, o no se modifican cuando una persona se entrena y mejora su estado físico para realizar actividades atléticas:
 - frecuencia cardíaca durante el ejercicio
 - frecuencia cardíaca en reposo
 - gasto cardíaco durante el ejercicio
 - gasto cardíaco en reposo
 - frecuencia respiratoria durante el ejercicio
 - flujo sanguíneo hacia los músculos durante el ejercicio
 - tensión arterial durante el ejercicio
 - resistencia periférica total durante el ejercicio
- ¿Por qué el aumento del retorno venoso durante el ejercicio no produce un estiramiento del músculo cardíaco?
- Diagrama las tres teorías que explican por qué el reflejo normal de los barorreceptores está ausente durante el ejercicio.
- Enumere y explique brevemente los beneficios de un estilo de vida que incluya ejercicios en forma regular.
- Explique cómo el ejercicio disminuye la glucosa en sangre en la diabetes mellitus tipo 2.

Nivel tres Resolución de problemas

19. Usted ha decidido fabricar una nueva bebida deportiva que ayude a los deportistas, desde jugadores de fútbol hasta gimnastas. Enumere por lo menos cuatro ingredientes diferentes que incluiría en su bebida, e indique por qué son importantes para los deportistas.

Nivel cuatro Problemas cuantitativos

20. Usted es un deportista bien entrenado. En reposo su frecuencia cardíaca es de 60 latidos/minuto y su volumen de eyección es de 70 mL/latido. ¿Cuál es su gasto cardíaco? En un momento del ejercicio su frecuencia cardíaca aumenta a 120 latidos/min. ¿Su gasto cardíaco aumentará en forma proporcional? Explique.
21. El siguiente gráfico muestra las curvas de volumen-presión del ventrículo izquierdo en un individuo. La curva A corresponde a la persona sentada en reposo. La curva B muestra la respuesta cardíaca de la persona al ejercicio leve en una bicicleta fija. La curva C muestra la respuesta cardíaca durante el ciclismo de máxima intensidad.
- Calcule el volumen de eyección de cada curva.
 - Dados los siguientes gastos cardíacos, calcule la frecuencia cardíaca para cada situación.
Gasto cardíaco A = 6 L/min, Gasto cardíaco B = 10,5 L/min, Gasto cardíaco C = 19 L/min



Datos de G. D. Plotnick y cols. *Am J Physiol* 251: H1101–H1105, 1986.

- ¿Qué curva de ejercicios muestra un aumento del volumen de eyección debido a un aumento de la contractilidad? ¿Qué curva de ejercicios muestra un aumento del volumen de eyección debido a un aumento del retorno venoso?
- Desde el punto de vista mecánico, ¿por qué el volumen de fin de diástole de la curva C es menor que el valor en reposo?