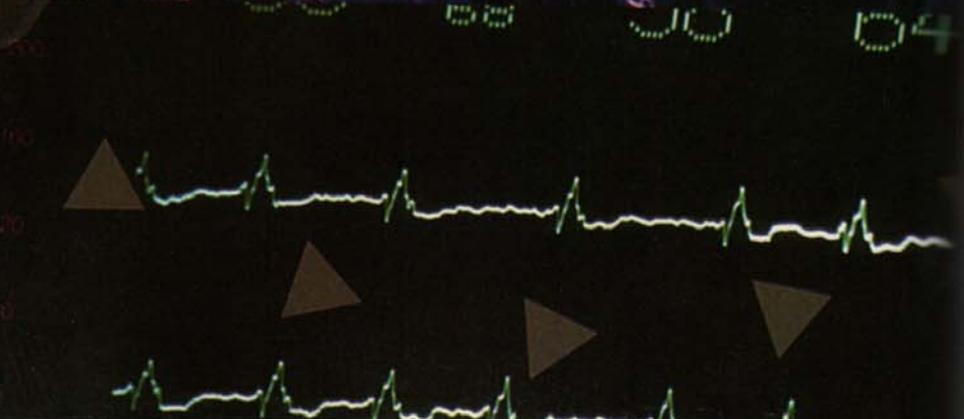
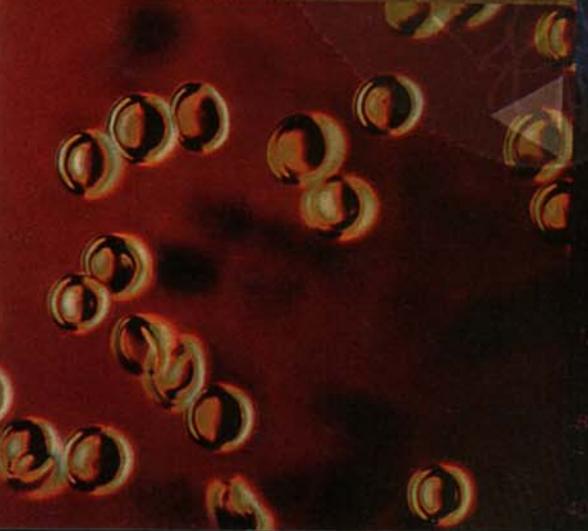
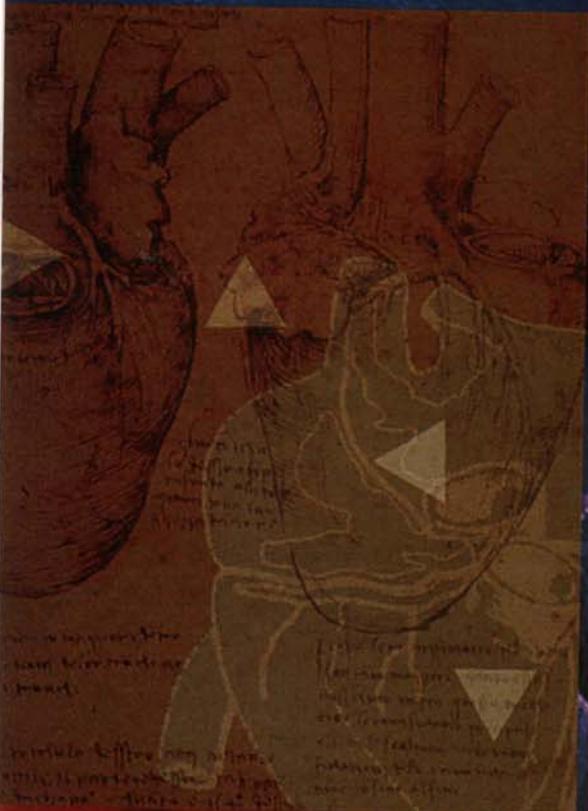


C A P Í T U L O

7

Control cardiovascular durante el ejercicio



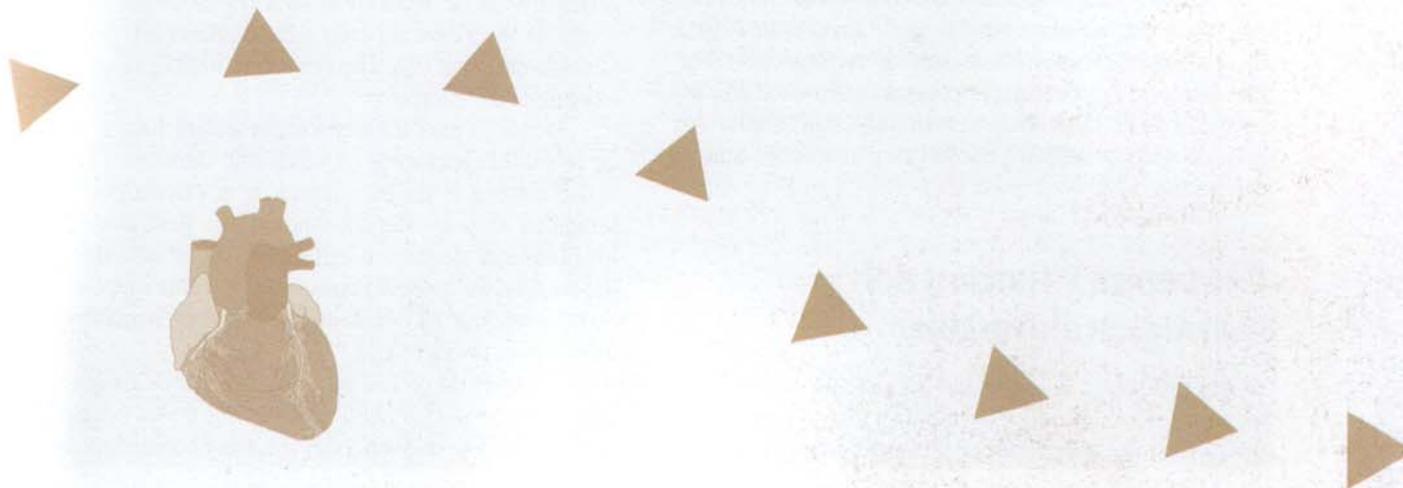
Visión general del capítulo

Nuestro sistema cardiovascular, que incluye el corazón, los vasos sanguíneos y la sangre, tiene muchas funciones, incluidas las de nutrición, protección e incluso la de transporte de desechos. El sistema debe llegar a todas las células del cuerpo, y debe poder responder inmediatamente a cualquier cambio en el ambiente interno para mantener todos los sistemas del cuerpo funcionando con la máxima eficacia. Incluso cuando estamos en reposo, nuestro sistema cardiovascular trabaja constantemente para satisfacer las demandas de los tejidos de nuestro cuerpo. Pero durante el ejercicio se impone un número más elevado de demandas mucho más urgentes sobre este sistema.

En este capítulo, exploraremos la asombrosa función que juega el sistema cardiovascular en la actividad física. En la primera parte del capítulo analizaremos la estructura y la función del sistema cardiovascular, poniendo de relieve sus complejidades. En la segunda parte, nos centraremos en el modo en que el sistema cardiovascular responde a las exigencias aumentadas del ejercicio. Aprenderemos cómo cada componente de este sistema se adapta a los cambios en el ambiente interno del cuerpo que resultan de los ritmos aumentados de la actividad física y cómo el sistema controla nuestra capacidad para rendir.

Esquema del capítulo

- Estructura y función del sistema cardiovascular, 208
 - Corazón, 208
 - EKG, 213
 - Sistema vascular, 216
 - Sangre, 220
- Respuesta cardiovascular al ejercicio, 222
 - Frecuencia cardíaca, 223
 - Volumen sistólico, 225
 - Gasto cardíaco, 228
 - Cambios generales en la función cardíaca, 229
 - Flujo de sangre, 230
 - Tensión arterial, 234
 - Sangre, 235
- Integración de la respuesta al ejercicio, 237
- Conclusión, 239
- Expresiones clave, 239
- Cuestiones a estudiar, 240
- Bibliografía, 240
- Lecturas seleccionadas, 242





El día 5 de enero de 1988, el deporte mundial perdió a uno de sus deportistas más grandes. "Pistol Pete" Maravich, vieja estrella de la National Basketball Association, sufrió un colapso y falleció de un paro cardíaco a los 40 años de edad durante un partido de baloncesto retransmitido por televisión. Su muerte causó una conmoción, y la causa de la misma sorprendió a los expertos médicos. El corazón de Maravich estaba anormalmente agrandado debido principalmente al hecho de que había nacido con una sola arteria coronaria en el lado derecho del corazón –le faltaban las dos arterias coronarias que abastecen el lado izquierdo del corazón–. La comunidad médica quedó asombrada de que esta sola arteria coronaria del lado derecho hubiese estado abasteciendo el lado izquierdo del corazón de Maravich, y que esta adaptación le hubiese permitido competir durante muchos años como uno de los mejores jugadores en la historia del baloncesto.

El sistema cardiovascular realiza un determinado número de importantes funciones en el cuerpo. La mayoría de ellas dan apoyo a otros sistemas fisiológicos. Las principales funciones cardiovasculares se pueden clasificar dentro de cinco categorías distintas:

1. Distribución.
2. Eliminación.
3. Transporte.
4. Mantenimiento.
5. Prevención.

Consideremos algunos ejemplos. El sistema cardiovascular distribuye nutrientes y oxígeno, y elimina dióxido de carbono y productos metabólicos de deshecho, de todas las células del cuerpo. Transporta hormonas desde las glándulas endocrinas hasta sus receptores objetivo. El sistema mantiene la temperatura del cuerpo, y la capacidad de amortiguamiento de la sangre ayuda a controlar el pH del cuerpo. El sistema cardiovascular mantiene unos niveles apropiados de fluido para prevenir la deshidratación y ayuda a prevenir las infecciones causadas por organismos invasores.

Aunque ésta es una lista abreviada, estas funciones cardiovasculares mencionadas son importantes para comprender las bases fisiológicas de la actividad física. Pero antes de examinar las respuestas cardiovasculares específicas de la actividad, necesitamos contemplar los componentes del sistema cardiovascular y cómo funcionan juntos.

Estructura y función del sistema cardiovascular

Es impresionante la capacidad del sistema cardiovascular para responder inmediatamente a las muchas y siempre cambiantes necesidades del cuerpo. Todas las funcio-

nes corporales y virtualmente cada una de las células del cuerpo dependen de algún modo de este sistema.

Cualquier sistema de circulación requiere tres componentes:

1. Una bomba (el corazón).
2. Un sistema de canales (los vasos sanguíneos).
3. Un medio fluido (la sangre).

Examinemos cada uno de ellos por separado.

Corazón

El corazón, mostrado en la figura 7.1, tiene dos aurículas actuando como cámaras de recepción y dos ventrículos como unidades de emisión. El corazón es la bomba principal que hace circular la sangre por todo el sistema vascular. Veamos el camino que sigue la sangre cuando se desplaza a través del corazón.

Flujo sanguíneo a través del corazón

La sangre que ha seguido su curso entre las células del cuerpo, aportando oxígeno y nutrientes y recogiendo los productos de deshecho, vuelve a través de las grandes venas –la vena cava superior y la vena cava inferior– a la aurícula derecha. Esta cámara recibe toda la sangre desoxigenada del cuerpo.

Desde la aurícula derecha, la sangre pasa a través de la válvula tricúspide al ventrículo derecho. Esta cámara bombea la sangre a través de la válvula pulmonar semilunar hasta la arteria pulmonar, que lleva la sangre a los pulmones derecho e izquierdo. Así, el lado derecho del corazón es conocido como el lado pulmonar, enviando la sangre que ha circulado por el cuerpo hacia los pulmones para reoxigenarla.

Después de recibir un aporte fresco de oxígeno, la sangre abandona los pulmones a través de las venas pulmonares, que la vuelven a llevar hacia el corazón y hacia

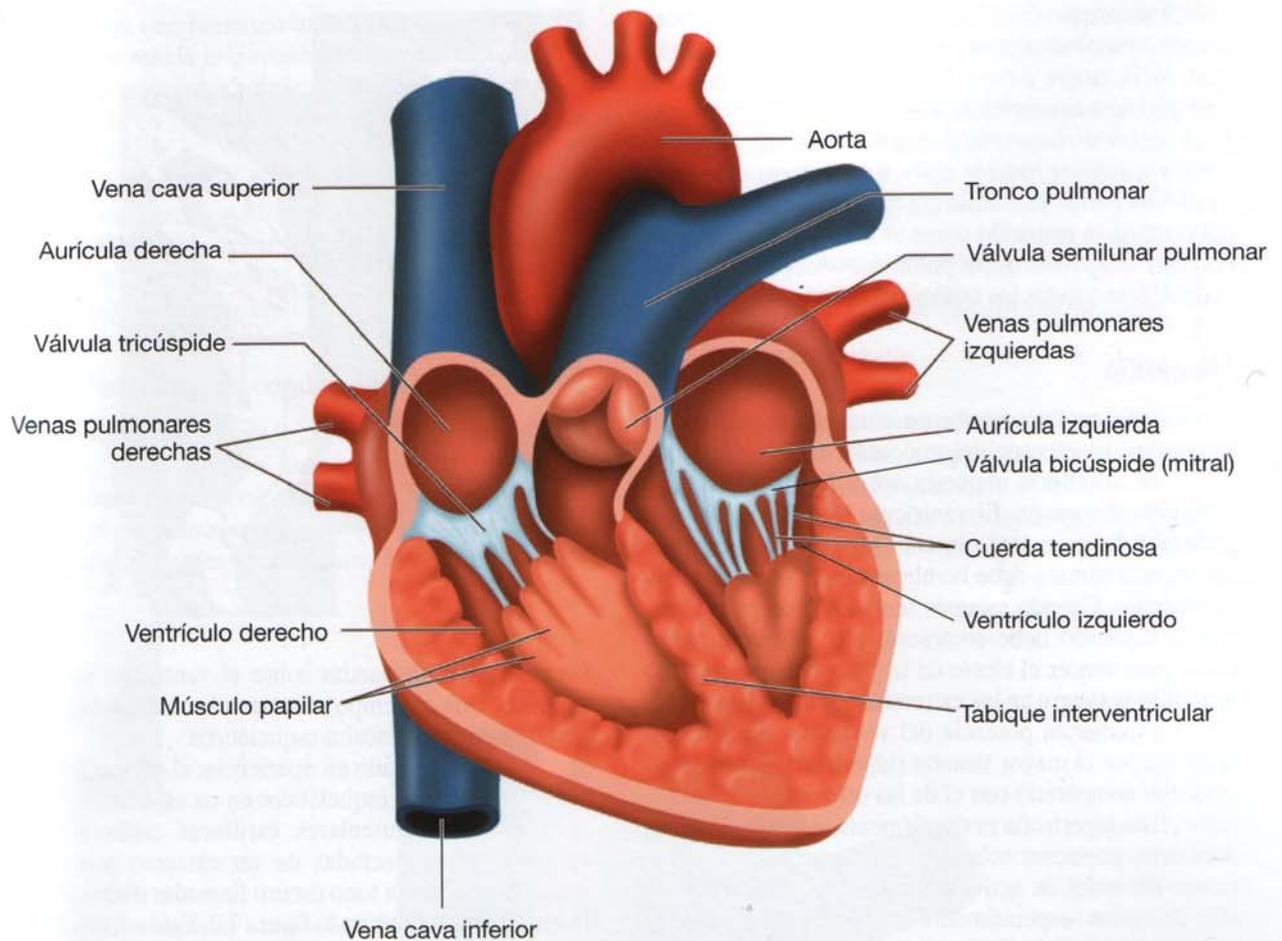


Figura 7.1 Anatomía del corazón humano.

Murmullo del corazón

Las cuatro válvulas impiden el reflujo de la sangre, asegurando un flujo unidireccional a través del corazón. Estas válvulas maximizan la cantidad de sangre bombeada desde el corazón durante la contracción. El murmullo del corazón es una condición en la que se detectan sonidos cardíacos anormales con la ayuda de un estetoscopio. Normalmente, las válvulas del corazón hacen un chasquido característico cuando se cierran. Con el murmullo, el chasquido es sustituido por un sonido similar al de un silbido. Este sonido anormal puede indicar la presencia de un flujo turbulento de sangre a través de una válvula estrechada o defectuosa. Puede indicar también la existencia de un flujo errante de sangre a través de un agujero en la pared que separa los lados derecho e izquierdo del corazón (defecto septal).

Los murmullos del corazón son muy comunes en los niños en desarrollo y en los adolescentes. Durante los períodos de crecimiento, el desarrollo de las válvulas no siempre prosigue al mismo ritmo que el agrandamiento de las aberturas cardíacas. Las válvulas pueden tener pérdidas incluso en el caso de los adultos. Con un prolapso de la válvula mitral, ésta (bicúspide) deja que una cierta cantidad de sangre refluja hacia la aurícula izquierda durante la contracción ventricular. Este trastorno, común en los adultos (entre el 6% y el 17% de la población), incluidos los deportistas, suele tener poca trascendencia clínica a menos que haya un importante reflujo.

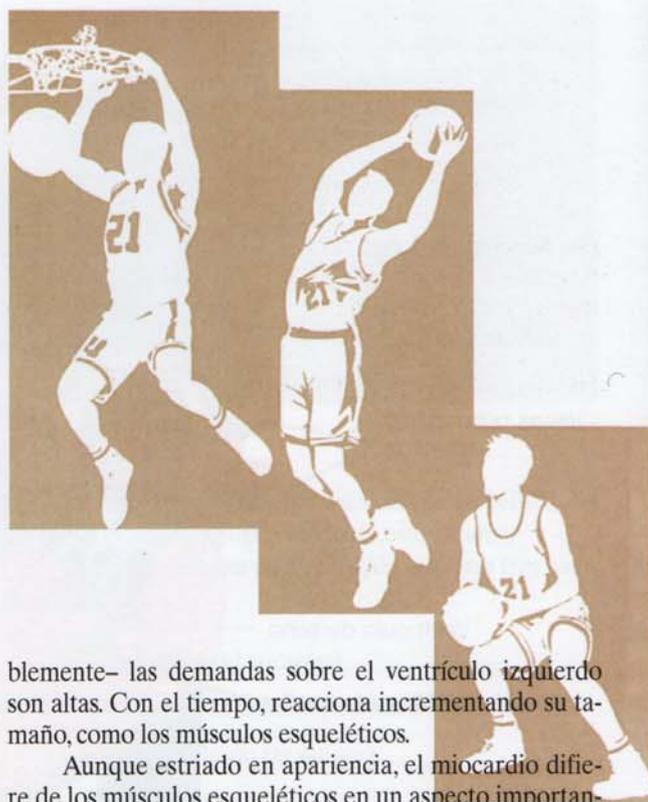
La mayoría de murmullos en los deportistas son benignos, sin afectar el bombeo del corazón ni el rendimiento del deportista. Pero los murmullos del corazón pueden indicar la presencia de unas válvulas enfermas, como por ejemplo las que tienen estenosis, en cuyo caso la válvula se ha estrechado y con frecuencia se ha hecho más gruesa y rígida. Esta condición puede requerir la sustitución quirúrgica de la válvula.

la aurícula izquierda. Toda la sangre recientemente oxigenada es recibida por esta cámara. Desde la aurícula izquierda, la sangre pasa a través de la válvula bicúspide (mitral) hacia el ventrículo izquierdo. La sangre abandona el ventrículo izquierdo pasando a través de la válvula aórtica semilunar hacia la aorta, que finalmente la envía a todas las partes y sistemas del cuerpo. El lado izquierdo del corazón es conocido como el lado sistémico. Recibe la sangre oxigenada de los pulmones y luego la envía para abastecer a todos los tejidos del cuerpo.

Miocardio

El músculo cardíaco recibe en conjunto el nombre de **miocardio**. El espesor del miocardio depende directamente de la tensión impuesta sobre las paredes de las cámaras del corazón. El ventrículo izquierdo es la más poderosa de las cuatro cámaras. Mediante sus contracciones, esta cámara debe bombear sangre por toda la ruta sistémica. Cuando estamos sentados o de pie, el ventrículo izquierdo debe contraerse con suficiente fuerza como para vencer el efecto de la gravedad, que tiende a acumular la sangre en las extremidades inferiores.

La tremenda potencia del ventrículo izquierdo es reflejada por el mayor tamaño (hipertrofia) de su pared muscular comparado con el de las otras cámaras del corazón. Esta hipertrofia es simplemente el resultado de las demandas impuestas sobre ella en reposo o bajo condiciones normales de actividad moderada. Con ejercicios más enérgicos —especialmente en las actividades aeróbicas intensas, durante las cuales las necesidades de sangre de los músculos en funcionamiento aumentan considera-



blemente— las demandas sobre el ventrículo izquierdo son altas. Con el tiempo, reacciona incrementando su tamaño, como los músculos esqueléticos.

Aunque estriado en apariencia, el miocardio difiere de los músculos esqueléticos en un aspecto importante. Las fibras musculares cardíacas están anatómicamente interconectadas de un extremo a otro por regiones teñidas en tono oscuro llamadas discos intercalados, tal como se ve en la figura 7.2. Estos discos tienen desmosomas, que son estructuras que unen las células individuales para que no se separen durante la contrac-

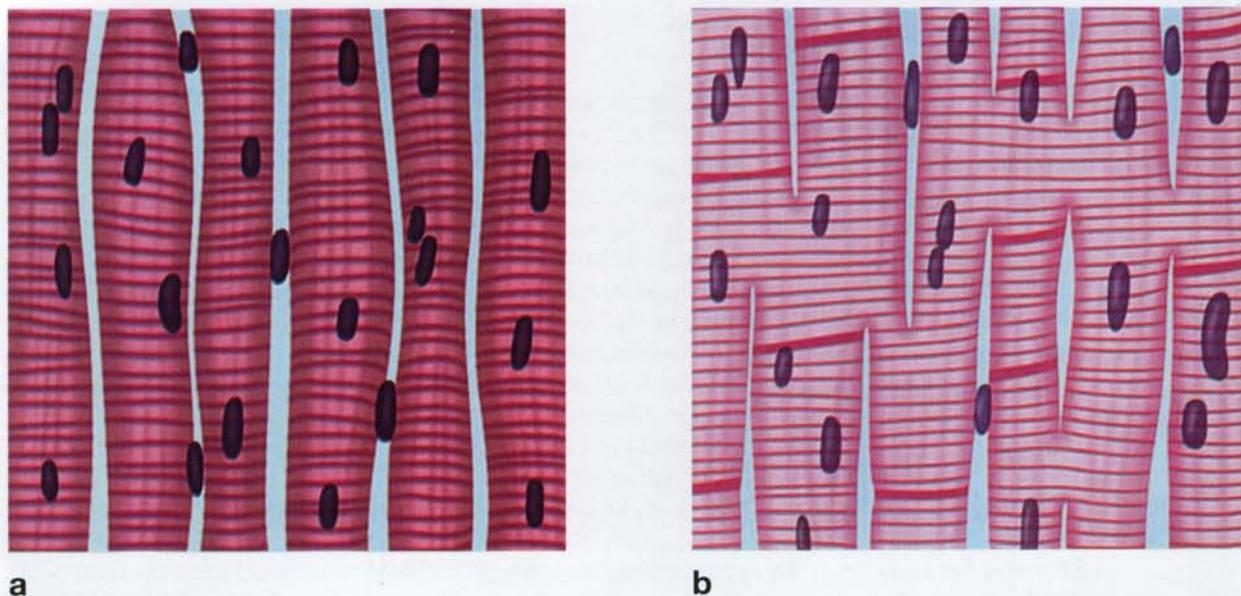


Figura 7.2 Micrografías de (a) músculo esquelético y (b) músculo cardíaco. Ambos tipos de músculo presentan forma estriada, pero sólo las fibras de músculo cardíaco están conectadas con discos intercalados de tinción más oscura.

izquierdo, protegiendo de este modo a aquellos vasos de posibles daños.

Retorno sanguíneo al corazón

Debido a que pasamos tanto tiempo de pie, el sistema cardiovascular precisa una cierta ayuda para superar la fuerza de la gravedad cuando la sangre que regresa de las partes inferiores del cuerpo vuelve al corazón. Existen tres mecanismos básicos que facilitan este proceso:

1. La respiración.
2. La bomba muscular.
3. Las válvulas.

Cada vez que inspiramos y espiramos, los cambios de presión en las cavidades abdominal y torácica facilitan el retorno sanguíneo al corazón. Cuando se contraen, los músculos esqueléticos de las piernas o del abdomen comparten esta función. Durante la respiración y la contracción muscular esquelética, las venas de la zona inmediata se comprimen y la sangre es empujada hacia arriba en dirección al corazón. Estas acciones son facilitadas por una serie de válvulas en las venas que permiten que la sangre fluya en una sola dirección, impidiendo así el reflujo y la acumulación de la sangre en la parte inferior del cuerpo (ver figura 7.6).

Distribución de la sangre

La distribución de la sangre hacia los diversos tejidos del cuerpo varía tremendamente en función de las necesidades inmediatas de un tejido específico y de todo el cuerpo. En reposo bajo condiciones normales, los tejidos más activos metabólicamente reciben el mayor aporte sanguíneo. El hígado y los riñones juntos reciben casi la mitad de la sangre que circula (el 27% y el 22%, respectivamente), y los músculos esqueléticos en reposo reciben solamente alrededor del 15%.

Durante el ejercicio, la sangre se dirige hacia las áreas en donde es más necesaria. Durante la realización de ejercicios que requieren una gran capacidad de resistencia, por ejemplo, esta redistribución es bastante notable —los músculos reciben hasta un 80% o incluso más de la sangre disponible—. Esto, junto con incre-

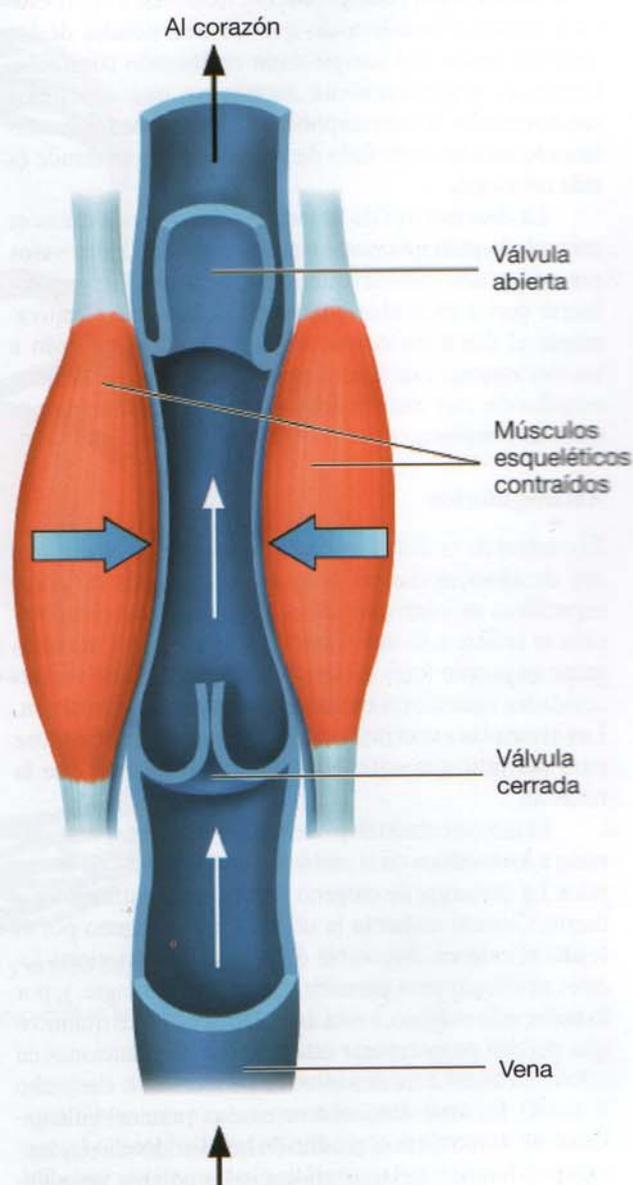


Figura 7.6 Vasoconstricción por efecto de bombeo de la musculatura. Cuando se contraen los músculos esqueléticos, comprimen las venas de las piernas y ayudan al retorno de la sangre al corazón. Las válvulas de las venas aseguran que la sangre vuelva al corazón.

mentos en el gasto cardíaco (que trataremos más adelante), permite un flujo de sangre hasta 25 veces mayor hacia los músculos activos.

Del mismo modo, después de tomar una gran comida, nuestro sistema digestivo recibe más sangre que cuando estamos en reposo. Durante una creciente tensión ambiental por el calor, el aporte de sangre a la piel

Viscosidad de la sangre

La viscosidad se refiere al espesor de la sangre. Cuanto más espeso es un fluido, más resistencia opone a la circulación. La densidad de la sangre suele ser el doble de la del agua. La viscosidad de la sangre, y, por lo tanto, la resistencia a fluir, se incrementa con la elevación del hematócrito.

Debido al transporte de oxígeno por los glóbulos rojos, sería deseable un incremento en su número para optimizar el transporte de oxígeno. Pero si el aumento del número de glóbulos rojos no va acompañado de un incremento similar en el volumen del plasma, la viscosidad de la sangre aumentará, lo cual puede restringir el flujo sanguíneo. En general, esto no es un problema, a menos que el hematócrito llegue al 60% o más.

A la inversa, la combinación de un hematócrito bajo con un alto volumen de plasma, reduciendo la viscosidad de la sangre, parece ser algo beneficiosa para la función de transporte de la sangre porque ésta puede fluir más fácilmente. Desgraciadamente, un hematócrito bajo es con frecuencia el resultado de un número reducido de glóbulos rojos, como en enfermedades tales como la anemia. Bajo estas circunstancias, la sangre puede fluir fácilmente, pero contiene menos transportadores, por lo que el transporte de oxígeno se ve dificultado. Para la actividad física, es deseable un bajo hematócrito con un número normal o ligeramente elevado de glóbulos rojos. Esta combinación debe facilitar el transporte de oxígeno. Muchos deportistas de deportes de resistencia alcanzan esta condición como parte de la adaptación normal de su sistema cardiovascular. Esto se verá en el capítulo 9.

Al donar sangre, la extracción de una unidad, casi 500 ml, representa aproximadamente entre un 8% y un 10% de reducción en el volumen total de sangre y en el número de glóbulos rojos circulantes. A los donantes se les aconseja tomar fluidos en abundancia. Puesto que el plasma es principalmente agua, el simple reemplazo de los fluidos vuelve el volumen del plasma a su nivel normal al cabo de 24 a 48 horas. No obstante, se necesitarán al menos 6 semanas para reconstituir el número de glóbulos rojos, ya que deben desarrollarse plenamente antes de que resulten funcionales. Esto pone gravemente en entredicho el rendimiento de los deportistas de resistencia al reducir la capacidad de transporte de oxígeno.

- ▶ La sangre y la linfa son las sustancias que transportan materiales hacia y desde los tejidos corporales.
- ▶ El fluido del plasma entra en los tejidos, convirtiéndose en líquido intersticial. La mayor parte del fluido intersticial vuelve a los capilares, pero cierta cantidad entra en el sistema linfático como linfa, volviendo posteriormente a la sangre.
- ▶ La sangre está constituida por entre un 55% y un 60% de plasma y entre un 40% y un 45% de células.
- ▶ El oxígeno se transporta principalmente combinado con la hemoglobina de los glóbulos rojos.
- ▶ Cuando la viscosidad de la sangre aumenta, también lo hace la resistencia a fluir.

Respuesta cardiovascular al ejercicio

Ahora que hemos visto la anatomía y la fisiología básicas del sistema cardiovascular, podemos centrarnos específicamente en cómo responde este sistema a las mayores demandas impuestas al cuerpo durante el ejercicio. Al realizar ejercicio, la demanda de oxígeno en los músculos activos aumenta de forma acusada. Se utilizan más nutrientes. Los procesos metabólicos se aceleran, por lo que se crean más productos de deshecho. Durante la realización de ejercicios prolongados o practicados en un ambiente caluroso, la temperatura del cuerpo aumenta. En el ejercicio intenso, la concentración de cationes hidrógeno (H^+) aumenta en los músculos y en la sangre, reduciendo su pH.

Durante el ejercicio se producen numerosos cambios cardiovasculares. Todos comparten un objetivo común: permitir que el sistema satisfaga las demandas impuestas sobre él al desempeñar sus funciones con la máxima eficacia. Para comprender mejor los cambios que se producen, debemos observar más de cerca las funciones cardiovasculares específicas. Examinaremos los cambios en todos los componentes del sistema cardiovascular, observando específicamente los siguientes:

- Frecuencia cardíaca.
- Volumen sistólico.

- Gasto cardíaco.
- Flujo de la sangre.
- Tensión arterial.
- Sangre.

Luego veremos la forma en que se integran estos cambios para cubrir las necesidades del cuerpo.

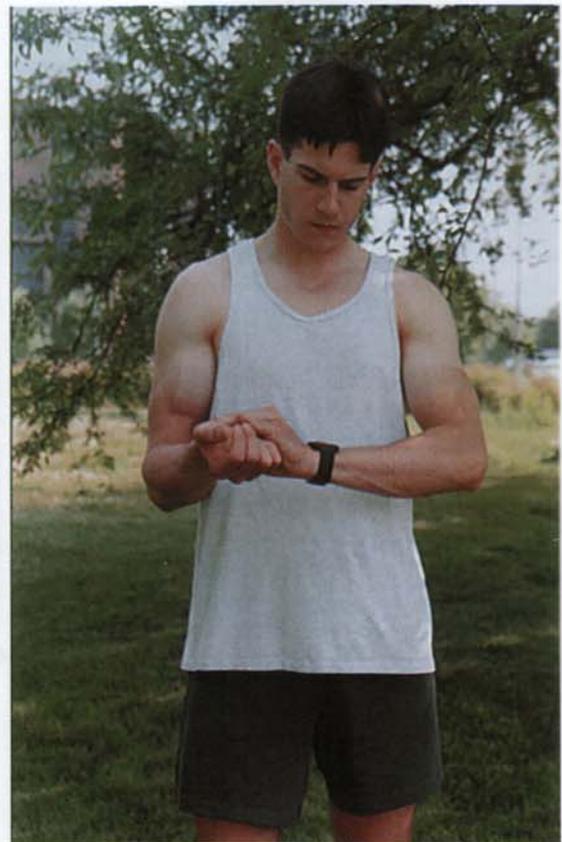
Frecuencia cardíaca

La frecuencia cardíaca (FC) es uno de los parámetros cardiovasculares más sencillos e informativos. Medirla implica simplemente tomar el pulso del sujeto, normalmente en el punto radial o carotídeo, tal como se muestra en la figura 7.9. La frecuencia cardíaca refleja la intensidad del esfuerzo que debe hacer el corazón para satisfacer las demandas incrementadas del cuerpo cuando está inmerso en una actividad. Para entender esto, debemos comparar la frecuencia cardíaca en reposo y durante el ejercicio.

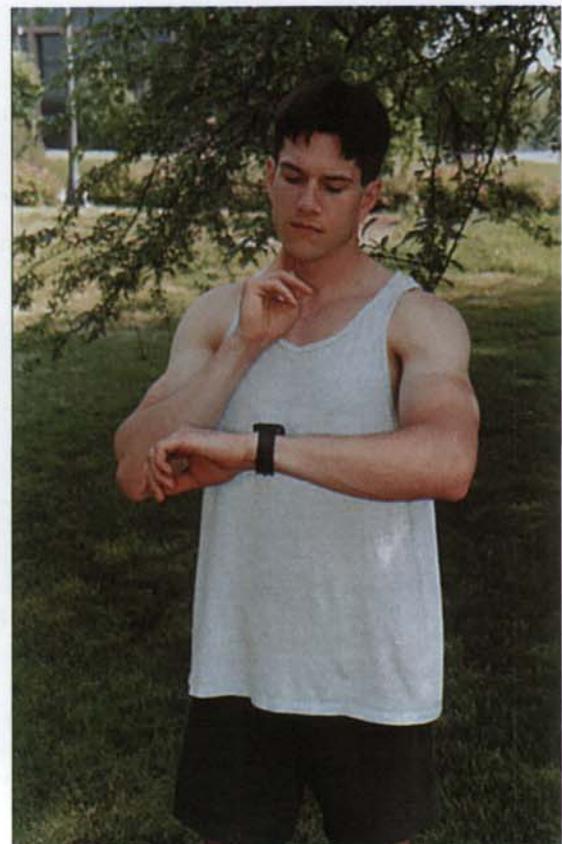
Frecuencia cardíaca en reposo

La frecuencia cardíaca **en reposo** de promedio es de 60 a 80 latidos/min. En individuos sedentarios, desentrenados y de mediana edad, el ritmo en reposo puede superar los 100 latidos/min. En deportistas muy en forma que siguen entrenamientos de resistencia, se han descrito frecuencias en reposo que oscilan entre 28 y 40 latidos/min. La frecuencia cardíaca normalmente decrece con la edad. Se ve afectada también por factores ambientales; por ejemplo, aumenta con la temperatura y la altitud.

Antes del inicio del ejercicio, nuestra frecuencia cardíaca previa al ejercicio suele aumentar muy por encima de los valores normales de reposo. Esto se denomina respuesta anticipatoria. Esta respuesta es mediada por la liberación del neurotransmisor noradrenalina desde el sistema nervioso simpático, y la hormona adrenalina desde la glándula suprarrenal. El tono vagal probablemente también se reduce. Puesto que la frecuencia cardíaca previa al ejercicio es elevada, las estimaciones fiables de la verdadera frecuencia cardíaca en reposo deben hacerse solamente bajo condiciones de total relajación, tales como a primeras horas de la mañana al levantarse después de un sueño reparador durante la noche. La frecuencia cardíaca previa al ejercicio no debe usarse como estimación de la frecuencia cardíaca en reposo.



a



b

Figura 7.9 Procedimiento para tomar (a) el pulso radial y (b) el pulso carotídeo.

Frecuencia cardíaca durante el ejercicio

Cuando se empieza a hacer ejercicio, la frecuencia cardíaca aumenta directamente en proporción al incremento de la intensidad del ejercicio (ver figura 7.10) hasta llegar a un punto cercano al agotamiento. Al aproximarse a este punto, la frecuencia cardíaca empieza a nivelarse. Esto muestra que nos acercamos al valor máximo. La **frecuencia cardíaca máxima** (FC máx.) es el valor máximo de la frecuencia cardíaca que se alcanza en un esfuerzo a tope hasta llegar al agotamiento. Es un valor muy fiable que se mantiene constante de un día para otro y sólo cambia ligeramente de año en año.

La frecuencia cardíaca máxima se calcula basándose en la edad, porque la frecuencia cardíaca máxima muestra un declive ligero pero regular de un latido por año comenzando de los 10 a los 15 años de edad. Se resta la edad a 220 y se obtiene una aproximación de la media de la frecuencia cardíaca máxima. No obstante, es sólo una aproximación; los valores individuales cambian considerablemente. Veamos un ejemplo, para una persona de 40 años de edad; la frecuencia cardíaca máxima sería unos 180 latidos/min (FC máx. = $220 - 40$). Sin embargo, el 68% de las personas de 40 años presentan valores reales de su frecuencia cardíaca máxima entre 168 y 192 latidos/min (media ± 1 desviación estándar), y un 95% está entre 156 y 204 latidos/min (media ± 2 desviaciones estándar). Esto muestra el riesgo potencial de error al calcular la frecuencia cardíaca máxima de una persona.

Para calcular la frecuencia cardíaca máxima:

$$\text{FC máx.} = 220 - \text{edad en años}$$

Estado estable de la frecuencia cardíaca

Cuando el ritmo de esfuerzo se mantiene constante a niveles submáximos de ejercicio, la frecuencia cardíaca se incrementa muy rápidamente hasta llegar a estabilizarse. Este punto de estabilización es conocido como el **estado estable de la frecuencia cardíaca**, y es el ritmo óptimo del corazón para satisfacer las exigencias circulatorias a este ritmo específico de esfuerzo. Para cada incremento posterior de intensidad, la frecuencia cardíaca

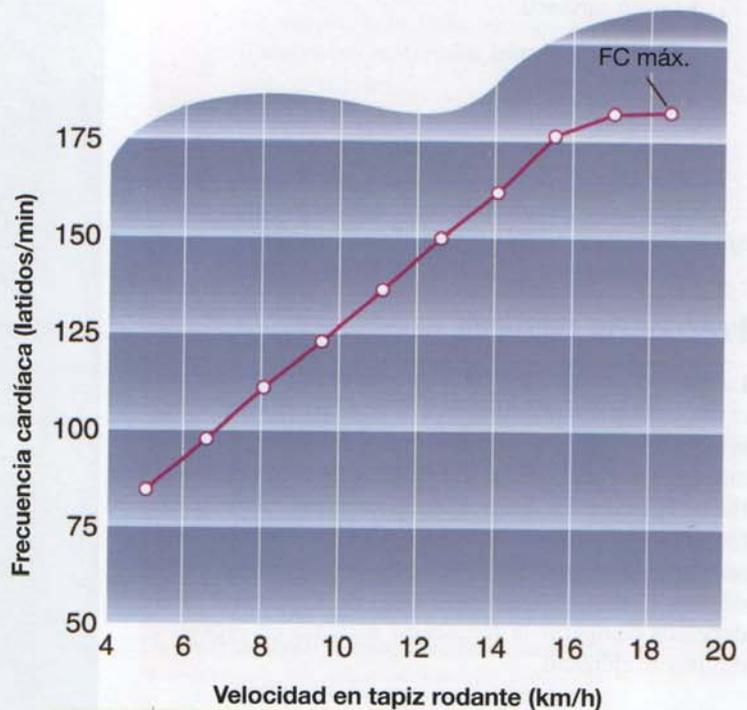


Figura 7.10 Cambios en la frecuencia cardíaca al caminar, trotar y correr aumentando la velocidad en un tapiz rodante. La frecuencia cardíaca aumenta en proporción directa al aumento de la velocidad, llegando finalmente a la frecuencia cardíaca máxima (FC máx.)

alcanzará un nuevo valor estable al cabo de 1 ó 2 min. No obstante, cuanto más intenso es el ejercicio, más se tarda en alcanzar este estado estable.

El concepto de frecuencia cardíaca estable constituye la base de varias pruebas que se han desarrollado para estimar el nivel de *fitness*. En una de estas pruebas, a los individuos se les sitúa en un dispositivo para hacer ejercicio, como por ejemplo un cicloergómetro, y se les hace ejercitarse a dos o tres ritmos de esfuerzo distintos. Los que están en mejores condiciones físicas, basándose en su resistencia cardiorrespiratoria, tendrán estados estables más bajos de la frecuencia cardíaca a un ritmo determinado de esfuerzo que quienes no están en tan buena forma. Por lo tanto, la frecuencia cardíaca estable es un pronosticador válido de la eficacia del corazón —una frecuencia cardíaca menor refleja un corazón más eficaz—.

Cuando el ejercicio se ejecuta a un ritmo constante durante un período prolongado de tiempo, particularmente bajo condiciones de calor, la frecuencia cardíaca tiende a aumentar en lugar de mantener su valor estable. Esta respuesta es parte de un fenómeno llamado desplazamiento cardiovascular (tratado más adelante en este capítulo).