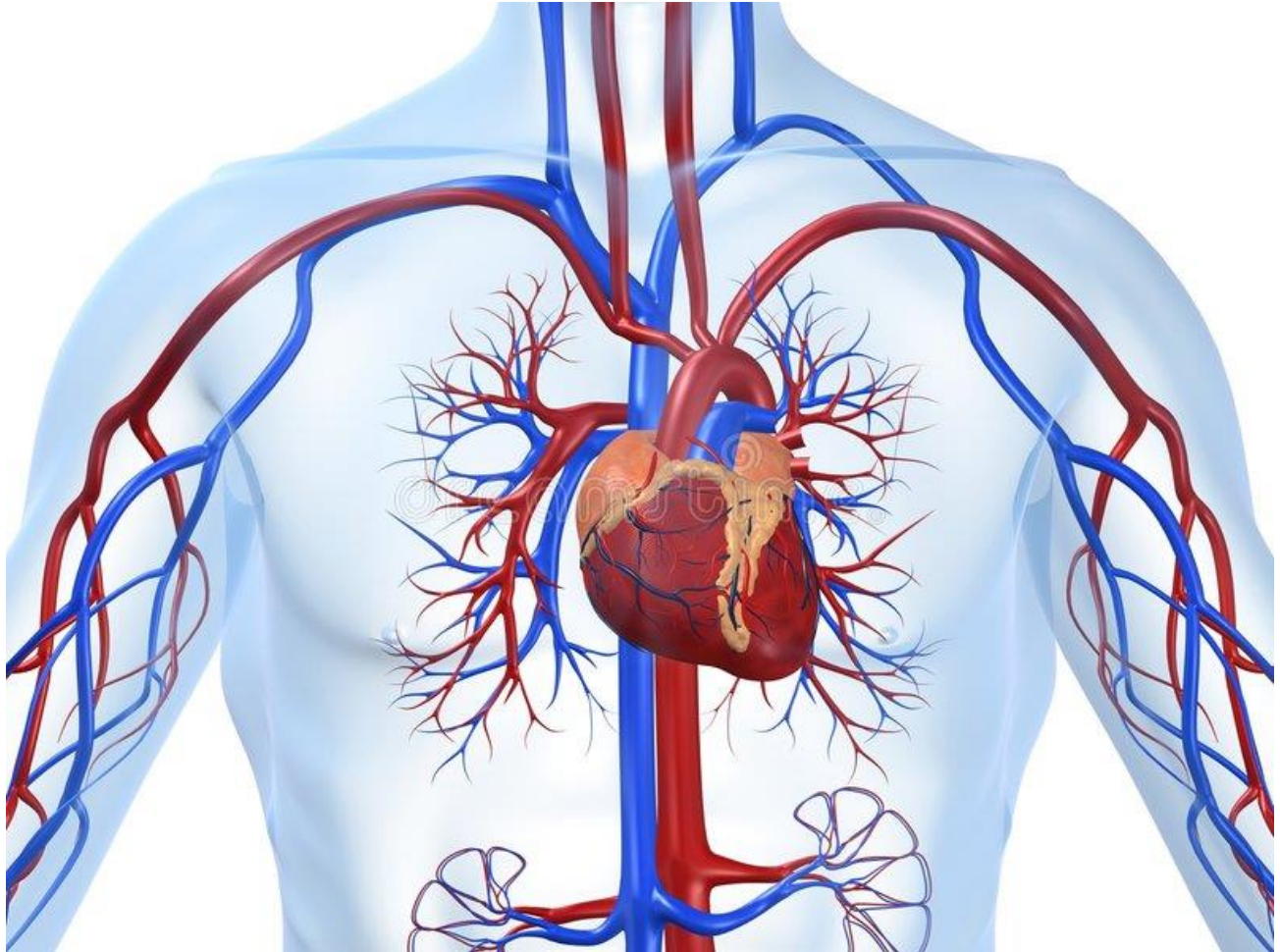


UNIDAD 3



UNIDAD CARDIOVASCULAR

ANATOMÍA Y FISIOLÓGÍA DEL APARATO

CARDIOVASCULAR

ELABORADO POR: JAVIER CÉSPEDES MATA, ME.

jacema.jimdo.com

Contenido

SISTEMA CARDIOVASCULAR.....	3
Introducción	3
Funciones del sistema circulatorio	3
Tejidos	4
Principales Proteínas constituyentes del Sarcómero:	10
EL CORAZÓN	12
Orientación y anatomía superficial del corazón	12
Estructura de la pared cardíaca	14
Las cámaras cardíacas	15
Estructura y funcionamiento de las válvulas cardíacas.....	17
El flujo de sangre por las cámaras	19
Vasos sanguíneos y linfáticos	20
Introducción	20
Estructura de los vasos sanguíneos	20
La circulación coronaria	30
Metabolismo del músculo cardíaco	33
TEJIDO MUSCULAR CARDÍACO Y SISTEMA DE CONDUCCIÓN DEL CORAZÓN.....	34
Fibras automáticas: el sistema de conducción.....	35
Producción de ATP en el músculo cardíaco	39
ELECTROFISIOLOGÍA DEL CORAZÓN.....	41
Estado de reposo de las células cardíacas.....	41
Despolarización y repolarización	42
Automatismo	46
Control Del Sistema Nervioso Autónomo Sobre El Corazón.....	47
Bibliografía.....	50

SISTEMA CARDIOVASCULAR

Introducción

La función principal del sistema cardiovascular es abastecer de sangre a los tejidos, proporcionar los nutrientes esenciales a las células para el metabolismo y eliminar los productos de desecho de las células. El corazón actúa a modo de bomba, de modo que, al contraerse, genera la presión que impulsa a la sangre a través de una serie de vasos sanguíneos. Los vasos que transportan la sangre desde el corazón hasta los tejidos son las arterias, que están sometidas a una presión elevada y que contienen un porcentaje relativamente pequeño del volumen sanguíneo.

Las venas, que transportan la sangre de retorno desde los tejidos hasta el corazón, son vasos de baja presión y contienen el porcentaje más elevado del volumen sanguíneo. En el interior de los tejidos hay una serie de vasos sanguíneos de pared fina denominados capilares que se interponen entre las arterias y las venas. A través de las paredes de los capilares tiene lugar el intercambio de nutrientes, de productos de desecho y de líquidos.

El sistema cardiovascular también interviene en diferentes funciones homeostáticas: participa en la regulación de la presión arterial, transporta varias hormonas reguladoras desde las glándulas endocrinas hasta sus lugares de acción en los tejidos diana, y participa en la regulación de la temperatura corporal y en los ajustes homeostáticos en respuesta a estados fisiológicos alterados como las hemorragias, el ejercicio o los cambios posturales.

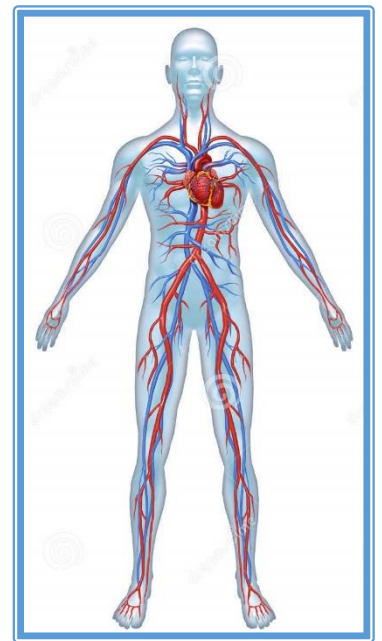


Figura 1, Sistema circulatorio

Funciones del sistema circulatorio

Las funciones del sistema circulatorio (figura 1) pueden dividirse en tres áreas amplias: transporte, regulación y protección.

1. Transporte. El sistema circulatorio transporta todas las sustancias esenciales para el metabolismo celular; estas sustancias pueden clasificarse como sigue:

a. Respiratorias. Los eritrocitos, o glóbulos rojos, transportan oxígeno hacia las células. En los pulmones, el oxígeno proveniente del aire inhalado se fija a las moléculas de hemoglobina dentro de los eritrocitos, y se transporta hacia las células para respiración aeróbica.

El dióxido de carbono que se produce por la respiración celular es transportado por la sangre hacia los pulmones para eliminación en el aire exhalado.

b. Nutritivas. El sistema digestivo se encarga de la desintegración mecánica y química de los alimentos, de modo que puedan absorberse a través de la pared intestinal hacia los vasos sanguíneos y linfáticos. A continuación, la sangre transporta estos productos de la digestión absorbidos, a través del hígado, hacia las células del cuerpo.

c. Excretorias. Los desechos metabólicos (como la urea), el agua y los iones excesivos, y otras moléculas que el cuerpo no necesita, son transportados por la sangre hacia los riñones y excretados en la orina.

2. Regulación. El sistema circulatorio contribuye a la regulación tanto hormonal como de la temperatura.

a. Hormonal. La sangre transporta hormonas desde su sitio de origen hacia tejidos blanco distantes, donde desempeñan diversas funciones reguladoras.

b. Temperatura. La regulación de la temperatura es auxiliada por la desviación de la sangre desde vasos cutáneos más profundos hacia vasos más superficiales, o viceversa. Cuando la temperatura ambiente es alta, la desviación de la sangre desde vasos profundos hacia vasos superficiales ayuda a enfriar el cuerpo, y cuando la temperatura ambiente es baja, la desviación de sangre desde vasos superficiales hacia vasos profundos ayuda a mantener la temperatura del cuerpo.

3. Protección. El sistema circulatorio protege contra pérdida de sangre por lesión y contra agentes patógenos, entre ellos microbios y toxinas extraños introducidos en el cuerpo.

a. Coagulación. El mecanismo de coagulación protege contra pérdida de sangre cuando hay daño de los vasos.

b. Función inmunitaria. La función inmunitaria de la sangre es efectuada por los leucocitos (glóbulos blancos) que protegen contra muchos agentes que causan enfermedad (patógenos).

Tejidos

Los grupos de células que tienen estructura y funciones parecidas se denominan **tejidos**. Los cuatro tipos de tejido primario (epitelio, tejido conectivo, tejido nervioso y muscular) interactúan para formar la materia del organismo.

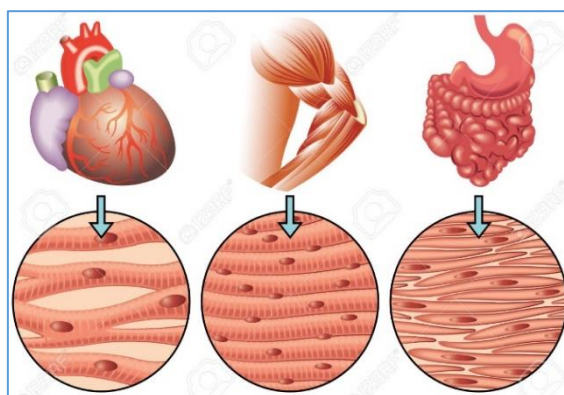


Figura 2, Tejido Cardíaco, Esquelético y Liso

Los **tejidos musculares** están muy especializados en contraerse o acortarse para producir movimiento y se dividen en tres tipos de tejido muscular:

1. Estriado (o esquelético)
2. Cardíaco
3. Liso (también denominado tejido muscular visceral)

Estos tejidos musculares comparten entre sí cuatro propiedades básicas:

1. *Excitabilidad*: capacidad de responder a una estimulación. Por ejemplo, los músculos estriados habitualmente responden a la estimulación del sistema nervioso y algunos músculos lisos también lo hacen a las hormonas circulantes.
2. *Contractilidad*: capacidad de acortarse activamente y ejercer una fuerza o una tensión que los tejidos conjuntivos puedan canalizar.
3. *Extensibilidad*: capacidad de seguir contrayéndose dentro de sus límites de longitud en reposo. Por ejemplo, un miocito liso puede alcanzar varias veces su extensión inicial y todavía contraerse más al recibir un estímulo.
4. *Elasticidad*: capacidad de un músculo de recuperar sus dimensiones primitivas tras una contracción.

Músculo esquelético

El tejido del músculo esquelético está formado por láminas de tejido conectivo con el objeto de constituir órganos que se llaman músculos esqueléticos, que están unidos al esqueleto. Estos músculos, que se pueden controlar voluntariamente (o conscientemente), forman la carne del organismo, el llamado sistema muscular. Cuando los músculos esqueléticos se contraen, tiran de los huesos o de la piel.

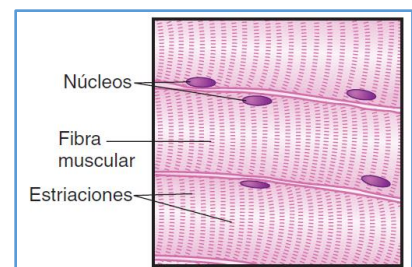


Figura 3, Musculo esquelético

Músculo cardíaco

El músculo cardíaco, sólo se encuentra en el corazón. Conforme se contrae, el corazón actúa como una bomba y empuja la sangre a través de los vasos sanguíneos. Al igual que los músculos esqueléticos, el músculo cardíaco tiene estriaciones, pero las células cardíacas son células uninucleadas, relativamente cortas y ramificadas, que se enlazan entre sí estrechamente (como los dedos apretados) en uniones llamadas discos intercalados. Estos discos

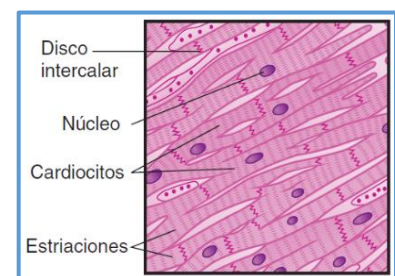


Figura 4, Musculo cardíaco

intercalados contienen uniones gap que permiten que los iones pasen libremente de célula a célula,

lo que da como resultado una rápida conducción del impulso eléctrico de excitación por todo el corazón. El músculo cardíaco está sometido a un control involuntario, lo que quiere decir que no se puede controlar conscientemente la actividad del corazón

Músculo liso

El músculo liso o visceral recibe este nombre porque no tiene estriaciones visibles. Las células individuales poseen un único núcleo y tienen forma de huso (con punta en cada uno de sus dos lados). El músculo liso aparece en las paredes de los órganos huecos como el estómago, el útero y los vasos sanguíneos. Conforme el músculo liso se contrae, la cavidad de un órgano se hace alternativamente menor (estrechamiento por la contracción del músculo liso) o mayor (dilatación por la relajación del músculo liso), de manera que las sustancias se propulsan a través del órgano siguiendo un camino determinado. El músculo liso se contrae con mucha mayor lentitud que los otros dos tipos de músculos.

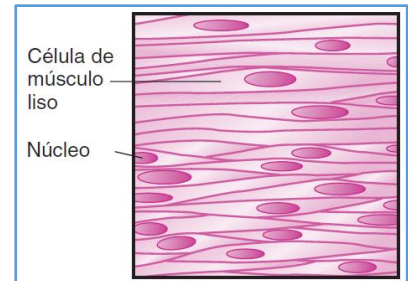


Figura 5, Músculo liso

Tejido muscular cardíaco

Las características histológicas poco habituales del tejido muscular cardíaco confieren al miocardio sus propiedades funcionales particulares. Las células musculares cardíacas o cardiocitos, son relativamente pequeñas, con un diámetro promedio de 10-20 μm y una longitud de 50-100 μm . Un cardiocito típico tiene un único núcleo de localización central.

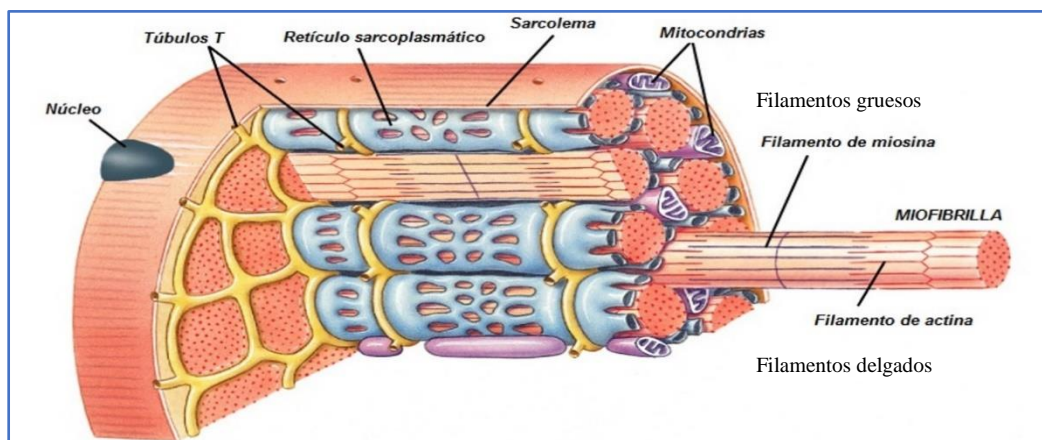


Figura 6, Composición de la célula muscular (miocito)

Aunque son mucho más pequeñas que las fibras musculares estriadas, las células musculares cardíacas se asemejan a las fibras musculares estriadas en que cada una contiene miofibrillas organizadas, y en que la alineación de sus sarcómeros produce estriaciones. Sin embargo, las

células musculares cardíacas difieren de las fibras musculares estriadas en varios aspectos importantes:

1. Las células musculares cardíacas son dependientes casi en su totalidad de la respiración aerobia para obtener la energía necesaria para continuar contrayéndose. El sarcoplasma de las células musculares cardíacas contiene, por tanto, cientos de mitocondrias y reservas abundantes de mioglobina (para almacenar oxígeno). Las reservas energéticas se mantienen en forma de glucógeno e inclusiones lipídicas.
2. Los relativamente cortos túbulos T de las células musculares cardíacas no forman tríadas dentro del retículo sarcoplásmico.
3. El aporte circulatorio al tejido muscular cardíaco es incluso más extenso que el del tejido muscular esquelético rojo.
4. Las células musculares cardíacas se contraen sin instrucciones del sistema nervioso.
5. Las células musculares cardíacas están interconectadas mediante uniones celulares especializadas denominadas discos intercalares.

Discos intercalares

Las células musculares cardíacas están conectadas con las células vecinas en uniones celulares especializadas conocidas como discos intercalares son exclusivos del tejido muscular cardíaco. La apariencia rasgada se debe al extenso entrelazamiento entre las membranas sarcolémicas adyacentes.

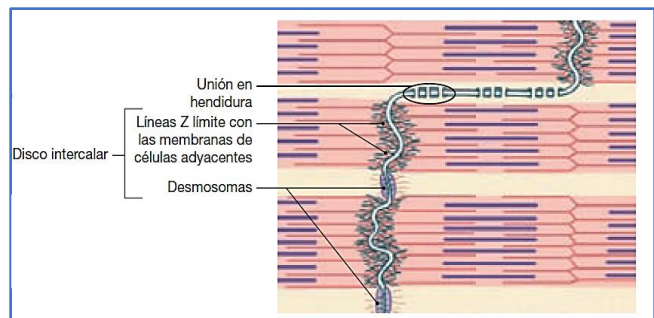


Figura 7, Estructura del disco intercalar

En un disco intercalar:

1. Los sarcolemas de dos células musculares cardíacas están unidos por desmosomas (maculae adherens). Esto ancla las células entre sí y ayuda a mantener la estructura tridimensional del tejido.
2. Las miofibrillas de estas células musculares están firmemente ancladas al sarcolema en el disco intercalar. El disco intercalar ata, por tanto, las miofibrillas de células adyacentes. Como resultado, las dos células musculares «tiran unidas» con máxima eficiencia.
3. Las células musculares cardíacas también están conectadas mediante uniones en hendidura. Iones y pequeñas moléculas pueden desplazarse entre las células en las uniones en hendidura, creando, por tanto, una conexión eléctrica directa entre las dos células musculares. Como resultado, el estímulo para la contracción o potencial de acción puede transmitirse de una célula muscular cardíaca a otra como si el sarcolema fuera continuo.

Como las células musculares cardíacas se encuentran conectadas mecánica, química y eléctricamente entre sí, el tejido muscular cardíaco funciona como si fuera una célula muscular única gigante. La contracción de cualquiera de las células desencadenará la contracción de varias otras, y esta contracción se extenderá progresivamente a lo largo del miocardio. Por esta razón se ha considerado el músculo cardíaco como un sincitio funcional («masa fusionada de células»).

Las estriaciones (bandas) se producen por bandas oscuras y claras alternantes que parecen abarcar el ancho de la fibra. Las bandas oscuras se llaman **bandas A**, y las bandas claras, **bandas I**. A aumento alto en un microscopio electrónico, pueden observarse líneas oscuras delgadas a la mitad de las bandas I. Éstas se llaman **líneas Z** (figura 8). Las etiquetas A, I y Z que se asignaron en el transcurso de la investigación temprana de los músculos son útiles para distinguir la estructura funcional de las fibras musculares. Las letras A e I significan anisotrópicas e isotrópicas, respectivamente, lo que indica la conducta de la luz polarizada conforme pasa a través de estas regiones; la letra Z proviene de la palabra alemana *Zwischenscheibe*, que se traduce como “entre discos”; esta información es sólo de interés histórico.

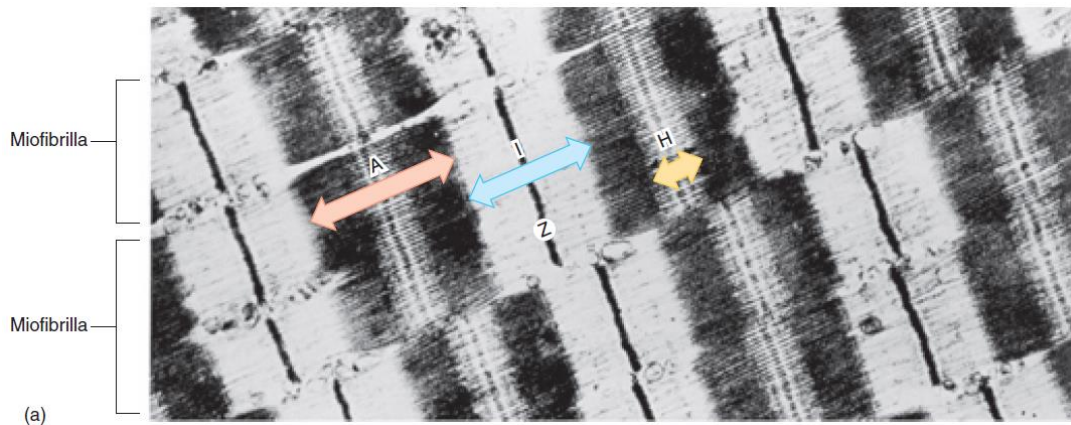


Figura 8, Las estriaciones de los músculos esqueléticos se producen por filamentos gruesos y delgados. a) Micrografía electrónica de un corte longitudinal de miofibrillas, que muestra el patrón de bandas característico del músculo estriado

Mecanismos De Contracción

Las bandas A dentro de cada fibra muscular están compuestas de filamentos gruesos, y las bandas I contienen filamentos delgados. Puentes que se extienden desde los filamentos gruesos hacia los delgados causan deslizamiento de los filamentos y, así, tensión y acortamiento musculares. La actividad de los puentes está regulada por la disponibilidad de Ca^{2+} , que aumenta por potenciales de acción en la fibra muscular.

Cuando una fibra muscular se observa con un microscopio electrónico, sus estriaciones no se extienden en toda su anchura. Más bien, dentro de cada miofibrilla se observan las bandas A oscuras

y las bandas I claras que producen las estriaciones (figura 8). Dado que las bandas oscuras y claras de diferentes miofibrillas están alineadas verticalmente desde un lado de la fibra muscular hasta el otro, y las miofibrillas individuales no son visibles con un microscopio óptico ordinario, toda la fibra muscular parece estar estriada bajo un microscopio óptico.

Cada miofibrilla contiene estructuras aún más pequeñas llamadas miofilamentos. Cuando una miofibrilla se observa a aumento alto en corte longitudinal (vista lateral), se aprecia que las bandas A contienen filamentos gruesos, los cuales miden alrededor de 110 angstroms (110 Å, donde 1 Å = 10⁻¹⁰ m) de grosor y están alineadas verticalmente. Son estos filamentos gruesos los que imparten a la banda a su aspecto oscuro. En contraste, la banda I más clara contiene filamentos delgados (de 50 a 60 Å de grosor). Los filamentos gruesos están compuestos principalmente de la proteína miosina, y los filamentos delgados, de la proteína actina.

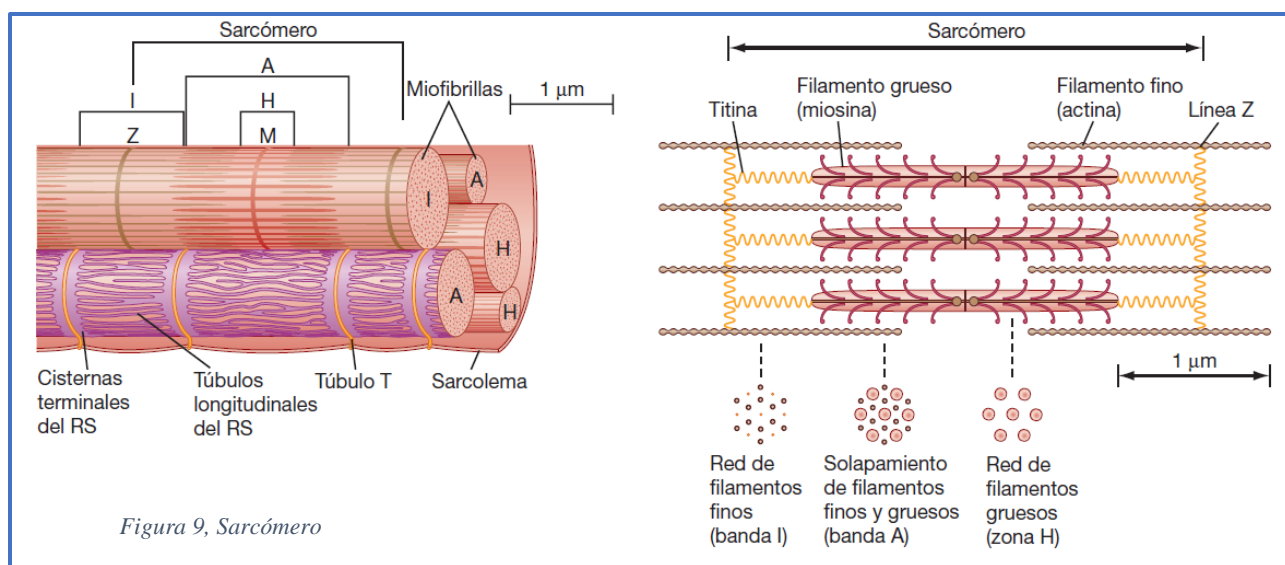


Figura 9, Sarcómero

Las bandas I dentro de una miofibrilla son las áreas más claras que se extienden desde el borde de una pila de filamentos gruesos hasta el borde de la siguiente pila de filamentos gruesos. Tienen aspecto claro porque sólo contienen filamentos delgados. Sin embargo, los filamentos delgados no terminan en los bordes de las bandas I. En lugar de eso, cada filamento delgado se extiende hasta cierta distancia hacia las bandas A en cada lado (entre la pila de filamentos gruesos a cada lado de una banda I). Dado que los filamentos gruesos y delgados se superponen en los bordes de cada banda A, los bordes de esta última tienen aspecto más oscuro que la región central. Estas regiones más claras centrales de las bandas A se llaman las bandas H (de helle, una palabra del alemán que significa “brillante”). Así, las bandas H centrales sólo contienen filamentos gruesos que no están superpuestos por filamentos delgados.

En el centro de cada banda I hay una línea Z oscura y delgada. La disposición de filamentos gruesos y delgados entre subunidad básica de la contracción del músculo estriado. Estas subunidades, de Z a Z, se conocen como **sarcómeros**.

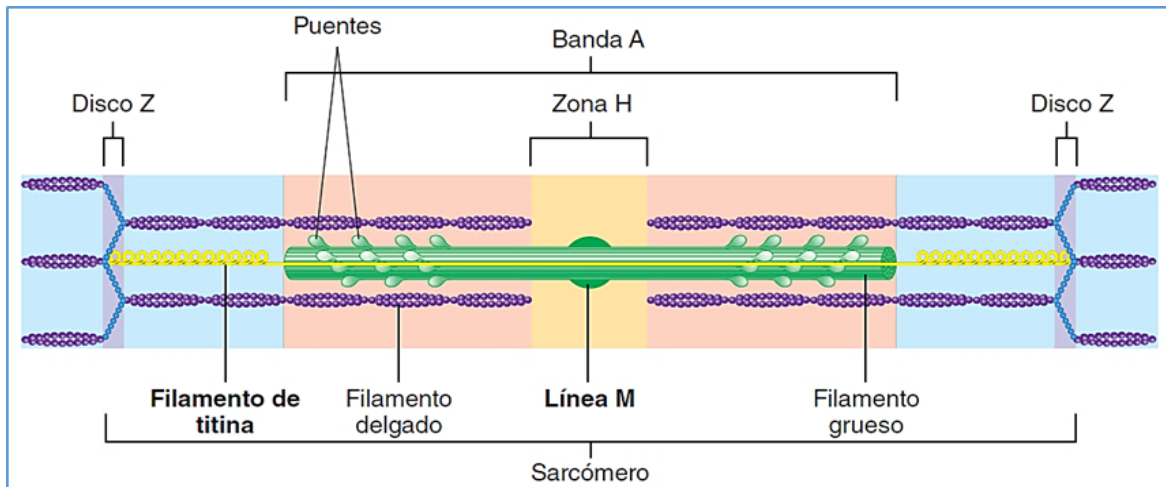


Figura 10, Filamentos de titina y líneas M. Las líneas M son filamentos de proteína a la mitad de las bandas que unen entre sí filamentos gruesos. Las proteínas titina son proteínas elásticas en extremo grandes que corren a través de los filamentos gruesos, empezando en las líneas M y terminando en los discos Z; estabilizan la posición de cada filamento grueso dentro del sarcómero y sirven como elementos elásticos que ayudan a los músculos a regresar a su longitud en reposo.

Principales Proteínas constituyentes del Sarcómero:

Filamentos Delgados:

- Actina: Forma el armazón estructural básico de los Filamentos Delgados (Bandas I o Claras), cada monómero (unidad) es llamada "Actina G" por su forma globular, el complejo completo está compuesto por cerca de 400 monómeros y se denomina F Actina, se dispone en dos cadenas largas enrolladas entre sí como un rosario. Encontramos aquí también los Sitios Activos, donde se realiza la unión con la miosina; fenómeno que analizaremos en detalle más adelante.
- Tropomiosina: Se le llama así por la similitud que tiene con las colas de Actina, ocupa los surcos que quedan entre medio de la doble hélice de actina. En el músculo en reposo la Tropomiosina actúa bloqueando los sitios activos de la actina.
- Troponina (Tn): Proteína globular de menor tamaño que el resto pero mucho más compleja, está compuesta por 3 subunidades que poseen funciones específicas:
 - ✓ Troponina C (TnC): Capta el Calcio vaciado al sarcoplasma en el inicio de la contracción.
 - ✓ Troponina I (TnI): Tiene alta afinidad con la Actina, su Acción Principal es Inhibir la interacción Actina - Miosina; además influye en la actividad ATPasa de las Cabezas de Miosina, en relajación Inhibe la función ATPasa.

- ✓ Troponina T (TnT): Regula la actividad funcional de los "Sitios Activos" de la actina, a través de cambios inducidos sobre la posición de la tropomiosina.
- ATPasa: Función enzimática que descompone el ATP, generalmente produce la ruptura de los enlaces de Fosfato y ocupar la energía liberada por estos en otros procesos.

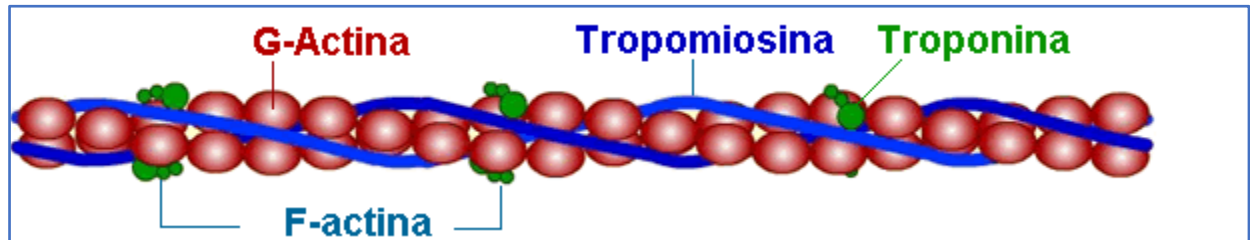


Figura 11, Filamento delgado

Filamentos Gruesos:

Es una proteína compleja compuesta por dos cadenas polipeptídicas (uniones masivas de aminoácidos), posee una doble cabeza con las cuales buscarán unirse a los sitios activos de la actina. Bajo un tratamiento de enzimas hidrolíticas podemos descomponer la Miosina, en dos fragmentos: Meromiosina Ligera (cola) y Meromiosina Pesada (cabeza) donde encontramos la actividad ATPasa que tienen para producir Fuerza y también la relajación del músculo.

Otras Proteínas del Sarcómero:

- Proteína M: Permite estabilizar los miofilamentos gruesos que traba las colas de las miosinas de cada uno de los costados del sarcómero. Además, une los filamentos gruesos del sarcómero con los de otros sarcómeros adyacentes.
- Titina: Tiene una gran longitud, estimada en 1 μm , le otorga estabilidad elástica los sarcómeros durante contracción o estiramiento, es considerada una proteína fundamental en el desarrollo de la fuerza excéntrica.
- Distrofina: Tiene una función preventiva de la alteración de la arquitectura de las fibras musculares. Además se asocian algunas patologías a una mutación de esta proteína.

EL CORAZÓN

Para que la sangre alcance las células del cuerpo e intercambie sustancias con ellos, debe ser bombeada constantemente por el corazón. El corazón late unas 100 000 veces por día, lo que suma 35 millones de latidos por año y 2 500 millones de veces en toda una vida. El lado izquierdo del corazón bombea sangre hacia unos 120 000 km de vasos sanguíneos, que es el equivalente a viajar 3 veces alrededor del mundo. El lado derecho del corazón bombea sangre hacia los pulmones, permitiendo que recoja oxígeno y descargue dióxido de carbono. Aun cuando usted duerme, su corazón late 30 veces su propio peso cada minuto, que representa unos 5 litros hacia los pulmones y el mismo volumen hacia el resto del cuerpo. Esto significa que su corazón bombea más de 14 000 litros de sangre por día o 5 millones de litros por año. Usted no pasa todo el tiempo durmiendo, y su corazón bombea más vigorosamente cuando se encuentra activo. Así, el volumen real de sangre que bombea su corazón durante el día es mayor.

El corazón es una bomba muscular que mediante contracciones rítmicas bombea la sangre a través del sistema vascular, sus medidas aproximadas son: $12 \times 9 \times 6$ cm (mide aproximadamente lo mismo que un puño cerrado) y pesa por lo regular unos 300 g. (310 g. en el hombre y 225 g. en la mujer).

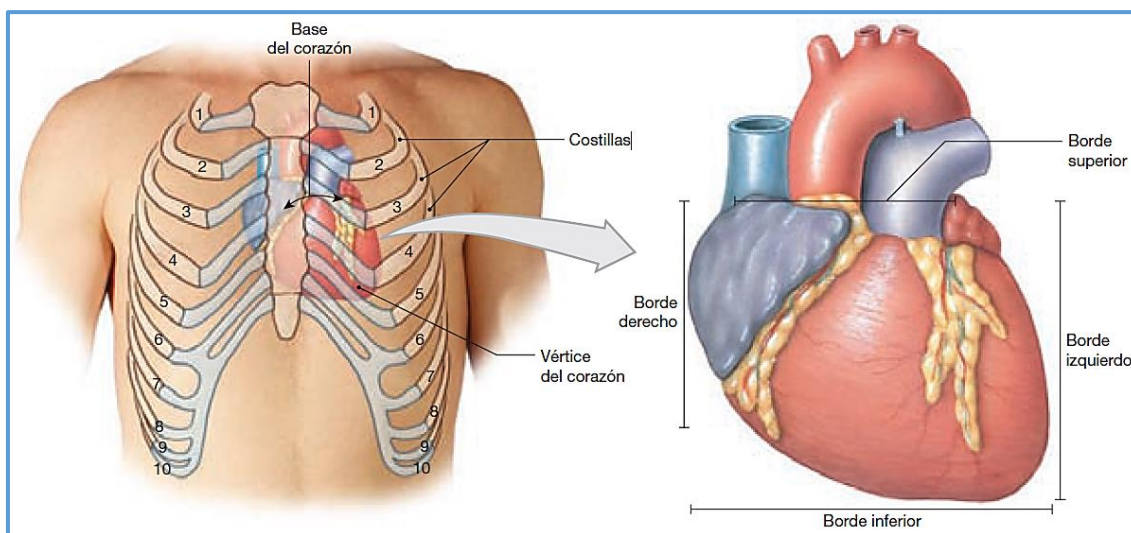


Figura 12, Posición y orientación del corazón La localización del corazón dentro de la cavidad torácica y bordes cardíacos.

Orientación y anatomía superficial del corazón

1. El corazón se encuentra ligeramente a la izquierda de la línea media: el corazón se localiza en el mediastino, entre los dos pulmones. Como está situado ligeramente a la izquierda de la línea media, la muesca en la superficie medial del pulmón izquierdo es considerablemente más profunda que la muesca correspondiente en la superficie medial del pulmón derecho. La base es la parte superior

más ancha del corazón, donde este se une a las principales arterias y venas de los circuitos sistémico y pulmonar. La base del corazón incluye tanto los orígenes de los vasos principales como las superficies superiores de las dos aurículas. En términos de nuestra analogía con el globo, la base se correspondería con la muñeca. La base se sitúa posterior al esternón a nivel del tercer cartílago costal, con el centro a unos 1,2 cm hacia el lado izquierdo. El vértice es la punta inferior redondeada del corazón, el cual apunta lateralmente con un ángulo oblicuo. Un corazón adulto típico mide aproximadamente 12,5 cm desde su base fija hasta el vértice. El vértice alcanza el quinto espacio intercostal aproximadamente 7,5 cm a la izquierda de la línea media.

2. El corazón forma un ángulo oblicuo con el eje longitudinal del cuerpo: la base forma el borde superior del corazón. El borde derecho del corazón está formado por la aurícula derecha; el borde izquierdo está formado por el ventrículo izquierdo y por una pequeña parte de la aurícula izquierda. El borde izquierdo se extiende hasta el vértice, donde confluye con el borde inferior. El borde inferior está formado principalmente por la pared inferior del ventrículo derecho.

3. El corazón está ligeramente rotado hacia la izquierda: Como resultado de esta rotación, su superficie anterior, o superficie esternocostal la forman principalmente la aurícula derecha y el ventrículo derecho. Las paredes posterior e inferior del ventrículo izquierdo forman gran parte de la superficie inclinada posterior, o cara diafragmática, la cual se extiende entre la base y el vértice del corazón.

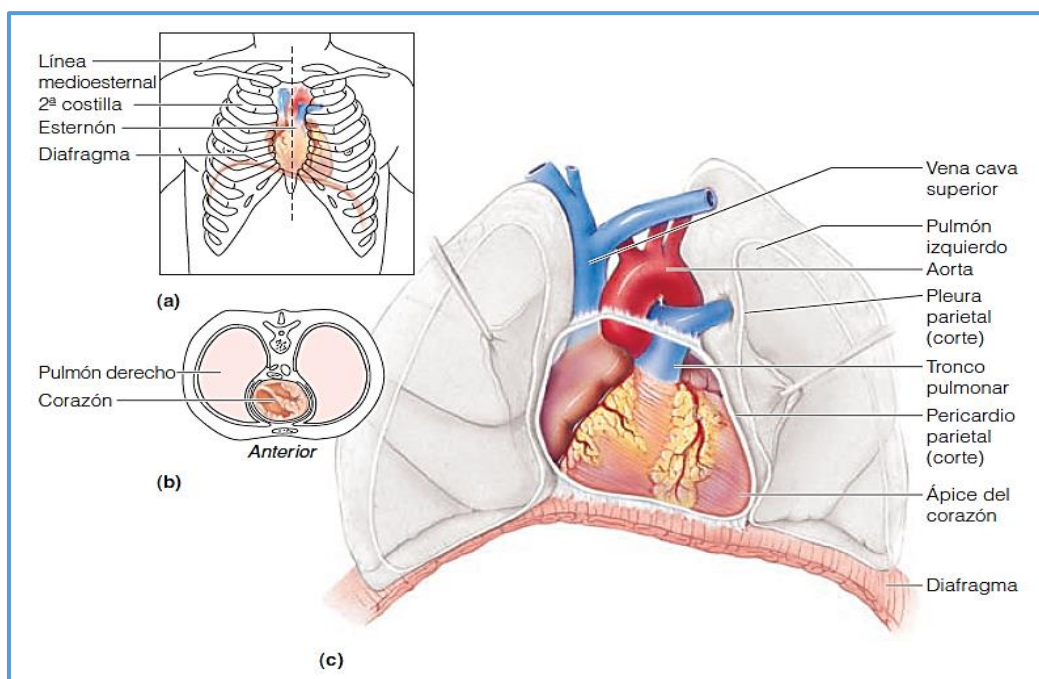


Figura 13, Ubicación del corazón en el tórax. (a) Relación del corazón con el esternón y las costillas. (b) Vista transversal que revela la posición relativa del corazón en el tórax. (c) Relación del corazón y de los grandes vasos con los pulmones.

El borde inferior del corazón, que forma una punta redondeada llamada ápex, descansa sobre el diafragma, dirigido hacia la izquierda. Para contar el latido apical, hay que situar el fonendoscopio directamente sobre la punta, es decir, en el espacio que queda entre la quinta y la sexta costillas (quinto espacio intercostal), en línea con el punto medio de la clavícula izquierda. El borde superior del corazón, es decir, su base, se encuentra inmediatamente por debajo de la segunda costilla.

Estructura de la pared cardíaca

El pericardio: El corazón está encerrado en un saco de doble pared que se denomina pericardio. La pared externa, el saco pericárdico (pericardio parietal), tiene una capa fibrosa superficial, dura, de tejido conjuntivo irregular y denso, y una capa serosa, profunda y delgada, la cual se vuelve hacia dentro en la base del corazón y forma el pericardio visceral, equivalente al epicardio, que se describe un poco más adelante como parte de la pared cardíaca. El saco pericárdico está anclado por ligamentos al diafragma, que se encuentra debajo, y al esternón, que es anterior a él; está anclado de manera más laxa por tejido conjuntivo fibroso al tejido mediastinal, posterior al corazón. A su vez, el pericardio aísla al corazón de otros órganos torácicos y le da espacio para expandirse, pero resiste la expansión excesiva.

Entre las membranas parietal y visceral se encuentra un espacio denominado cavidad pericárdica, el cual contiene entre 5 a 30 ml de **líquido pericárdico**, exudado por la capa serosa del saco pericárdico. El líquido lubrica las membranas y permite que el corazón lata con fricción mínima. En la pericarditis (inflamación del pericardio), las membranas se vuelven rugosas y producen un roce con cada latido.

La pared cardíaca

La pared cardíaca consta de tres capas: epicardio, miocardio y endocardio.

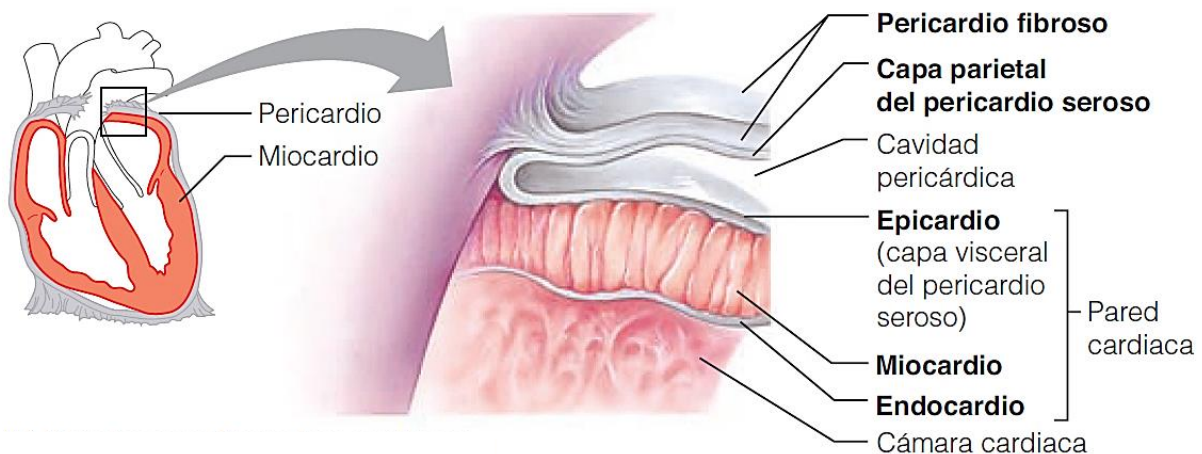


Figura 14, Pared y revestimientos cardíacos.

El **epicardio** (pericardio visceral) es una membrana serosa de la superficie cardíaca externa. Consta sobre todo de un epitelio pavimentoso simple sobre una capa delgada de tejido alveolar. En algunos lugares, también incluye una capa gruesa de tejido adiposo, mientras que en otras áreas se encuentra libre de grasa y es transparente, de tal manera que se observa el músculo del miocardio subyacente. Las ramas más grandes de los vasos sanguíneos coronarios viajan a través del epicardio.

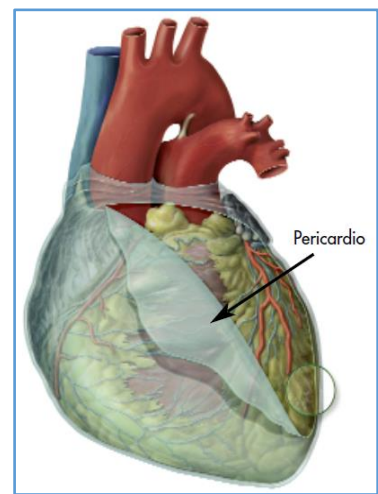


Figura 15, Pericardio

El **endocardio**, una capa similar, recubre el interior de las cámaras del corazón. Al igual que el epicardio, se trata de un epitelio pavimentoso simple sobre un tejido areolar delgado; sin embargo, no tiene tejido adiposo. El endocardio cubre las superficies de las válvulas y continúa con el endocardio de los vasos sanguíneos.

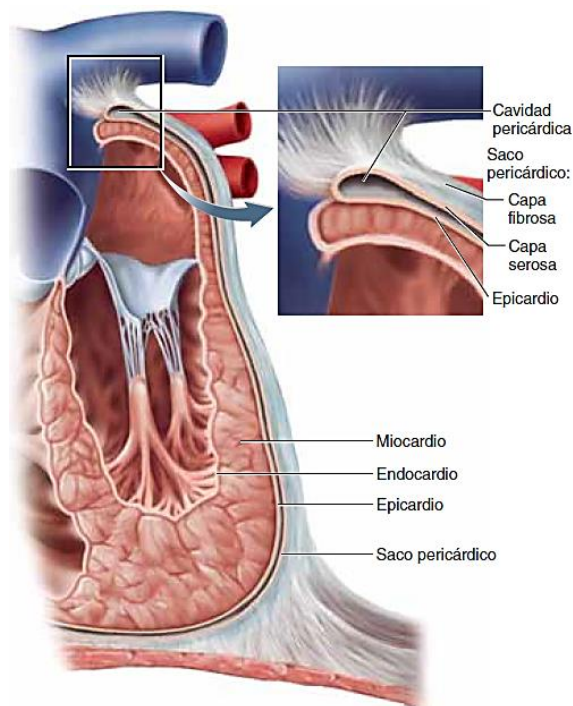


Figura 16, Pericardio y pared cardíaca. En el recuadro se muestran las capas de la pared cardíaca en relación con el pericardio.

aurículas (atrium, «cámara») derecha e izquierda; se trata de cámaras de pared delgada que reciben la sangre que regresa al corazón por las grandes venas. La mayor parte de la masa de cada aurícula se encuentra en el lado posterior del corazón, de modo que sólo una parte pequeña es visible desde una vista anterior. Aquí cada aurícula tiene una pequeña extensión parecida a una oreja, denominada orejuela, que aumenta un poco su volumen.

El **miocardio**, que se encuentra entre estos dos, consta de músculo cardíaco. Es, por mucho, la capa más gruesa y realiza el trabajo del corazón; además, su grosor es proporcional a su carga de trabajo en las cámaras individuales, mientras que su músculo se enrolla en espiral alrededor del corazón y forma un vórtice miocárdico; así, cuando los ventrículos se contraen muestran un movimiento de doblez o arrugamiento que mejora la eyección de sangre. Más adelante se examina de manera más detallada la estructura microscópica de las células de músculo cardíaco o cardiocitos.

Las cámaras cardíacas

El corazón tiene cuatro cámaras, que se ven mejor en un corte frontal. Las dos cámaras superiores son las

Las dos cámaras inferiores, los **ventrículos** («vientres pequeños») derecho e izquierdo, son las bombas que eyectan la sangre en las arterias y la mantienen en circulación alrededor de todo el cuerpo. El ventrículo derecho constituye la mayoría del aspecto anterior del corazón, mientras que el izquierdo forma el **ápice** y el aspecto inferoposterior.

En la superficie, los límites de las cuatro cámaras están marcados por tres surcos, que se encuentran llenos en gran medida con grasa y los vasos sanguíneos coronarios.

Nota: *Las paredes del ventrículo izquierdo son las más espesas; esa cámara bombea la sangre a todo el organismo y de vuelta hasta el corazón; el ventrículo derecho realiza un circuito corto a través de los pulmones y de vuelta al corazón, por lo que no requiere tanto tejido muscular*

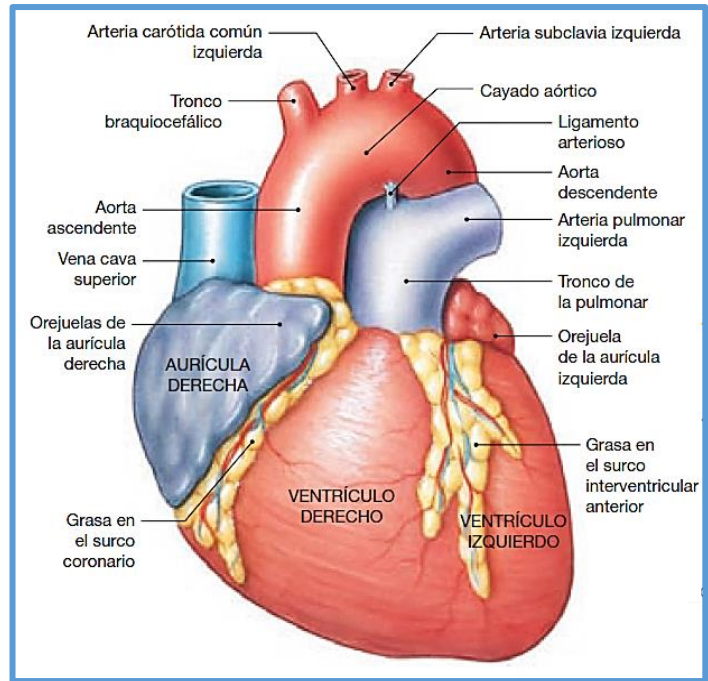


Figura 17, Vista anterior del corazón y los grandes vasos.

El **surco coronario (auriculoventricular)**

rodea al corazón muy cerca de la base y separa a las aurículas de arriba y los ventrículos de abajo; además, puede exponerse al levantar los márgenes de la aurícula. Los otros dos surcos se extienden en sentido oblicuo hacia abajo del corazón, del surco coronario hacia el ápice (el que está al frente del corazón es el surco interventricular anterior y el de la parte de atrás es el posterior).

Estos surcos se superponen a una pared interna, el **tabique interventricular**, que divide el ventrículo derecho del izquierdo. El surco coronario y los dos surcos interventriculares albergan a los vasos sanguíneos coronarios más grandes.

Las aurículas muestran paredes flácidas y delgadas que corresponden a su carga de trabajo ligera; todo lo que hacen es bombear sangre hacia el ventrículo de abajo. Están separadas entre sí por una pared, el **tabique interauricular**. La aurícula derecha y ambas orejuelas muestran bordes internos de miocardio denominados músculos pectíneos.

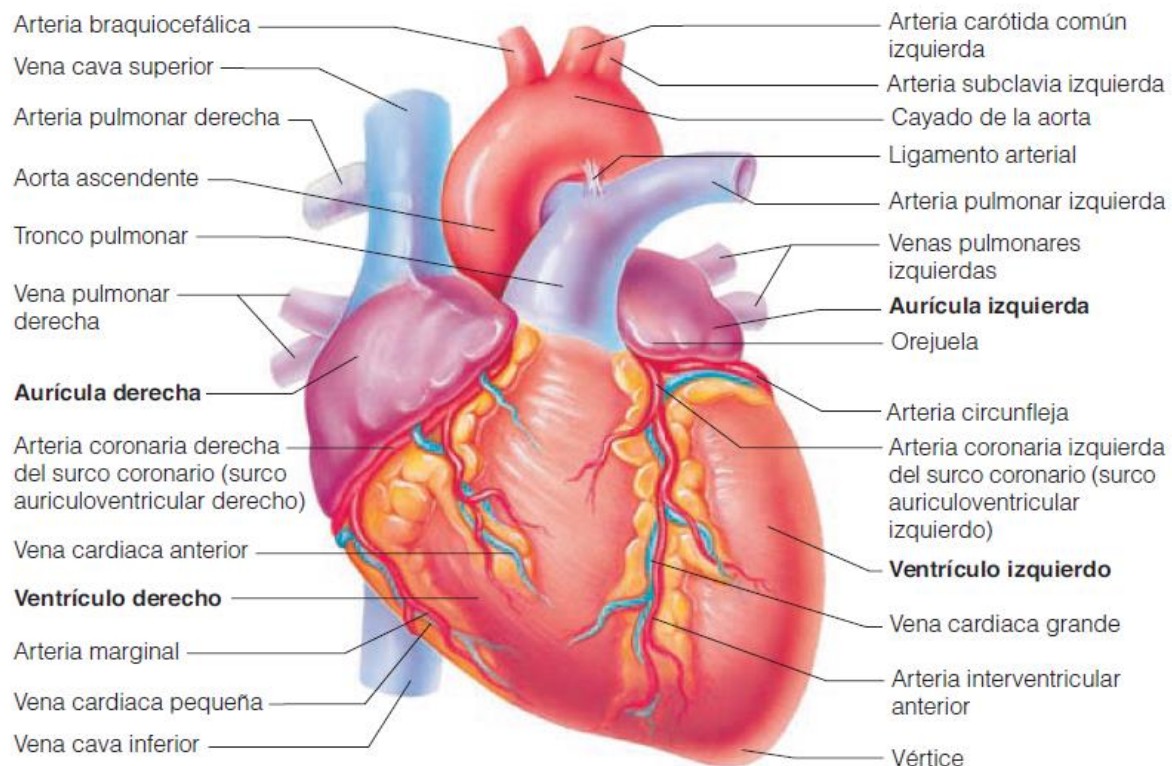


Figura 18, Anatomía general del corazón. Vista superficial anterior.

El **tabique interventricular** es una pared vertical, mucho más muscular, entre los ventrículos. El ventrículo derecho sólo bombea sangre a los pulmones y de regreso a la aurícula izquierda, de modo que su pared sólo es un poco muscular. A su vez, la pared del ventrículo izquierdo es de dos a cuatro veces más gruesa porque soporta la mayor cantidad de carga de trabajo de las cuatro cámaras, al bombear sangre a todo el cuerpo. Ambos ventrículos muestran bordes internos llamados **trabécula carnosa**.

Estructura y funcionamiento de las válvulas cardíacas

Para bombear sangre de manera efectiva, el corazón necesita válvulas que aseguren el flujo en un sentido. Hay una válvula entre cada aurícula y su ventrículo y otra en la salida de cada ventrículo hacia su gran arteria, pero el corazón no tiene válvulas donde las grandes venas se vacían en las aurículas. Cada válvula consta de dos o tres colgajos fibrosos de tejido, denominados **valvas**, que se analizan junto con el endocardio.

Las válvulas auriculoventriculares (AV) regulan las aberturas entre las aurículas y los ventrículos. **La válvula AV derecha (tricúspide)** tiene tres valvas (cúspides) y **la AV izquierda (bicúspide)** dos. La válvula AV izquierda también se conoce como válvula mitral, por su parecido con las mitras llevadas por los obispos en la cabeza. Las cuerdas tendinosas, que parecen las líneas que cubren

un paracaídas, conectan a las valvas de las válvulas con los **músculos papilares** cónicos en el piso del ventrículo. Evitan que las válvulas AV se volteen hacia fuera o protruyan en la aurícula cuando los ventrículos se contraen.

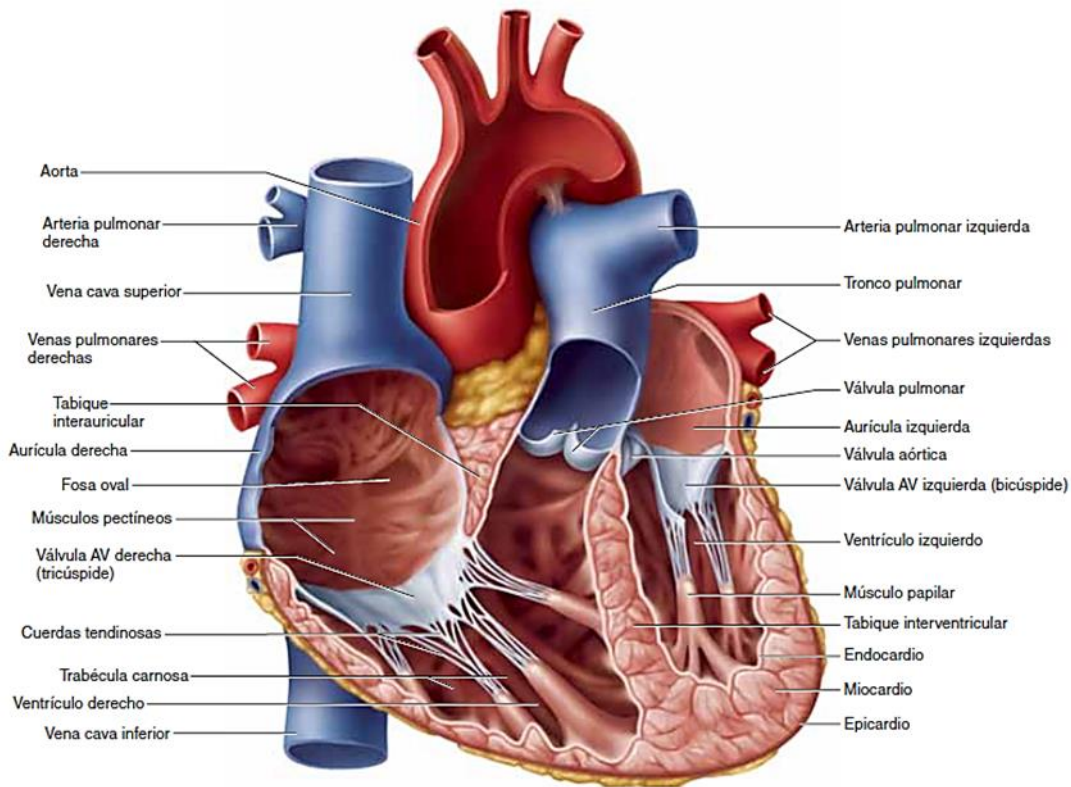


Figura 19, Sección frontal que muestra las cámaras y válvulas interiores.

Las **válvulas semilunares (pulmonar y aórtica)** están formadas por valvas con forma de media luna que sobresalen del revestimiento de la arteria pulmonar y de la aorta. regulan el flujo de sangre de los ventrículos hacia las grandes arterias. La válvula pulmonar controla la abertura del ventrículo derecho en el tronco pulmonar, mientras que la válvula aórtica regula la del ventrículo izquierdo en la aorta. Cada una tiene tres valvas formadas como bolsillos de camisa, las cuales no tienen cuerdas tendinosas.

Las válvulas no se abren y cierran por algún esfuerzo muscular propio, sino que se les fuerza a abrirse o cerrarse sólo por los

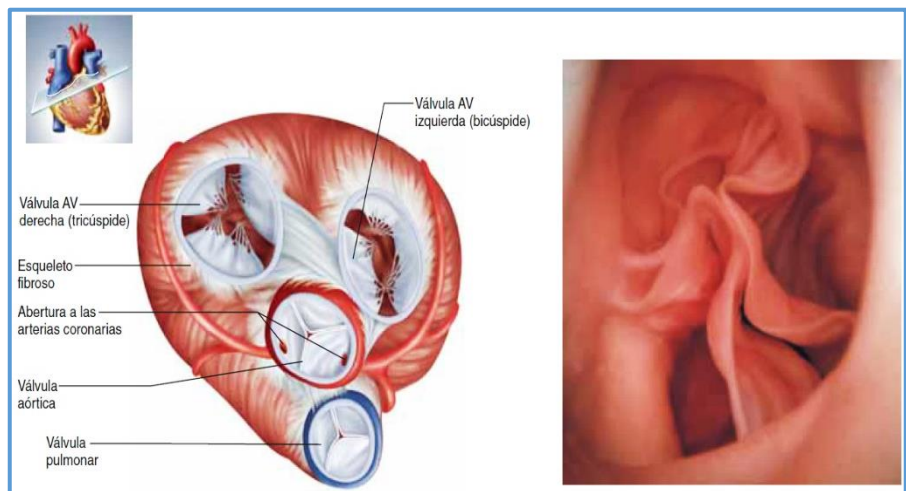


Figura 20, Estructura de las válvulas cardíacas

cambios en la presión sanguínea que ocurren a medida que las cámaras cardiacas se contraen y relajan.

El flujo de sangre por las cámaras

La sangre que ha recorrido el circuito sistémico regresa por las **venas cavas superior e inferior** hacia la aurícula derecha, a la vez que fluye de manera directa desde la aurícula derecha, a través de la válvula AV derecha (tricúspide), hacia el ventrículo derecho. Cuando éste se contrae, eyecta sangre a través de la válvula pulmonar hacia el **tronco pulmonar** en su camino a los pulmones para intercambiar dióxido de carbono por oxígeno.

La sangre regresa de los pulmones por **dos de las venas pulmonares de la izquierda y dos de la derecha** y las cuatro se vacían en la aurícula izquierda. La sangre fluye por la válvula AV izquierda (bicúspide y mitral) hacia el ventrículo izquierdo. La contracción de éste eyecta dicha sangre por la válvula aórtica hacia la **aorta ascendente**, en su camino a otro viaje por el circuito sistémico.

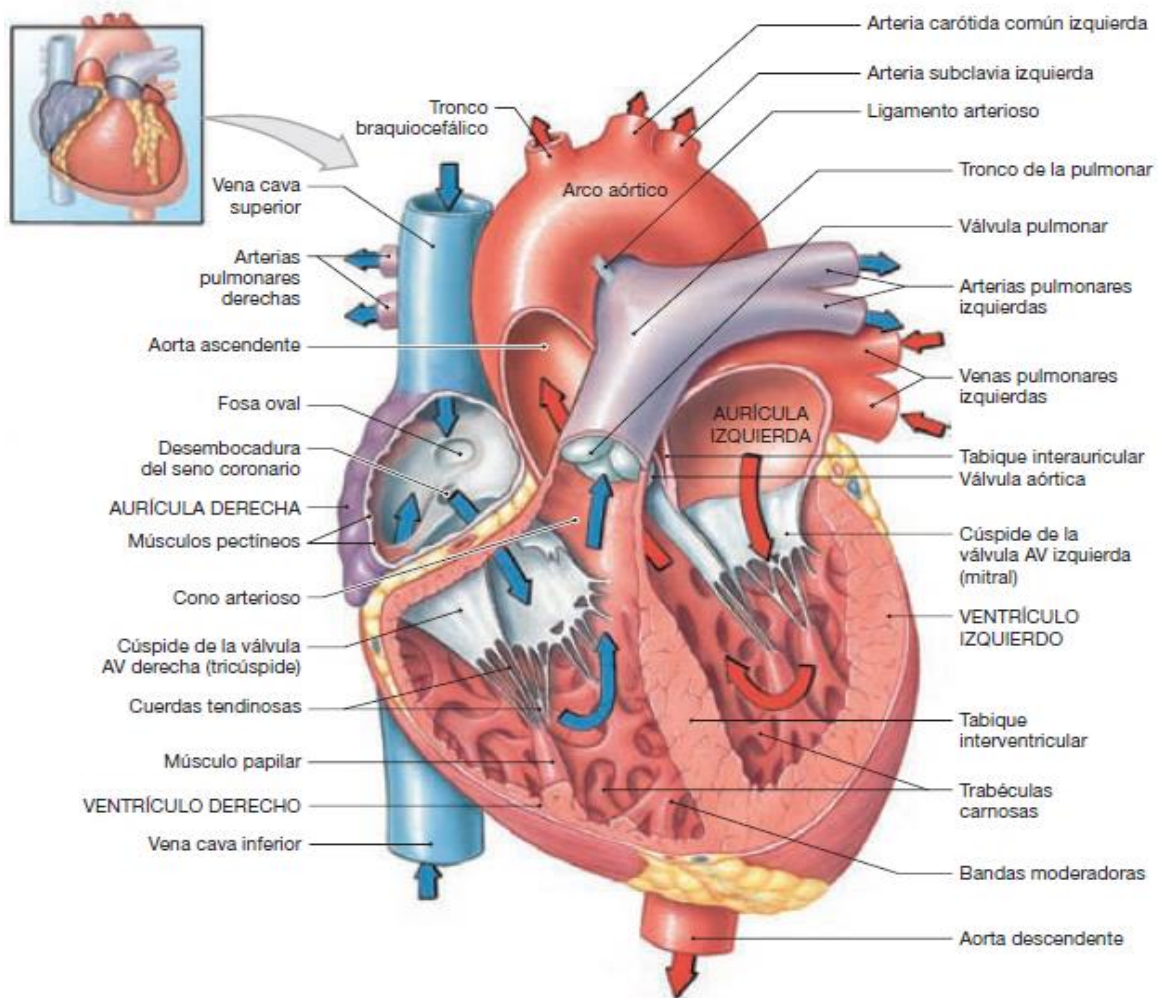


Figura 21, Diagrama de una sección frontal a través del corazón en relajación, en el que se demuestran las principales referencias y el camino del flujo sanguíneo a través de las aurículas y los ventrículos (flechas).

Vasos sanguíneos y linfáticos

Introducción

A fin de que el corazón lleve la sangre a los tejidos se precisa de un mecanismo para distribuir en ellos oxígeno, nutrientes, hormonas y otras moléculas de importancia fisiológica, así como también para recoger de ellos dióxido de carbono y los productos metabólicos de desecho que deben transportarse a los órganos de excreción para su eliminación.

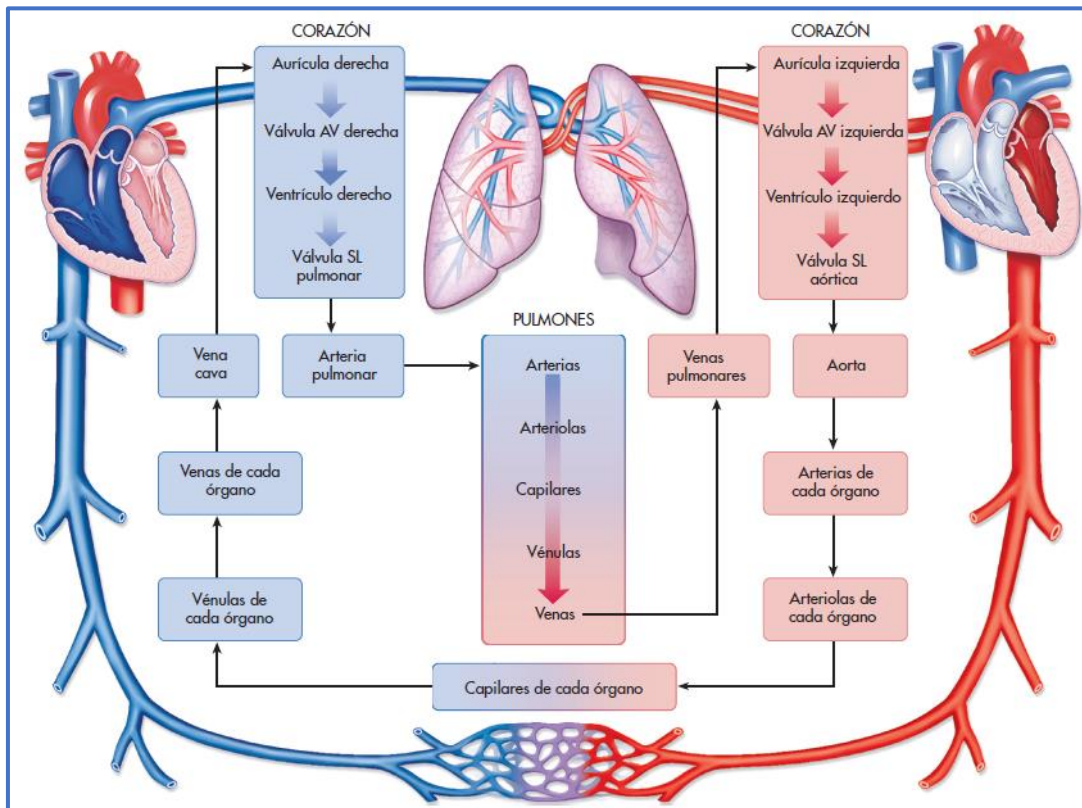


Figura 22, Las circulaciones sistémica y pulmonar. El lado derecho del corazón es la bomba sistémica; el lado izquierdo es la bomba del circuito pulmonar.

El sistema cardiovascular tiene como objetivo transportar la sangre en ambas direcciones entre el corazón y los tejidos. El sistema linfático colecta la linfa de los tejidos y la incorpora al sistema cardiovascular. En este capítulo se revisa la estructura de los vasos sanguíneos y linfáticos así como sus diferentes variantes.

Estructura de los vasos sanguíneos

Aunque existen diferencias entre los distintos tipos de vasos sanguíneos, la mayoría tiene una estructura similar. La pared de las arterias y venas está constituida por tres capas concéntricas llamadas tunicas: la íntima, la media y la adventicia.

Túnica íntima

La capa más interna de los vasos sanguíneos está integrada por un epitelio plano simple (endotelio), con su eje mayor orientado en forma longitudinal, y por una capa subendotelial compuesta por tejido conjuntivo laxo y unas cuantas células de músculo liso orientadas en sentido longitudinal. Debajo se encuentra la lámina elástica, especialmente bien desarrollada en las arterias musculares, que separa a la túnica íntima de la túnica media y está conformada por fibras elásticas.

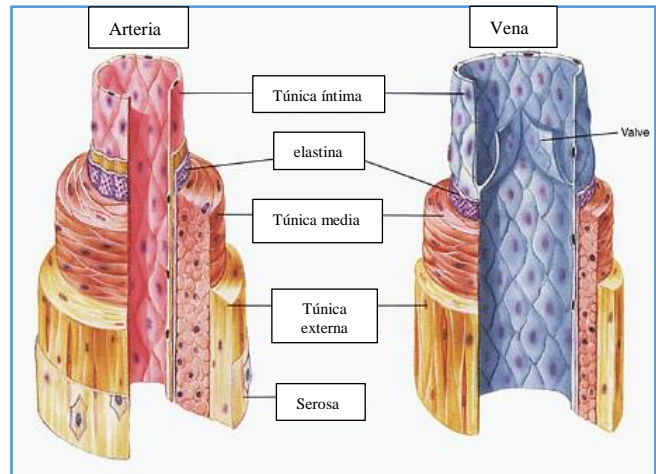


Figura 23, Capas que conforman los vasos sanguíneos

Túnica media

La túnica media está formada por células musculares lisas dispuestas de manera circular. Intercaladas entre las capas del músculo liso se encuentran algunas fibras elásticas, fibras de colágena de tipo III y proteoglucanos. En las arterias musculares está bien desarrollada una lámina elástica externa que separa a la túnica media de la adventicia. Los capilares y las vénulas carecen de túnica media; en estos vasos pequeños los pericitos reemplazan a la túnica media.

Adventicia

La capa más externa de los vasos está integrada por fibroblastos y fibras de colágena adjuntas de tipo I, orientadas en su mayor parte en sentido longitudinal. Esta capa continúa con los elementos de tejido conjuntivo que rodean a los vasos sanguíneos.

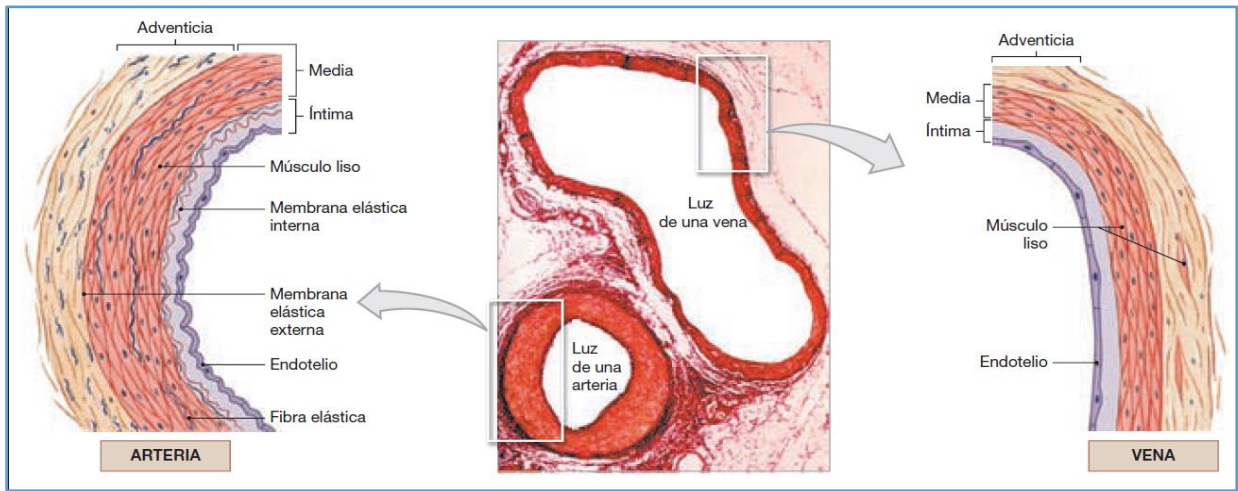
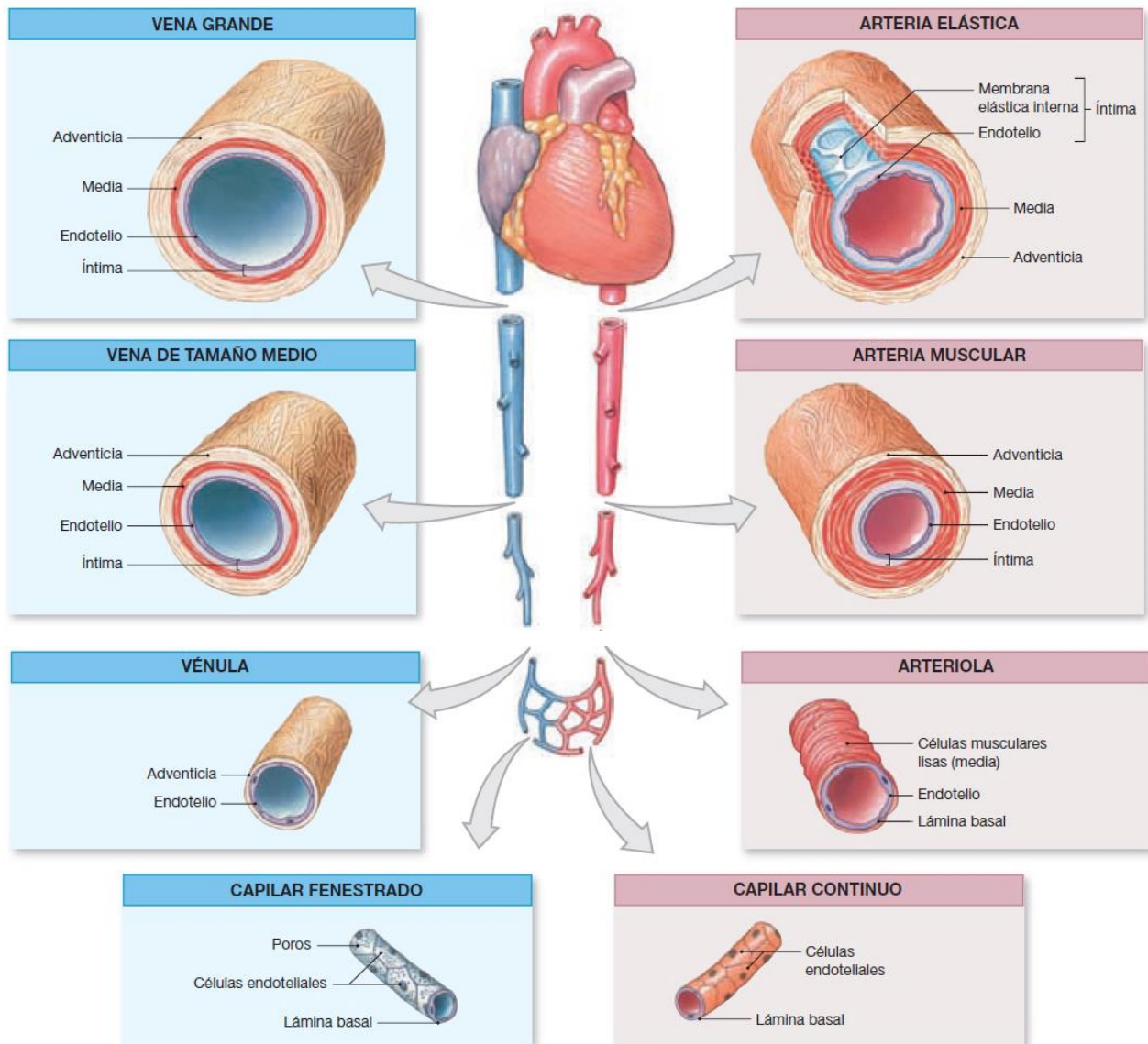


Figura 24, Comparación histológica de las arterias y venas típicas (Microfotografía a la luz de una arteria y vena (MO 60)).

Figura 25, Estructura histológica de los vasos sanguíneos



estas arterias se encuentran los cuerpos de Weibel-Palade, que corresponden a inclusiones fijas en la membrana (0.1 μm de ancho y 3 μm de largo) con una matriz densa formada por elementos tubulares que contienen una glucoproteína (el factor de von Willebrand). Casi todas las células endoteliales elaboran este factor que facilita la agregación de las plaquetas durante la formación del coágulo, pero que se almacena solamente en las arterias. La túnica adventicia es más o menos delgada y contiene vasos sanguíneos, que después se capilarizan para proporcionar el aporte sanguíneo a las túnicas media y adventicia.

Su capa media se identifica por una gran cantidad de fibras elásticas que se conocen también como membranas fenestradas —de 40 a 60 láminas— y algunas fibras musculares lisas. La cantidad de fibras elásticas aumenta con la edad.

Su íntima es delgada y está constituida por tejido conjuntivo fibroelástico y algunos fibroblastos. Tiene una gran cantidad de vasos y nervios que se extienden hacia la túnica media.

Arterias musculares

La mayoría de estas arterias tienen su origen en la aorta, con excepción de los troncos mayores y la bifurcación final de la aorta abdominal. Las arterias humeral, femoral, radial, poplítea y sus ramas pertenecen a este grupo de vasos. Su grosor nunca rebasa los 0.5 mm de diámetro. La túnica íntima es más delgada que en el caso de las arterias elásticas y la lámina elástica interna está muy desarrollada. Por otro lado, el rasgo distintivo de este grupo de vasos es la túnica media relativamente gruesa, compuesta por fibras de músculo liso dispuestas en su mayor parte de manera circular. También es factible reconocer una lámina elástica externa prominente. La túnica adventicia posee fibras elásticas y de colágena, así como proteoglucanos del tipo del sulfato de dermatán y sulfato de heparán.

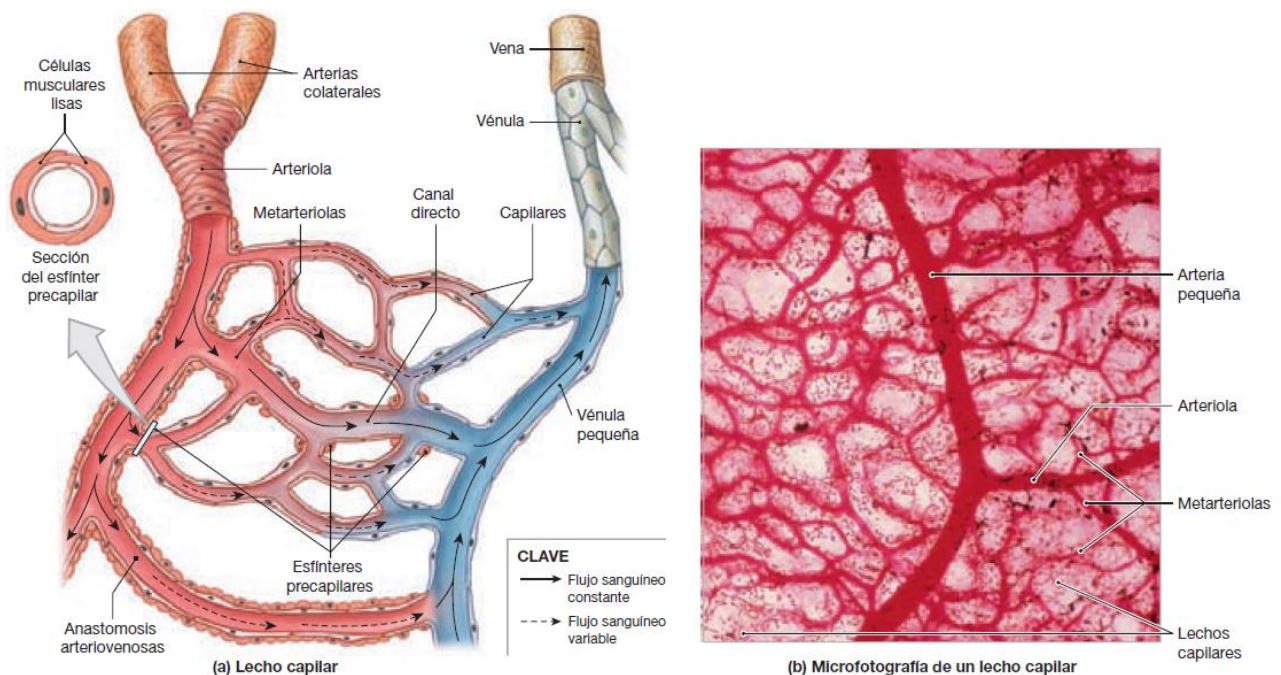


Figura 26, Organización del lecho capilar (a) Organización básica del lecho capilar típico. El patrón de flujo sanguíneo cambia continuamente en respuesta a variaciones regionales de las demandas tisulares de oxígeno. (b) El lecho capilar como se ve en un tejido vivo.

Arteriolas

Las arterias que tienen un diámetro menor de 0.1 mm se les considera arteriolas; estos vasos tienen una íntima delgada y una media en la que no existen láminas elásticas interna y externa; la media está constituida por sólo 2 o 3 capas de células musculares. La adventicia es muy delgada y la

conforma tejido conjuntivo fibroelástico que alberga a unos cuantos fibroblastos. Las arteriolas no presentan lámina elástica externa.

Metaarteriolas

Se llama así a las arterias que llevan sangre hacia los capilares. Se distinguen de las arteriolas porque su capa mediana es continua. Las fibras musculares rodean a las células endoteliales formando lo que semeja un esfínter y regula el flujo sanguíneo hacia los capilares.

Capilares

Los capilares se originan en los extremos terminales de las arteriolas. Los capilares son vasos cortos (50 μm de largo) y su diámetro varía entre 8 y 10 μm . Su pared está formada por células endoteliales muy aplanadas, con su lámina basal apoyada en una red escasa de fibras reticulares. Tienen filamentos intermedios y se identifican capilares en los cuales se reconoce vimentina, en otros desmina y en algunos más ambos filamentos. Diseminadas por el exterior, pero rodeadas por la lámina basal, se hallan las células llamadas pericitos que pueden contraerse y regular así el flujo sanguíneo por el lecho capilar.

De acuerdo con la estructura identificada por ultraestructura, los capilares pueden clasificarse en tres tipos: continuos, fenestrados y sinusoides.

Capilares continuos

Este tipo de vasos se localiza en el músculo, el cerebro, el pulmón y el tejido conjuntivo. Carecen de interrupciones en sus paredes. Las células endoteliales tienen uniones entre sí del tipo fascia occludens. Por ellos se transportan aminoácidos, glucosa, entre otros; pueden presentar polaridad y esto limita la presencia de ciertos receptores a la cara interna de las células endoteliales.

Capilares fenestrados

Tienen poros o fenestras en sus paredes, de 60 a 80 nm de diámetro, y los poros están delimitados por un diafragma. Estos capilares se encuentran en páncreas, intestinos y glándulas endocrinas. Los capilares glomerulares pertenecen a esta variante pero carecen de diafragma.

Capilares sinusoides

Se llaman así porque tienen una luz irregular y muy ancha. Aparecen en órganos como el bazo, médula ósea e hígado. Tienen un diámetro de 30 a 40 μm y contienen muchas fenestras grandes que carecen de diafragma; las células endoteliales pueden observarse discontinuas en el caso de

las glándulas endocrinas, pero en el caso de los órganos linfoides, continuas. Estas células endoteliales carecen de vesículas pinocíticas y cercanas a las fenestras se observan macrófagos.

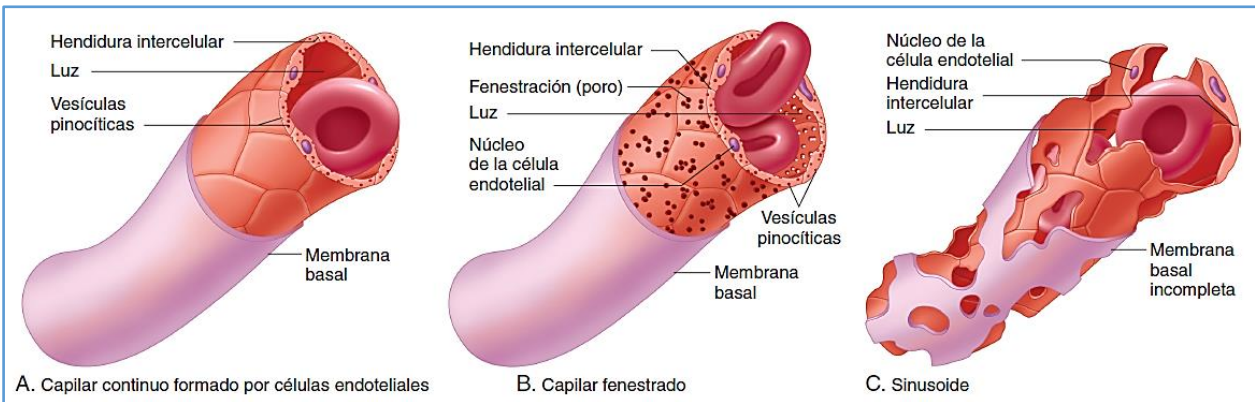


Figura 27, Los capilares pueden clasificarse en tres tipos: a) continuos, b) fenestrados y c) sinusoides.

Pericitos

Se les ubica en los capilares y en las pequeñas vénulas. Se ubican rodeando a las células endoteliales y comparten con ellas su lámina basal. En el citoplasma se identifican tropomiosina e isomiosina, proteínas que les permiten contraerse. Si sufren daño los capilares, estas células pueden transformarse en células musculares lisas o en células endoteliales. Se ha reportado que el pericito llega a interferir con el crecimiento endotelial, así como su migración.

Células endoteliales

Además de cubrir por completo la superficie de los vasos sanguíneos, estas células desempeñan una función muy importante en el intercambio de nutrientes. Otras de sus funciones importantes son:

- Activación de sustancias, como la conversión de la angiotensina I a II.
- Inactivación de bradicinina, serotonina, noradrenalina en moléculas no activas.
- Lipólisis, degradando las lipoproteínas en triglicéridos y colesterol.
- Producción de sustancias vasoactivas como óxido nítrico, endotelinas.
- Función antitrombogénica, como la prostaciclina que inhibe la agregación plaquetaria; activadores de plasminógeno favoreciendo la degradación de la fibrina; factores parecidos a la heparina, entre otros.

Venas

En las terminaciones de descarga de los capilares se encuentran vénulas pequeñas que representan el inicio del retorno venoso y que conducen la sangre de los órganos y tejidos rumbo al corazón. Las venas superan a las arterias en número y por lo general tienen una luz más ancha, razón por la cual 70% del volumen sanguíneo total se encuentra en ellas. En los cortes histológicos las venas tienen

casi siempre una pared más delgada, su lámina elástica interna está muy mal definida y la luz es más irregular que la de las arterias. Se clasifican de acuerdo con su tamaño, en pequeñas, medianas y grandes.

Tabla 1, Sección de vasos sanguíneos y sus funciones					
Segmento vascular	Función	Diámetro	Área transversal vascular (cm ²)	%Gasto cardiaco	
Aorta	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elástica ✓ Función de bomba secundaria 	25 mm	4.9	11%	
Arterias de grande y mediano calibre (vasos de conducción)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Distribución de la sangre ✓ Vasos en serie 	4 mm	40		
Arterias de pequeño calibre (arterias musculares)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resistencia y fricción ✓ Mayor caída de presión ✓ Cambio de flujo pulsátil → continuo (amortiguación) 	30 µm	55		
Capilares	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor área de superficie transversal ✓ Intercambio de sustancias 	8 a 12 µm	1 350		5%
Vénulas y venas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacitancia ✓ Retorno venoso 	20 µm - 4 mm	750		66%
Vasos pulmonares	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ↓ Resistencia vascular 	30 mm			12%
El 7% del gasto cardiaco restante se localiza en el corazón					

Vénulas y venas pequeñas

Las vénulas poscapilares miden de 15 a 20 µm de diámetro. Se considera que hasta un diámetro de 50 µm, las vénulas tienen una estructura muy parecida a la de los capilares. Su pared está rodeada por los pericitos, los cuales de manera paulatina son sustituidos por células musculares lisas en las vénulas de mayor tamaño; esto va ocurriendo hasta formar una capa continua en todas las vénulas. En los órganos linfoides existe un tipo particular de vénulas que poseen un endotelio cúbico y reciben el nombre de vénulas poscapilares de endotelio alto.

Durante el proceso inflamatorio la salida de leucocitos hacia el sitio afectado ocurre en las vénulas poscapilares. Es en este sitio en el que actúan la histamina y la serotonina, favoreciendo la salida de líquido al espacio extravascular.

Venas medianas

Miden menos de 1 cm de diámetro y son las que drenan la mayor parte de las estructuras corporales. En la túnica íntima se ubican el endotelio y la membrana basal que se acompañan de fibras reticulares. En ocasiones existe una red elástica que rodea al endotelio, aunque estas fibras elásticas no forman láminas. Las células del músculo liso de la túnica media se hallan en una capa

laxamente organizada, entretrejida con fibras de colágena y fibroblastos. La túnica adventicia está compuesta por haces de colágena y fibras elásticas en sentido longitudinal y es la más gruesa.

Venas grandes

Se incluyen en esta categoría a las venas cavas, las pulmonares y la porta, entre otras. El endotelio cuenta con una capa subendotelial de tejido conjuntivo más gruesa que las venas medianas. Las túnicas media y adventicia se engruesan más, pero nunca llegan a tener el calibre de las arterias. Con excepción de las venas pulmonares - en las que sí se identifica una capa media con fibras musculares lisas - la mayoría de las venas grandes carecen de esta estructura, sin embargo, tienen una túnica adventicia bien desarrollada.

Otra excepción corresponde a las venas superficiales de las piernas, las cuales cuentan con una pared muscular bien definida, posiblemente como ayuda para vencer la resistencia de la gravedad. La adventicia de estas venas es muy rica en fibras elásticas, colágena y vasa vasorum.

Válvulas de las venas

Una característica de las venas medianas es la presencia de válvulas cuya función es prevenir el flujo retrógrado de la sangre. Estas válvulas son especialmente abundantes en las venas de las piernas, en las que actúan contra la fuerza de gravedad. Las válvulas venosas están formadas por plegamientos delgados de la íntima que protruyen hacia la luz de las venas. La capa subendotelial se encuentra reforzada por fibras elásticas y de colágena, que continúan en las de la pared. Como las valvas están orientadas en el sentido del flujo sanguíneo, el flujo retrógrado aproxima las valvas, de manera que el flujo en reversa se bloquea.

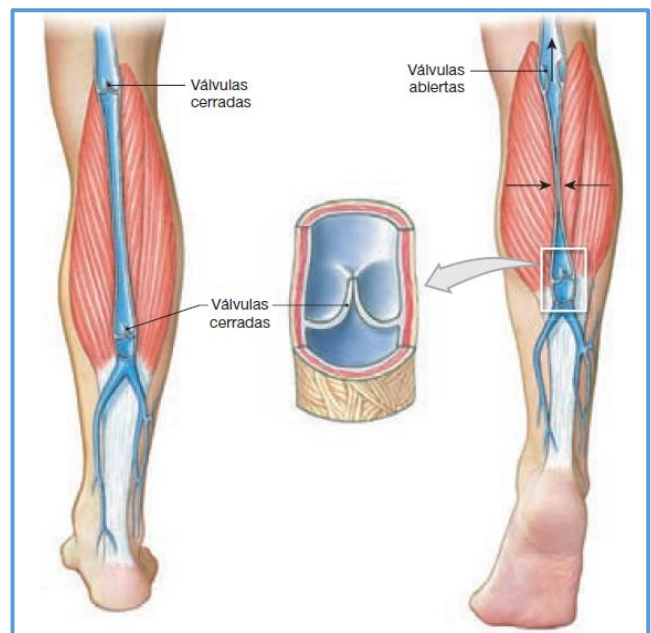


Figura 28, Función de las válvulas en el sistema venoso

Nota: Las válvulas en la pared de las venas de tamaño medio evitan el retroceso de la sangre. La compresión de las venas producida por la contracción de los músculos estriados adyacentes crea una presión (mostrada por las flechas) que ayuda a mantener el flujo sanguíneo venoso. Los cambios en la posición del cuerpo y la bomba toracoabdominal pueden proporcionar una ayuda adicional.

Vasos linfáticos

Todo sistema suele tener fallas y para evitar estancamientos, además de los vasos sanguíneos y su bomba central (el corazón), existe un sistema que ayuda al regreso del líquido que se queda en el espacio intersticial hacia el sistema circulatorio, a saber, el sistema linfático. Este sistema de drenaje cuyos vasos más pequeños —los capilares linfáticos— terminan en extremos ciegos, conducen un líquido claro —la linfa— desde los espacios extravasculares periféricos a través de vasos linfáticos cada vez de mayor calibre.

Al final del trayecto convergen en conductos linfáticos de mayor calibre que desembocan en las grandes venas de la base del cuello (yugular interna y subclavia). Existen linfáticos en todos los tejidos, con excepción del sistema nervioso central, cartílago, hueso, médula ósea, timo, dientes y placenta. La linfa está compuesta por agua, electrolitos y de 2 a 4% de proteínas.

Las paredes de los capilares sanguíneos son menos permeables a las proteínas plasmáticas que al agua y los electrolitos, lo cual determina que las proteínas mantengan una presión osmótica coloidal significativa en la sangre. En los extremos arteriales de los capilares, en donde la

presión hidrostática supera a la presión osmótica coloidal de la sangre, el agua, los solutos y algunas proteínas atraviesan las paredes de los capilares. En los extremos venosos, la presión hidrostática es inferior y la presión osmótica coloidal tiende a conducir el agua, los electrolitos y los productos del catabolismo tisular de regreso al torrente sanguíneo. Sin embargo, parte de los líquidos y una proporción mayoritaria de las proteínas plasmáticas que han salido de la sangre no vuelven a ella de manera directa, sino que son drenados por la linfa y devueltos a la sangre a través del sistema vascular linfático. Se establece así un sutil equilibrio que mantiene constante el volumen del líquido extracelular y que devuelve a la sangre la pequeña cantidad de proteínas plasmáticas que escapa en forma continua a través de los capilares sanguíneos.

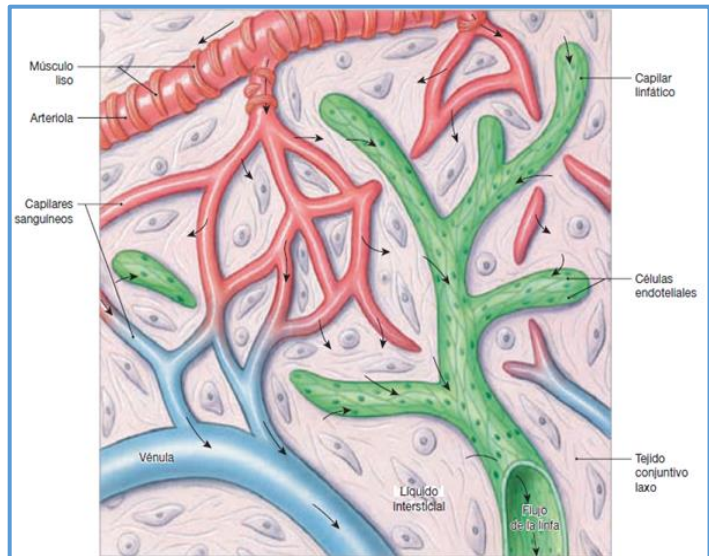


Figura 29, Asociación entre capilares sanguíneos, tejidos y capilares linfáticos

Conductos linfáticos

Semejan en su estructura a las venas de mayor calibre y son la etapa final del sistema de vasos linfáticos. El conducto linfático derecho es corto y vacía su contenido en la unión de la vena yugular

interna y la subclavia derechas, asimismo, colecta la linfa del cuadrante superior derecho del cuerpo. El conducto torácico, que es más grande, inicia en el abdomen en la cisterna del quilo, asciende por el tórax y el cuello para vaciar su contenido en las venas yugular interna y la subclavia izquierdas.

Los conductos linfáticos se caracterizan por tener una túnica íntima con un endotelio rodeado de varias capas de fibras elásticas y de colágena. El acomodo de las fibras elástica semeja una lámina elástica interna. La capa media es delgada y presenta células musculares lisas en sentido longitudinal y circular. Su túnica íntima tiene células de músculo liso y se confunde con el tejido conjuntivo circundante. Al igual que las otras estructuras vasculares, también se pueden observar vasa vasorum.

Las funciones principales del sistema vascular linfático son:

- Devolver a la sangre el líquido y las proteínas plasmáticas que se pierden en la circulación.
- Regresar a la sangre las inmunoglobulinas (anticuerpos) formadas en los ganglios linfáticos.

La circulación coronaria

Si un corazón vive 80 años y late un promedio de 75 veces por minuto, ha realizado más de 3 000 millones de latidos y ha bombeado más de 200 millones de litros de sangre. En resumen, es un órgano que hace un trabajo pesado notable; por ello se comprende que necesite un abundante suministro de oxígeno y nutrientes. Esas necesidades no las satisface (en una extensión apreciable) la sangre de las cámaras cardiacas porque la difusión de sustancias de ahí al miocardio sería demasiado lenta. En cambio, el miocardio tiene su propio suministro de arterias y capilares que entregan sangre a cada célula muscular. Por su parte, los vasos sanguíneos de la pared cardiaca constituyen la circulación coronaria.

En descanso, los vasos sanguíneos coronarios irrigan el miocardio casi 250 ml de sangre por minuto. Esto constituye casi 5% de la sangre circulante para satisfacer las necesidades metabólicas del corazón, aunque éste sólo tenga 0.5% del peso del cuerpo. Recibe 10 veces más de su parte proporcional para sostener su extenuante carga de trabajo.

Arterias coronarias

La arteria coronaria derecha se ramifica en el seno aórtico derecho de la aorta ascendente y pasa anteriormente y hacia la derecha entre la aurícula derecha y el tronco pulmonar. Después desciende verticalmente entre la orejuela derecha y el ventrículo derecho en el surco coronario. Al llegar al borde inferior del corazón, se dirige posteriormente y continúa en el surco sobre la cara diafragmática y la base del corazón. Durante este recorrido, se originan las siguientes ramas:

- ✓ Una primera **rama auricular**, que pasa por el surco entre la orejuela derecha y la aorta ascendente y da la **rama para el nódulo sinusal**, que rodea posteriormente a la vena cava superior para irrigar el nódulo sinusal.
- ✓ Una **rama marginal derecha**, que se origina cuando la arteria coronaria derecha se aproxima al borde inferior (agudo) del corazón. Esta rama continúa a lo largo de este borde hacia el vértice del corazón. Una pequeña rama para el nódulo auriculoventricular cuando la arteria coronaria derecha continúa en la base/cara diafragmática del corazón.
- ✓ La **rama interventricular posterior**, la rama final, que se sitúa en el surco interventricular posterior.

La arteria coronaria derecha irriga la aurícula y el ventrículo derechos, los nódulos sinusal y auriculoventricular, el tabique interauricular, una parte de la aurícula izquierda, el tercio posteroinferior del tabique interventricular y parte de la cara posterior del ventrículo izquierdo.

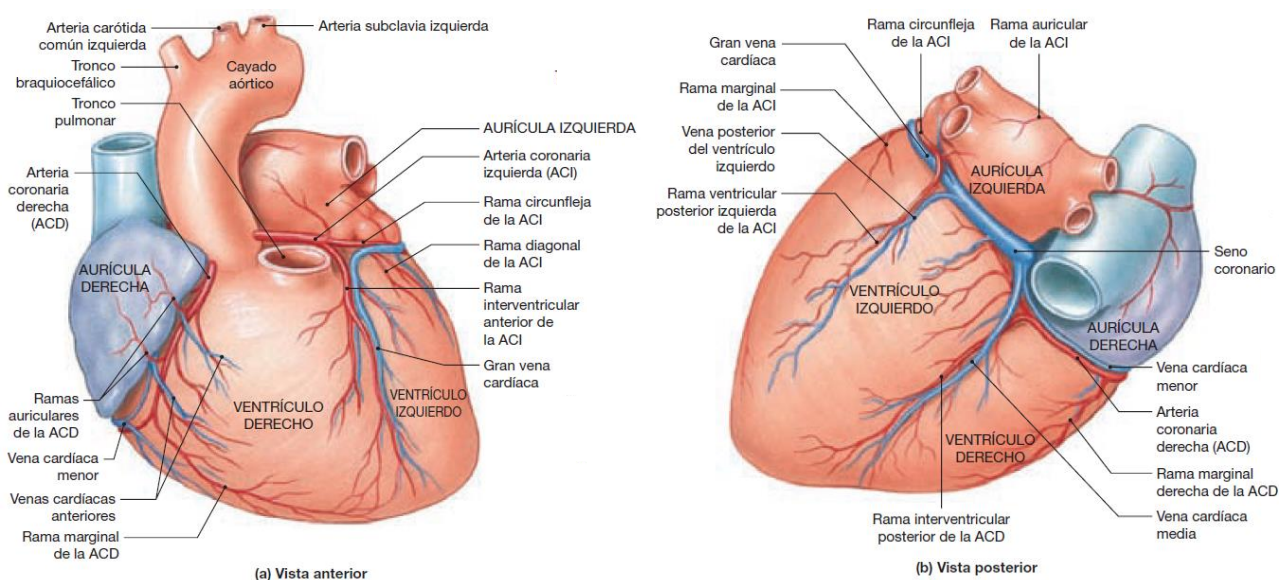


Figura 30, Circulación coronaria (a) Vasos coronarios que nutren la superficie anterior del corazón. (b) Vasos coronarios que nutren la superficie posterior del corazón.

La **arteria coronaria izquierda** se ramifica del seno aórtico izquierdo de la aorta ascendente y pasa entre el tronco pulmonar y la orejuela izquierda antes de entrar en el surco coronario. Posterior al tronco pulmonar, la arteria se divide en sus dos ramas terminales, la interventricular anterior y la circunfleja.

- ✓ La **rama interventricular anterior (arteria descendente anterior izquierda)** continúa rodeando el lado izquierdo del tronco pulmonar y desciende de manera oblicua hacia el vértice del corazón en el surco interventricular anterior. Durante su recorrido, puede dar una o dos **ramas diagonales** grandes que descienden ventrículo izquierdo.

- ✓ La **rama circunfleja** continúa hacia la izquierda en el surco coronario y sobre la base/cara diafragmática del corazón; generalmente termina antes de alcanzar el surco interventricular posterior. Una gran rama, la arteria marginal izquierda, generalmente nace y continúa cruzando el margen obtuso redondeado del corazón.

La arteria coronaria izquierda irriga la mayoría de la aurícula y el ventrículo izquierdo, y la mayor parte del tabique interventricular, incluyendo el fascículo auriculoventricular y sus ramas.

Venas cardíacas

El seno coronario recibe cuatro tributarias principales: las venas cardíacas mayor, media, menor y posterior.

- ✓ La **vena cardíaca mayor (magna)** comienza en el vértice del corazón y asciende en el surco interventricular anterior, donde discurre con la arteria interventricular anterior. En esta localización puede recibir el nombre de vena interventricular anterior. En el seno coronario gira a la izquierda y continúa por la base/cara diafragmática del corazón y se asocia con la rama circunfleja de la arteria coronaria izquierda. Siguiendo su camino en el surco coronario, la vena cardíaca mayor gradualmente va aumentando de calibre y se convierte en el seno coronario que termina en la aurícula derecha.
- ✓ La **vena cardíaca media (vena interventricular posterior)** comienza cerca del vértice del corazón y asciende en el surco interventricular posterior hacia el seno coronario. Se asocia a la rama interventricular posterior de la arteria coronaria derecha o izquierda a lo largo de todo su recorrido.
- ✓ La **vena cardíaca menor** comienza en la parte anteroinferior del surco coronario entre la aurícula derecha y el ventrículo derecho. Continúa en este surco hacia la base/ cara diafragmática del corazón y entra en el seno coronario en su extremo auricular. Acompaña a la arteria coronaria derecha en todo su recorrido y puede recibir una vena marginal derecha. Esta pequeña vena acompaña a la rama marginal de la arteria coronaria derecha a lo largo del borde agudo del corazón. Si la vena marginal derecha no se une a la vena cardíaca menor, penetra directamente en la aurícula derecha.
- ✓ La **vena cardíaca posterior** se sitúa en la cara posterior del ventrículo izquierdo justo a la izquierda de la vena cardíaca media, o bien entra directamente en el seno coronario o se une a la vena cardíaca mayor.

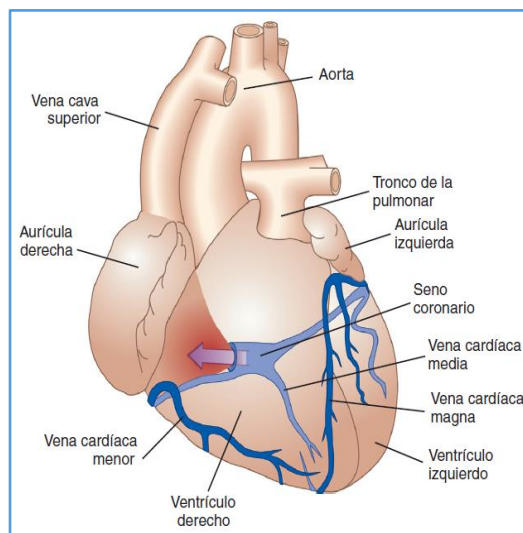


Figura 31, Circulación de las venas cardíacas.

Otras venas cardíacas. Dos grupos de venas cardíacas adicionales también participan en el drenaje venoso del corazón:

- ✓ Las venas anteriores del ventrículo derecho (venas cardíacas anteriores) son pequeñas venas que nacen en la pared anterior del ventrículo derecho. Cruzan el surco coronario y entran en la pared anterior de la aurícula derecha. Drenan la parte anterior del ventrículo derecho. La vena marginal derecha puede formar parte de este grupo si no se une a la vena cardíaca menor.
- ✓ También se ha descrito un grupo de venas cardíacas mínimas (venas de Tebesio). Drenan directamente en las cavidades cardíacas, son muy numerosas en la aurícula y el ventrículo derechos, aparecen ocasionalmente en la aurícula izquierda y son raras en el ventrículo izquierdo.

Linfáticos coronarios

Los vasos linfáticos del corazón siguen a las arterias coronarias y drenan fundamentalmente en:

- ✓ Nódulos braquiocefálicos, anteriores a las venas braquiocefálicas.
- ✓ Nódulos traqueobronquiales, en el extremo inferior de la tráquea.

Metabolismo del músculo cardíaco

El músculo cardíaco depende de manera casi exclusiva de la respiración aeróbica para elaborar ATP. Tiene cantidades abundantes de mioglobina (un recurso a corto plazo de oxígeno almacenado para la respiración aeróbica y glucógeno (para la energía almacenada). Sus enormes mitocondrias ocupan casi 25% de la célula; en comparación, las fibras de músculo estriado tienen mitocondrias mucho más pequeñas que sólo ocupan 2% de la fibra.

El músculo cardíaco es adaptable a los combustibles orgánicos empleados. En descanso, el corazón obtiene casi 60% de su energía de ácidos grasos, 35% de glucosa y 5% de otros combustibles, como cetonas, ácido láctico y aminoácidos. El músculo cardíaco es más vulnerable a una deficiencia de oxígeno que a la falta de cualquier combustible específico. Debido a que usa poco la fermentación anaeróbica o el mecanismo de deuda de oxígeno, no es propenso a la fatiga. Este hecho se puede apreciar con facilidad al apretar una pelota de hule con el puño una vez por segundo durante un minuto o dos. Pronto se siente fatiga en el músculo estriado y tal vez se experimente un enorme agradecimiento de que el músculo cardíaco pueda mantener un ritmo como éste, sin fatiga, de por vida.

TEJIDO MUSCULAR CARDÍACO Y SISTEMA DE CONDUCCIÓN DEL CORAZÓN

Histología del tejido muscular cardíaco En comparación con las fibras musculares esqueléticas, las fibras musculares cardíacas son más cortas y menos circulares en sección transversa (Figura 32). También presentan ramificaciones, que les confieren la apariencia “en peldaños de escalera” característica de las fibras musculares cardíacas. Una fibra muscular cardíaca típica mide de 50 a 100 μm de longitud y tiene un diámetro de aproximadamente 14 μm .

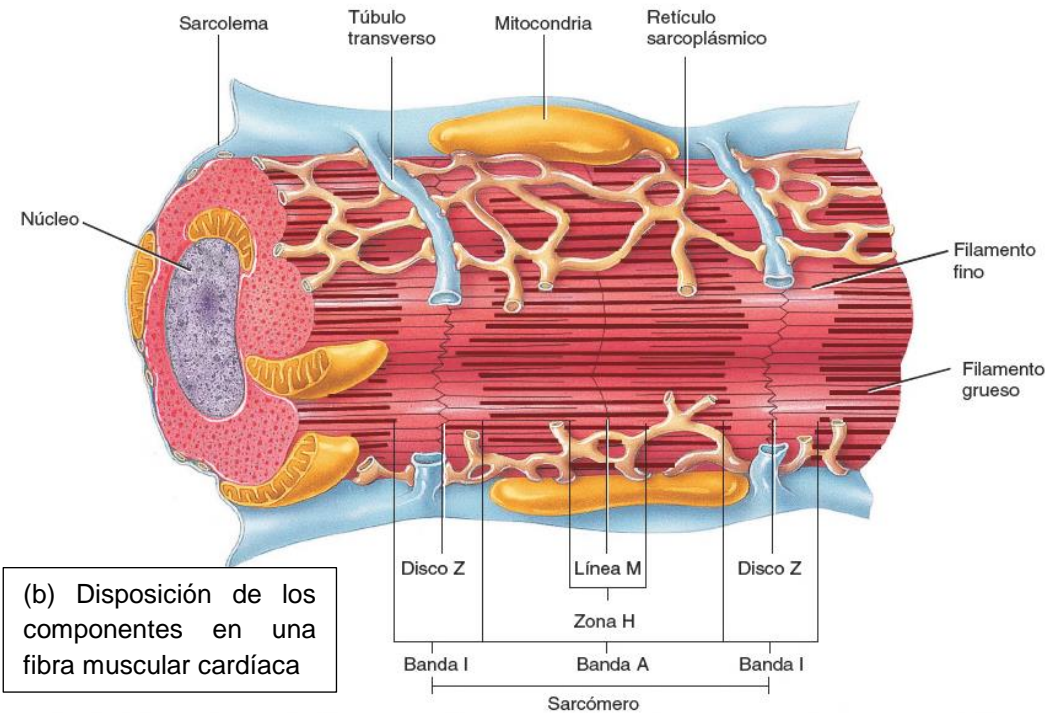
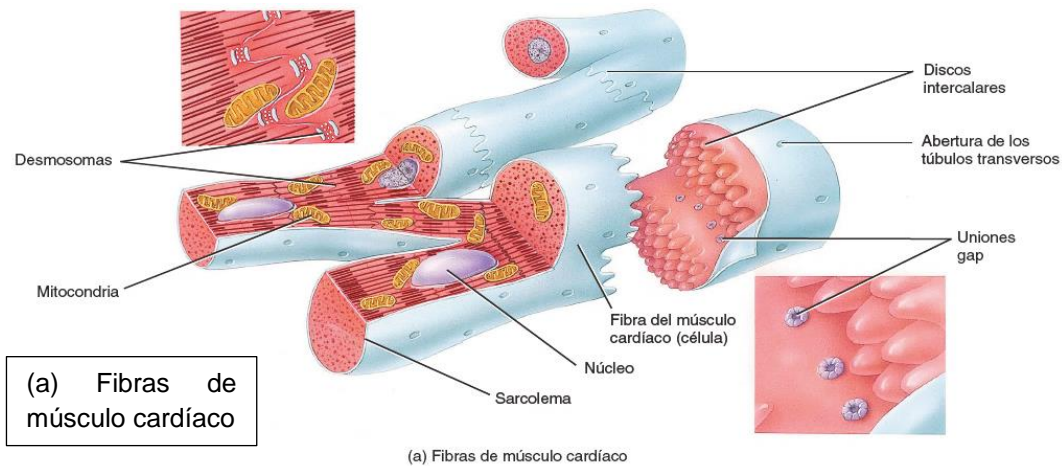


Figura 32, Histología del tejido muscular cardíaco

En general, presenta un solo núcleo de localización central, aunque algunas células pueden presentar ocasionalmente dos núcleos. Los extremos de las fibras musculares cardíacas se conectan con las fibras vecinas a través de engrosamientos transversales del sarcolema denominados discos intercalares (de intercalare, insertado entre). Estos discos contienen desmosomas (desmo-, de desmós, unión, banda, y -soma, de sóoma, cuerpo), que unen las fibras entre sí, y uniones en hendidura (gap) que permiten la conducción de los potenciales de acción desde una fibra muscular hasta las fibras vecinas. Las uniones gap permiten que todo el miocardio de las aurículas y de los ventrículos se contraiga como una única unidad coordinada.

Las mitocondrias son más grandes y numerosas en las fibras musculares cardíacas que en las esqueléticas. En una fibra muscular cardíaca ocupan el 25% del citosol, mientras que en una fibra muscular esquelética sólo el 2%. Las fibras musculares cardíacas poseen la misma disposición de filamentos de actina y miosina, las mismas bandas, zonas y discos Z que las fibras musculares esqueléticas. Los túbulos transversos del miocardio son más anchos, pero más escasos que los del músculo esquelético; el único túbulo transverso por sarcómero se localiza en el disco Z. El retículo sarcoplásmico de las fibras musculares cardíacas es algo más pequeño que el de las fibras musculares esqueléticas. En consecuencia, el músculo cardíaco presenta menores reservas intracelulares de Ca^{2+} .

Fibras automáticas: el sistema de conducción

La existencia de una actividad cardíaca eléctrica intrínseca y rítmica permite que el corazón pueda latir toda la vida. La fuente de esta actividad eléctrica es una red de fibras musculares cardíacas especializadas denominadas fibras automáticas (auto-, de autós, por sí mismo), debido a que son autoexcitables. *Las fibras automáticas generan potenciales de acción en forma repetitiva* que disparan las contracciones cardíacas. Continúan estimulando el corazón para que lata, aún después de haber sido extraído del cuerpo (p. ej., para ser trasplantado a otra persona) y de que todos sus nervios hayan sido cortados. (**Nota:** los cirujanos no intentan reinervar el corazón luego de haberlo trasplantado. Por esta razón, se dice que los cirujanos del corazón son mejores “plomeros” que “electricistas”). Durante el desarrollo embrionario, sólo el 1% de las fibras musculares cardíacas se diferencian en fibras automáticas; estas fibras relativamente raras cumplen dos funciones importantes.

1. Actúan como marcapasos, determinando el ritmo de la excitación eléctrica que causa la contracción cardíaca.
2. Forman el sistema de conducción, una red de fibras musculares cardíacas especializadas, que provee un camino para que cada ciclo de excitación cardíaca progrese a través del corazón. El

sistema de conducción asegura que las cámaras cardíacas sean estimuladas para contraerse en forma coordinada, lo que hace del corazón una bomba efectiva. Los problemas con las fibras automáticas pueden causar arritmias (ritmos anormales), donde el corazón late en forma anómala, demasiado rápido o demasiado despacio.

Los potenciales de acción cardíacos se propagan a lo largo del sistema de conducción con la siguiente secuencia (*Figura 33*):

1. En condiciones normales, la excitación cardíaca comienza en el **nodo sinoauricular o sinoatrial (SA)**, localizado en la aurícula derecha, justo por debajo del orificio de desembocadura de la vena cava superior. Las células del nodo SA no tienen un potencial de reposo estable. En lugar de ello, se despolarizan en forma continua y alcanzan espontáneamente el potencial umbral. La despolarización

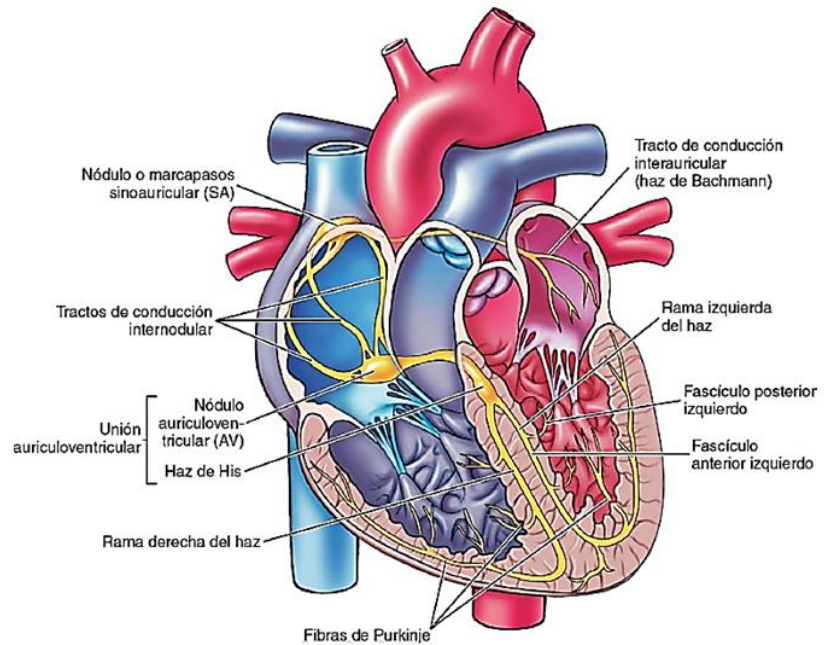


Figura 33, El sistema de conducción cardíaco

- espontánea es un potencial marcapasos. Cuando el potencial marcapasos alcanza el umbral, se desencadena un potencial de acción. Cada potencial de acción del nodo SA se propaga a través de ambas aurículas, por medio de las uniones en hendidura presentes en los discos intercalares de las fibras musculares auriculares. Siguiendo el potencial de acción, las aurículas se contraen.
2. Mediante la conducción a lo largo de las fibras musculares auriculares, el potencial de acción llega al **nodo auriculoventricular o atrioventricular (AV)**, localizado en el tabique interauricular, delante del orificio de desembocadura del seno coronario (*Figura 33*).
3. Desde el nodo AV, el potencial de acción se dirige hacia el **fascículo auriculoventricular o atrioventricular (también conocido como haz de His)**. Este es el único sitio por donde los potenciales de acción pueden propagarse desde las aurículas hasta los ventrículos. (En el resto del corazón, el esqueleto fibroso aísla eléctricamente las aurículas de los ventrículos.)
4. Luego de propagarse a lo largo del **haz de His**, el potencial de acción llega a las **ramas derecha e izquierda**, las que se extienden a través del tabique interventricular hacia el vértice cardíaco.

5. Finalmente, las anchas **fibras de Purkinje** o ramos subendocárdicos conducen rápidamente el potencial de acción desde el vértice cardíaco hacia el resto del miocardio ventricular. Luego, los ventrículos se contraen y empujan la sangre hacia las válvulas semilunares.

Las fibras automáticas del nodo SA iniciarían por su cuenta un potencial de acción cada 0,6 segundos, o 100 veces por minuto. Así, el nódulo sinoaricular establece el ritmo de contracción del corazón: es el marcapasos natural. Esta frecuencia es mayor que la del resto de las fibras automáticas. Debido a que los potenciales de acción del nodo SA se propagan a través del sistema de conducción y estimulan otras áreas antes de generar un potencial de acción por sí mismas a menor frecuencia, las células del nodo SA actúan como el marcapasos cardíaco. Los impulsos nerviosos del sistema nervioso autónomo (SNA) y de hormonas (como la adrenalina) modifican la frecuencia y la fuerza de cada latido cardíaco, pero no establecen el ritmo fundamental. Por ejemplo, en una persona en reposo, la acetilcolina liberada por los ramos parasimpáticos del SNA disminuye la frecuencia de descarga del nodo SA a aproximadamente 75 potenciales de acción por minuto, o uno cada 0,8 segundos

El potencial de acción iniciado por el nodo SA viaja a lo largo del sistema de conducción y se esparce excitando las fibras musculares auriculares y ventriculares “funcionantes”, denominadas fibras contráctiles.

Un potencial de acción se genera en una fibra contráctil de la siguiente manera (*Figura 34*):

1. **Despolarización.** A diferencia de las fibras automáticas, las contráctiles tienen un potencial de membrana de reposo estable, cercano a -90 mV. Cuando una fibra contráctil es llevada al potencial umbral por medio de los potenciales de acción de las fibras vecinas, sus canales de Na^+ rápidos regulados por voltaje se abren. Estos canales de sodio se denominan rápidos debido a que se abren muy velozmente, en respuesta a la despolarización que llega al potencial umbral. La apertura de estos canales permite el influjo de Na^+ porque el citosol de las fibras contráctiles es eléctricamente más negativo que el líquido intersticial, y la concentración de Na^+ es mayor en el líquido intersticial. La entrada de Na^+ a favor del gradiente electroquímico produce una despolarización rápida. En pocos milisegundos, los canales de Na^+ rápidos se inactivan automáticamente y disminuyen el influjo de Na^+ al citosol.
2. **Plateau o meseta.** La fase siguiente del potencial de acción de una fibra contráctil es el plateau, un período de despolarización sostenida. Se debe, en parte, a la apertura de canales de Ca^{2+} lentos regulados por voltaje, presentes en el sarcolema. Cuando estos canales se abren, los iones de Ca^{2+} se mueven desde el líquido intersticial (que presenta mayor concentración de iones de Ca^{2+}) hacia el citosol. Este influjo de Ca^{2+} produce, a su vez, la liberación de Ca^{2+} al citosol desde el retículo sarcoplásmico, a través de canales de Ca^{2+} adicionales presentes en la

membrana del retículo sarcoplásmico. El aumento de la concentración de Ca^{2+} en el citosol provoca la contracción. También existen varios tipos de canales de K^+ regulados por voltaje en el sarcolema de una fibra contráctil. Justo antes de que comience la fase de meseta, algunos de estos canales de K^+ se abren y permiten la salida de los iones de K^+ de la fibra contráctil. Por lo tanto, la despolarización es mantenida durante el plateau debido a que la entrada de Ca^{2+} equilibra la salida de K^+ . Esta fase dura aproximadamente 0,25 s y el potencial de membrana de la fibra contráctil se mantiene cercano a 0 mV. En comparación, la despolarización de una neurona o de una fibra muscular esquelética es mucho más breve, aproximadamente 1 mseg (0,001 s), ya que carece del plateau o meseta.

3. **Repolarización.** La recuperación del potencial de membrana de reposo durante la fase de repolarización de un potencial de acción cardíaco es semejante a la de otras fibras excitables. Luego de un retraso (que es particularmente prolongado en el músculo cardíaco), los canales de K^+ dependientes de voltaje se abren. La salida de K^+ restablece el potencial de membrana de reposo, negativo (-90 mV). Al mismo tiempo, los canales de calcio del sarcolema y del retículo sarcoplásmico se cierran, lo que también contribuye a la repolarización.

El mecanismo de contracción cardíaco es semejante al de las fibras esqueléticas: la actividad eléctrica (potencial de acción) conduce a una respuesta mecánica (contracción) luego de un breve retraso. A medida que la concentración de Ca^{2+} aumenta en el interior de la fibra contráctil, el Ca^{2+} se une a la proteína reguladora troponina, lo que permite que los filamentos de actina y miosina comiencen a interactuar y deslizarse entre sí, lo que genera la tensión. Las sustancias que alteran el movimiento de Ca^{2+} a través de los canales de Ca^{2+} lentos modifican la fuerza de contracción cardíaca. La adrenalina, por ejemplo, aumenta la fuerza de contracción mediante el aumento del flujo de entrada de Ca^{2+} al citosol.

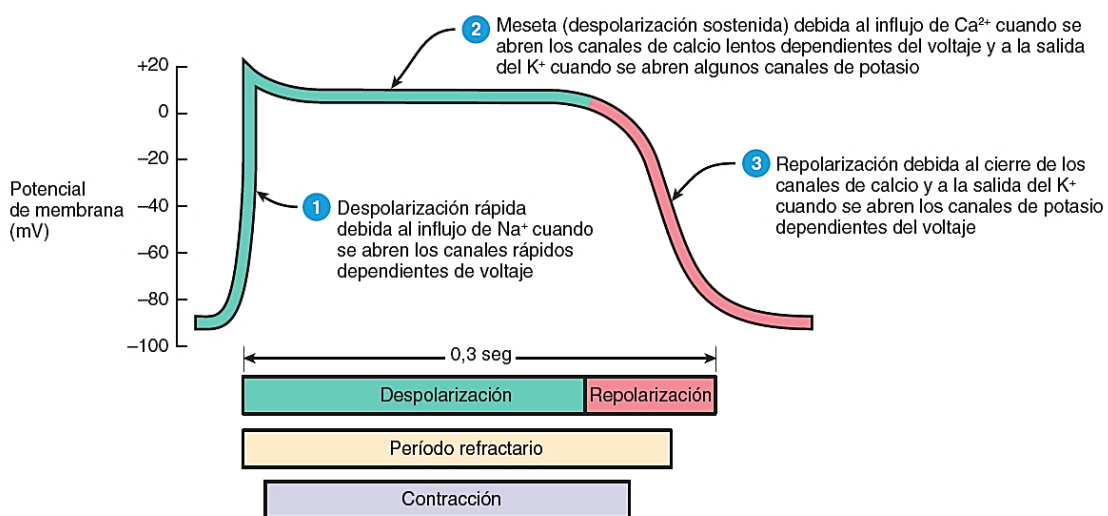


Figura 34, Potencial de acción en una fibra contráctil. El potencial de reposo es de aproximadamente -90 mV.

En el músculo, el período refractario es el intervalo de tiempo durante el cual no puede desencadenarse una segunda contracción. El período refractario de una fibra muscular cardíaca dura más que la contracción (*Figura 34*). En consecuencia, no puede iniciarse una nueva contracción hasta que la fibra no se haya relajado correctamente.

Por esta razón, la tetania (contracción sostenida) no se produce en el músculo cardíaco, como lo hace en el esquelético. La ventaja se percibe al observar el funcionamiento ventricular. La función de bomba de los ventrículos depende de la alternancia de contracción (cuando eyectan sangre) y relajación (cuando se llenan). Si el corazón pudiera generar una contracción tetánica, el flujo sanguíneo cesaría.

Producción de ATP en el músculo cardíaco

A diferencia del músculo esquelético, el músculo cardíaco produce poco del ATP que necesita por medio de respiración celular anaeróbica (véase la *Figura 35*). Por el contrario, depende casi exclusivamente de la respiración celular aeróbica que se lleva a cabo en sus numerosas mitocondrias. El oxígeno necesario difunde desde la sangre de la circulación coronaria y es liberado en el interior de las fibras musculares cardíacas desde la mioglobina allí presente. Las fibras musculares cardíacas utilizan varias fuentes energéticas para producir ATP mitocondrial. En una persona en reposo, el ATP cardíaco proviene fundamentalmente de la oxidación de ácidos grasos (60%) y de glucosa (35%), con pequeñas contribuciones de la oxidación de ácido láctico, aminoácidos y cuerpos cetónicos. Durante el ejercicio, aumenta la utilización cardíaca del ácido láctico producido por la contracción activa de los músculos esqueléticos.

Como en el músculo esquelético, en el músculo cardíaco parte del ATP producido proviene de la fosfocreatina. Un signo que confirma la ocurrencia de un infarto de miocardio (véase Correlación clínica Isquemia miocárdica e infarto) es la presencia en sangre de creatincinasa (CK), la enzima que cataliza la transferencia de un grupo fosfato desde la fosfocreatina al ADP para producir ATP. En condiciones normales, la CK y otras enzimas están confinadas dentro de las células. Las fibras musculares esqueléticas o cardíacas lesionadas y las que se están muriendo liberan CK hacia la circulación.

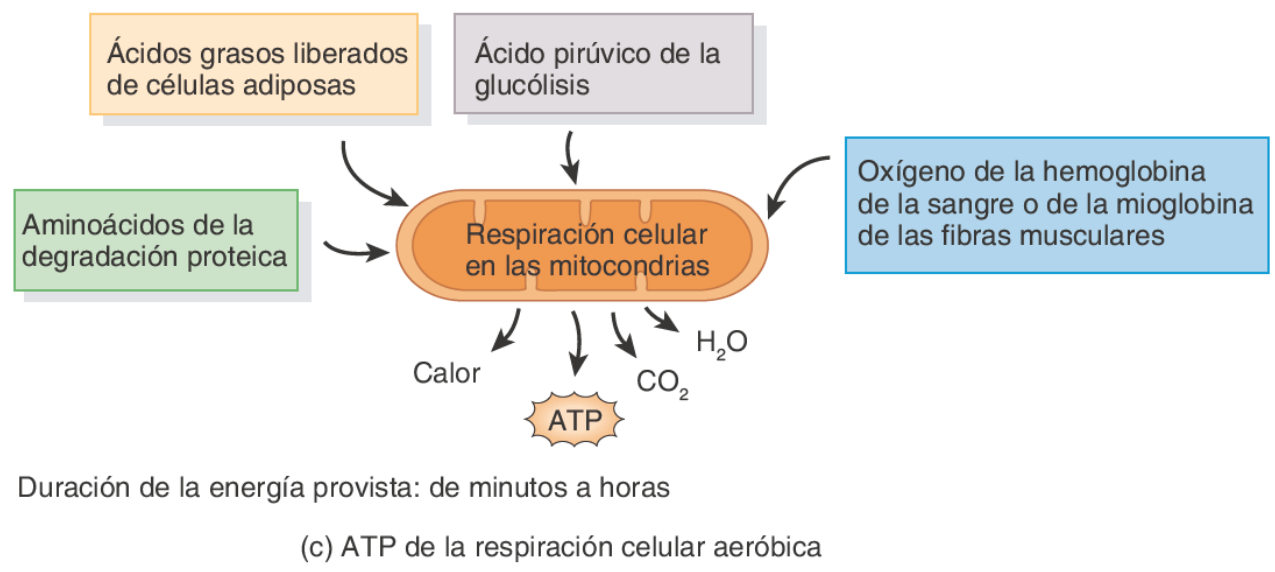
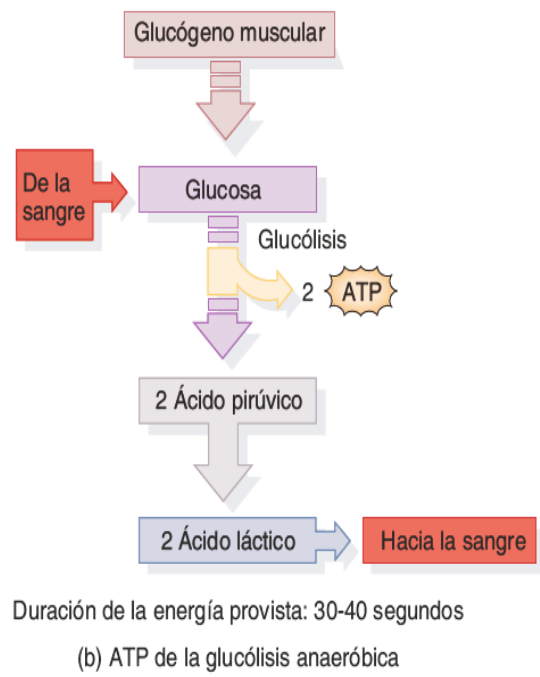
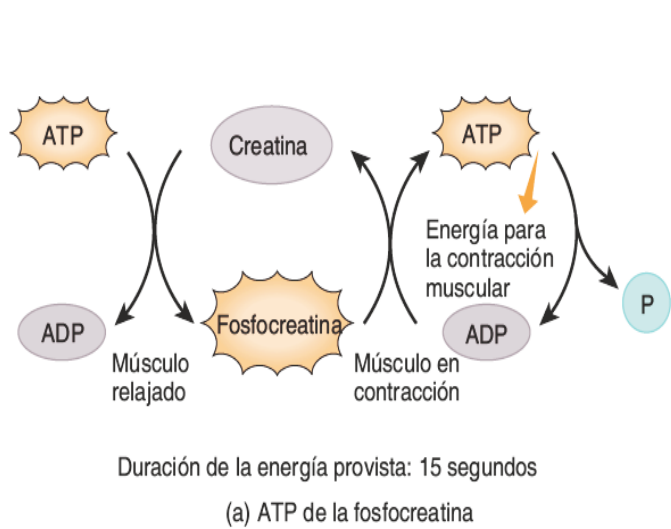


Figura 35, Producción de ATP para la contracción muscular. (a) La fosfocreatina, formada a partir del ATP cuando el músculo está relajado, transfiere un grupo fosfato de alta energía al ADP, lo que forma ATP, durante la contracción muscular. (b) La degradación de glucógeno muscular a glucosa y la producción de ácido pirúvico a partir de la glucosa mediante glucólisis produce ATP y ácido láctico. Como no se requiere oxígeno, ésta es una vía anaeróbica. (c) Dentro de las mitocondrias, se utiliza ácido pirúvico, ácidos grasos y aminoácidos para producir ATP mediante respiración celular aeróbica, una serie de reacciones que requieren oxígeno.

ELECTROFISIOLOGÍA DEL CORAZÓN

El corazón del ser humano está regulado por impulsos eléctricos. Las células marcapasos cardíacas generan y conducen impulsos eléctricos. Las células miocárdicas son capaces de contraerse, pero también de conducir impulsos eléctricos a células miocárdicas adyacentes, si bien lo hacen de manera menos eficaz y más despacio que las células marcapasos especializadas. Estos impulsos eléctricos son conducidos merced al breve, pero rápido, flujo de iones con carga positiva (fundamentalmente iones sodio y potasio y, en menor medida, iones calcio) de un lado a otro a través de la membrana de las células marcapasos. La diferencia en las concentraciones de estos iones dentro y fuera de la membrana celular en un momento dado produce un potencial eléctrico. Esta energía de potencial, o carga, se mide en milivoltios (mV).

Estado de reposo de las células cardíacas

En reposo, la célula cardíaca cuenta con una capa de iones positivos que rodea su membrana celular. Presenta un número equivalente de iones negativos que revisten el interior de la membrana celular, enfrentados directamente a cada ion positivo.

Cuando los iones positivos y negativos están alineados de este modo, se dice que la célula en reposo está polarizada (fig. 36). Cuando una célula cardíaca se encuentra en estado de reposo, fuera de ella hay una concentración elevada de cationes sodio (Na^+). Al mismo tiempo, en el interior celular existe una concentración elevada de aniones (especialmente aniones fosfato orgánico, aniones sulfato orgánico y aniones proteínicos), mezclados con una concentración más baja de cationes potasio (K^+). Los cationes tienen carga positiva, mientras que los aniones son de carga negativa. Ello hace que el interior de la célula sea eléctricamente negativo en comparación con el exterior. En tales condiciones se genera un potencial eléctrico negativo a través de la membrana celular. Esto es posible porque la membrana celular no es permeable ni a los cationes de sodio cargados positivamente fuera de la

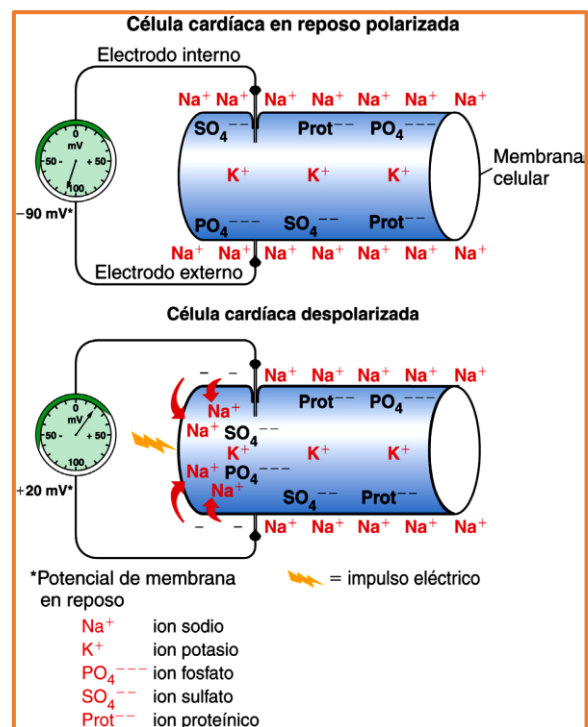


Figura 36, Potenciales de membrana de células cardíacas polarizadas y despolarizadas.

membrana celular ni a los aniones sulfato, fosfato y proteínicos cargados negativamente en el interior celular.

El potencial eléctrico mantenido a través de la membrana de una célula cardíaca en reposo se denomina potencial de membrana de reposo. En las células cardíacas auriculares y ventriculares, y en las células marcapasos del sistema de conducción eléctrica es normalmente de -90 mV. Conviene recordar que un potencial de membrana negativo ($-$) indica que la concentración de iones positivos, o cationes, en el exterior de la célula es mayor que la concentración en el interior celular. Un potencial de membrana positivo ($+$) indica lo contrario, es decir, que existen más cationes dentro de la célula que fuera de ella.

Despolarización y repolarización

Estimulada por un impulso eléctrico, la membrana de una célula cardíaca polarizada se convierte en permeable a los cationes sodio, y permite la entrada de sodio en la célula. Ello hace que el interior de la célula sea menos negativo que el exterior.

El proceso en virtud del cual se invierte el estado polarizado de la célula en reposo se denomina despolarización (*fig. 37*). Cuando el potencial de membrana cae desde su potencial en reposo de -90 mV a cerca de -65 mV, se abren transitoriamente grandes poros en la membrana. Estos poros se denominan canales de sodio rápidos y facilitan el flujo libre y rápido de sodio a través de la membrana celular, lo que da lugar a una súbita e importante entrada de cationes sodio en la célula. Ello hace que el interior celular se torne positivo con rapidez. En el momento en el que la concentración de cationes sodio en el interior de la célula alcanza la concentración existente fuera de la célula, el potencial de membrana cae a 0 y la célula cardíaca se despolariza. No obstante, la entrada de cationes sodio continúa, lo que genera un aumento temporal del potencial de membrana, o sobrevoltaje, de alrededor de $+20$ a $+30$ mV.

Los canales de sodio rápidos están presentes en las células miocárdicas, pero no en las células marcapasos. Estas últimas células tienen canales de calcio-sodio lentos, que se abren cuando el potencial de membrana disminuye hasta aproximadamente -50 mV.

Durante la despolarización, estos canales permiten la entrada de los cationes calcio y sodio en las células cardíacas a una velocidad lenta y gradual. El resultado es una velocidad más lenta de despolarización, en comparación con la velocidad de despolarización de las células miocárdicas que contienen canales rápidos de sodio.

Tan pronto como la célula cardíaca se despolariza, los cationes potasio salen de la célula. Este movimiento a través de la membrana celular da inicio a un proceso a través del cual la célula vuelve a su estado polarizado en reposo. El proceso, denominado repolarización (v. fig. 37), supone un complejo intercambio de iones sodio, calcio y potasio a través de la membrana celular.

La despolarización de una célula cardíaca actúa como un impulso eléctrico que estimula y despolariza células adyacentes.

La despolarización de las células miocárdicas provoca contracción del músculo y propagación (generación) de un impulso. La despolarización de las células marcapasos propaga un impulso a las células marcapasos adyacentes. Este movimiento de la onda de despolarización de célula a célula produce una onda de energía eléctrica, que puede medirse como una corriente eléctrica que avanza a través del corazón.

Potencial umbral

Es necesario que la célula cardíaca no esté completamente repolarizada hasta su estado polarizado de reposo (-90 mV) antes de que pueda ser estimulada para despolarizarse de nuevo. Las células de los nódulos SA y AV pueden despolarizarse cuando han sido repolarizadas hasta alrededor de -30 o -40 mV. El resto de las células del sistema de conducción eléctrica del corazón y las células miocárdicas pueden despolarizarse cuando se han repolarizado hasta -60 o -70 mV. El nivel de repolarización que debe alcanzar una célula antes de poder ser despolarizada de nuevo se conoce como potencial umbral.

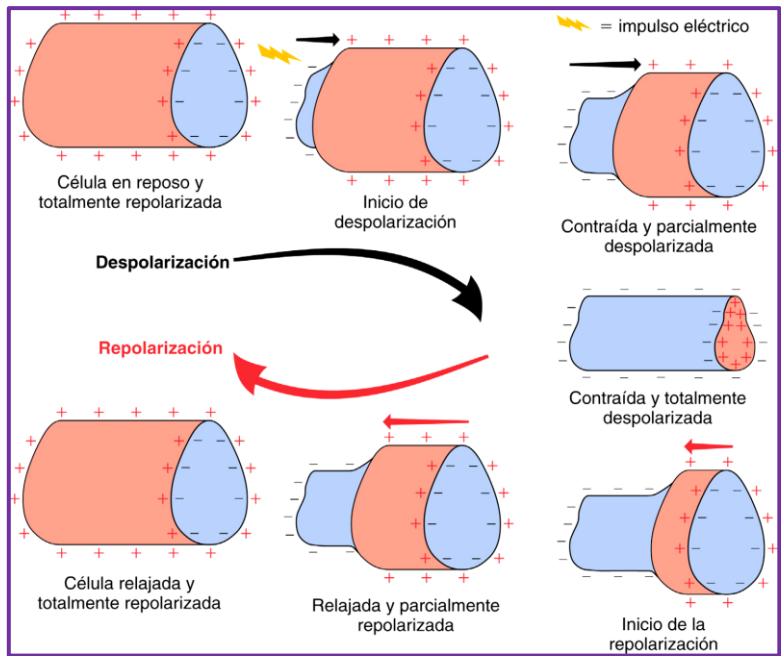


Figura 37, Despolarización y repolarización de una célula miocárdica.

El nivel de repolarización que debe alcanzar una célula antes de poder ser despolarizada de nuevo se conoce como potencial umbral.

Potencial de acción

El potencial de acción se refiere a la variación en el potencial de membrana (de un estado positivo a un estado negativo) durante la despolarización y la repolarización. Esta variación se representa mediante un diagrama en el que el potencial de acción se divide en cinco fases: de la fase 0 a la 4 (fig. 38):

- **Fase 0.** La fase 0 (fase de despolarización) es el aumento brusco y pronunciado del potencial de acción, que se dispara hacia arriba. Durante esta fase, la membrana celular alcanza su potencial umbral. Se desencadena entonces la apertura momentánea de los canales de sodio rápidos y se produce la pronta entrada de sodio en la célula. Al entrar los cationes, el interior celular pasa a ser eléctricamente positivo. Durante el aumento de potencial o trazo ascendente, la célula se despolariza y comienza a contraerse.
- **Fase 1.** Durante la fase 1 (fase de repolarización rápida inicial), los canales rápidos de sodio se cierran, ponen fin al paso rápido de sodio al interior celular y se produce a continuación pérdida de potasio. El resultado neto es una disminución en el número de cargas eléctricas positivas en el interior de la célula y una caída del potencial de membrana hasta 0.
- **Fase 2.** La fase 2 es una prolongada fase de meseta, durante la cual la célula miocárdica se repolariza lentamente. La finalización gradual de esta fase permite que el corazón termine de contraerse y comience a relajarse. Durante la fase 2, el potencial de membrana se mantiene próximo a 0. En un complicado intercambio de iones a través de la membrana celular, el calcio entra gradualmente en la célula a través de canales lentos de calcio. El sodio entra también de manera gradual, mientras que el potasio sigue saliendo de la célula.

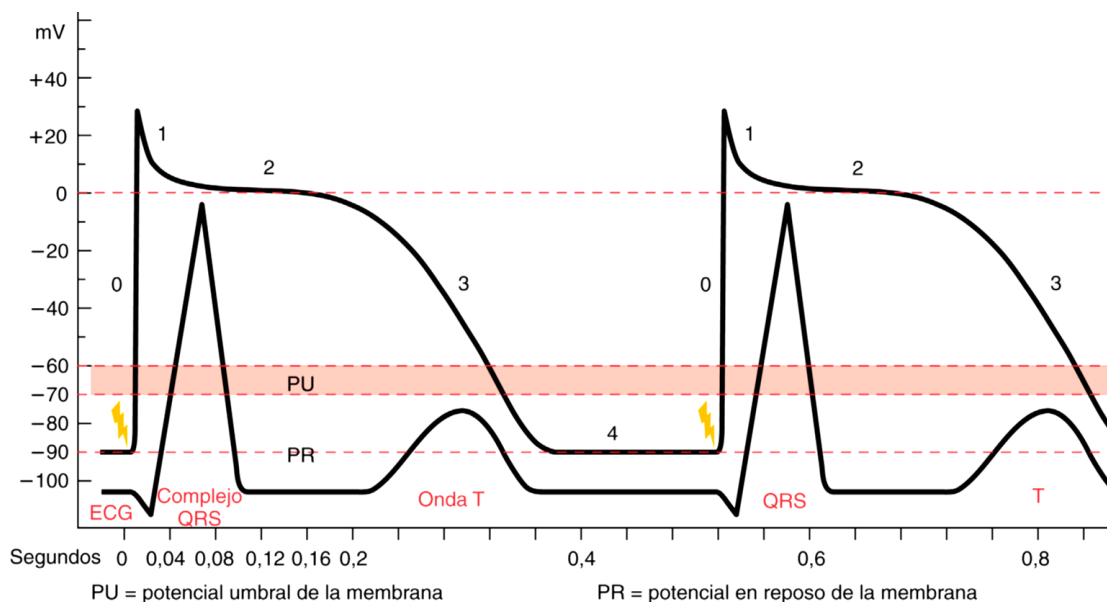


Figura 38, Potencial de acción de las células miocárdicas.

- **Fase 3.** La fase 3 es la fase terminal de repolarización rápida. Durante esta fase, el interior de la célula pasa a ser marcadamente negativo y el potencial de membrana vuelve una vez más a su nivel en reposo de alrededor de -90 mV. Este cambio se debe fundamentalmente a la salida de potasio de la célula. La repolarización se completa hacia el final de la fase 3.
- **Fase 4.** En el inicio de la fase 4 (el período entre potenciales de acción), la membrana vuelve a su potencial en reposo y el interior celular presenta una vez más su máximo potencial negativo

(-90 mV) en comparación con el exterior. Sin embargo, existen aún un exceso de sodio dentro de la célula y un exceso de potasio fuera de ella. Llegados a este punto, se activa un mecanismo fisiológico conocido como bomba de sodio-potasio, que transporta el sodio en exceso fuera de la célula y conduce el potasio de vuelta al interior celular. Debido a este mecanismo y a la impermeabilidad de la membrana celular al sodio durante esta fase, la célula miocárdica mantiene normalmente un potencial de membrana estable entre potenciales de acción.

Períodos Refractarios

El período refractario de una célula cardíaca comienza con el inicio de la fase 0 del potencial de acción cardíaco y termina justo antes del final de la fase 3. En el ECG, este período se extiende desde el inicio del complejo QRS hasta aproximadamente el final de la onda T. El período refractario se divide en períodos refractarios absoluto y relativo (fig. 39).

El **período refractario absoluto (PRA)** abarca los dos primeros tercios del período refractario total. Comienza con el inicio de la fase 0 y termina a mitad de la fase 3, en torno al pico de la onda T. Durante este período, las células cardíacas –que se han despolarizado completamente– se encuentran en proceso de repolarización. Dado que no se han repolarizado hasta su potencial umbral, las células cardíacas no pueden ser estimuladas

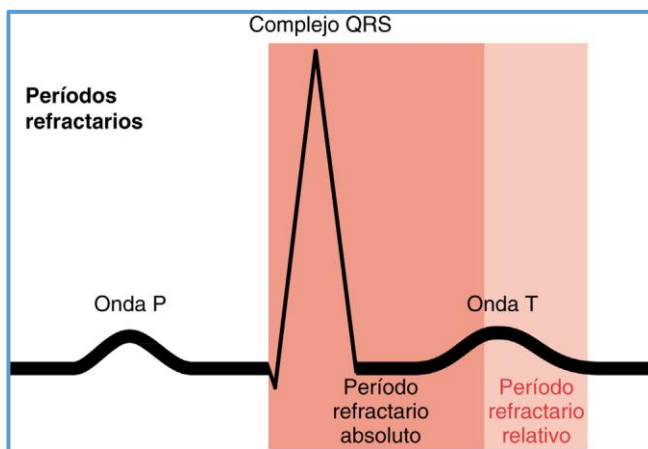


Figura 39, Períodos refractarios.

para despolarizarse. En otras palabras, durante el PRA, las células miocárdicas no pueden contraerse, y las células del sistema de conducción eléctrica no pueden despolarizarse.

El **período refractario relativo (PRR)** ocupa el tercio restante del período refractario. El PRR se extiende a lo largo de la mayor parte de la segunda mitad de la fase 3, y se corresponde con la pendiente descendente de la onda T. Durante este período, las células cardíacas pueden ser estimuladas para despolarizarse, siempre que el estímulo sea lo suficientemente fuerte, ya que se han repolarizado hasta su potencial umbral. Este período se conoce también como *período vulnerable de repolarización*.

Nota: Período refractario: Período comprendido entre el inicio de la despolarización y el final de la repolarización de una célula cardíaca, durante el cual no puede ser estimulada para su repolarización.

Automatismo

La capacidad de despolarización espontánea de una célula cardíaca durante la fase 4 recibe el nombre de propiedad de automatismo. Para despolarizarse de manera espontánea, la membrana celular debe tornarse permeable al sodio en la fase 4 para permitir así el paso constante de iones sodio al interior celular. Ello da lugar a que el potencial de membrana en reposo vaya haciéndose progresivamente menos negativo. Tan pronto como alcanza su potencial umbral, la célula se despolariza rápidamente (fase 0). La frecuencia de despolarización espontánea depende de la pendiente de despolarización de la fase 4 (fig. 40). Cuanto más pronunciada es la pendiente de despolarización de la fase 4, mayor es la frecuencia de despolarización espontánea y de formación de impulso (frecuencia de descarga). Cuanto más plana es la pendiente, menor es la frecuencia de descarga.

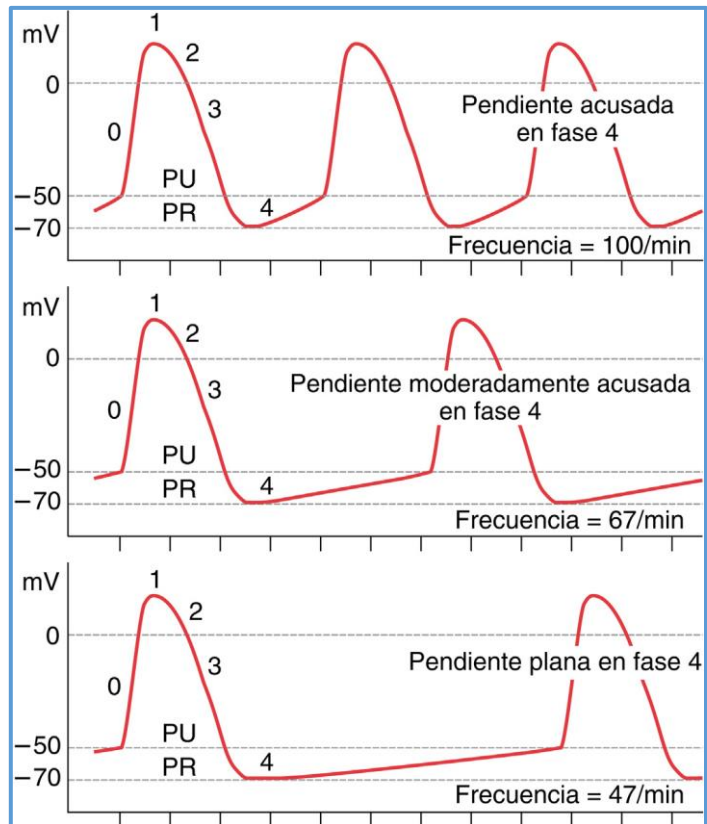


Figura 40. Potencial de acción de células marcapasos. La frecuencia de despolarización espontánea depende de la pendiente de despolarización de la fase 4. PR, potencial de membrana en reposo; PU, potencial umbral.

Marcapasos dominante y de escape del corazón

Como se ha indicado, las células marcapasos son células especializadas del sistema de conducción eléctrica que normalmente tienen la propiedad del automatismo. Estas células se localizan en el nódulo SA, en ciertas áreas de las vías de conducción auricular internodular y en el nódulo AV, así como en todo el haz de His, en las ramas del haz y en la red de Purkinje. Las células marcapasos del nódulo SA tienen la frecuencia de descarga espontánea más alta (entre 60 y 100 veces por minuto). Como consecuencia de ello, son normalmente las células marcapasos dominantes (o principales) del corazón (fig. 41). Las células marcapasos del resto del sistema de conducción eléctrica poseen menor velocidad de automatismo y normalmente son llamadas solo a despolarizarse si el nódulo SA deja de funcionar debidamente o si los impulsos eléctricos dejan de llegar a ellas. Por ello, estas células se conocen como células marcapasos de escape.

Normalmente, la frecuencia cardíaca se halla bajo control de las células marcapasos con el grado más alto de automatismo. Cada vez que estas células marcapasos generan un impulso eléctrico, las

células marcapasos de escape, de descarga más lenta, son despolarizadas antes de que puedan hacerlo espontáneamente. Este fenómeno se conoce como supresión del sobreimpulso.

En condiciones normales, el nódulo SA es el marcapasos primario y dominante del corazón (v. fig. 40), porque posee el más alto grado de automatismo; es decir, su frecuencia espontánea de descarga automática (60 a 100 veces por minuto) es normalmente mayor que la de las demás células marcapasos.

Si el nódulo SA no se despolariza con su frecuencia normal o deja de funcionar por completo, o si la conducción del impulso eléctrico queda bloqueada por cualquier motivo (p. ej., en el nódulo AV), las células marcapasos de escape de la unión AV asumen generalmente el papel de marcapasos del corazón, aunque en una frecuencia más baja (de 40 a 60 veces por minuto). Si la unión AV no es capaz de tomar el relevo como marcapasos debido a enfermedad, es posible que un marcapasos de escape del sistema de conducción eléctrica, por debajo de la unión AV o en los ventrículos (en las ramas del haz o en la red de Purkinje), asuma el papel en una frecuencia incluso más baja (inferior a 40 veces por minuto).

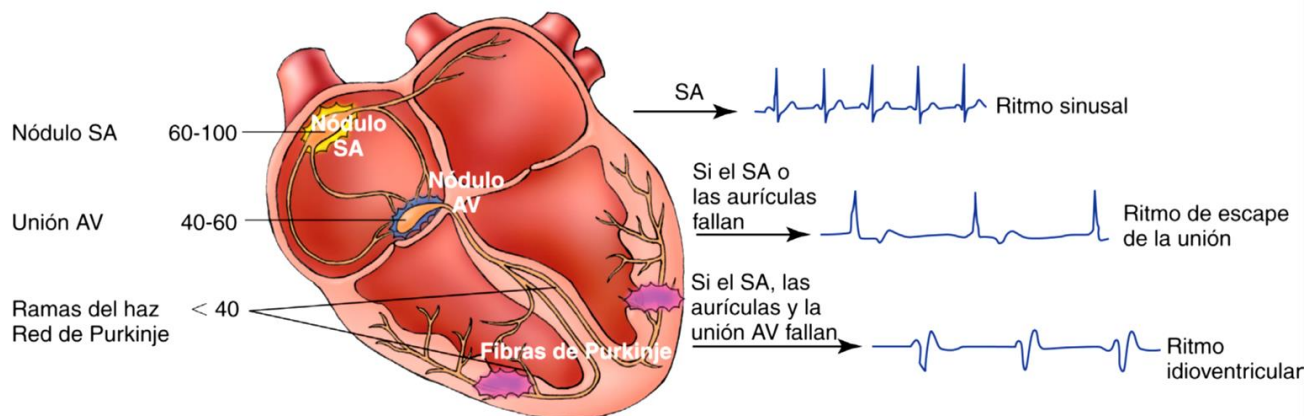


Figura 41, Marcapasos dominante y de escape.

La frecuencia con la que el nódulo SA o un marcapasos de escape generan normalmente impulsos eléctricos recibe el nombre de frecuencia de descarga intrínseca del marcapasos. Un latido o una serie de latidos que se generan en un marcapasos de escape se conocen como ritmo o latido de escape y se designan en función de su origen (p. ej., ventricular o de la unión).

Control Del Sistema Nervioso Autónomo Sobre El Corazón

El corazón se encuentra bajo el control constante del sistema nervioso autónomo, que se divide en simpático y parasimpático trabajan juntos para regular el gasto cardíaco y la presión arterial.

El control del corazón por parte del sistema nervioso tiene su origen en dos centros nerviosos distintos localizados en el bulbo raquídeo, una parte del tronco del encéfalo:

1. Centro cardioacelerador. Este centro forma parte del sistema nervioso simpático. Los impulsos que parten del centro cardioacelerador alcanzan el sistema de conducción eléctrica del corazón y las aurículas y los ventrículos a través de los nervios simpáticos.

La estimulación del sistema nervioso simpático produce los siguientes efectos:

- ✦ Aumento en la frecuencia de descarga del nódulo SA y marcapasos de escape y ectópicos en todo el corazón.
- ✦ Aumento de la conductividad de los impulsos eléctricos a través de las aurículas y los ventrículos, especialmente a través del nódulo AV.
- ✦ Aumento de la fuerza de las contracciones auriculares y ventriculares. El resultado es un incremento de la frecuencia cardíaca, el gasto cardíaco y la presión arterial.

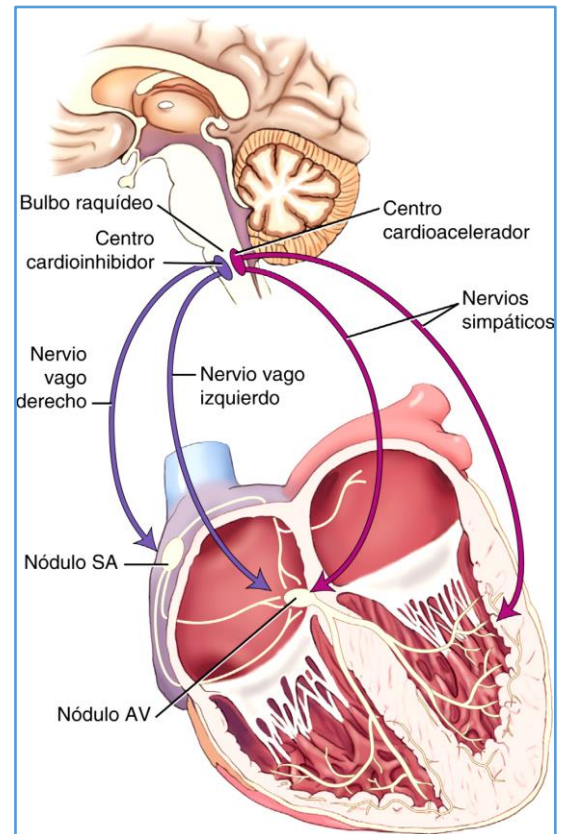


Figura 42, Regulación simpática y parasimpática del corazón.

2. Centro cardioinhibidor. Este centro forma parte del sistema nervioso parasimpático. Los impulsos se desplazan desde el centro cardioinhibidor hasta el nódulo SA, las aurículas y, en menor medida, los ventrículos, por los nervios vagos derecho e izquierdo. Cuando el nervio vago se activa, la frecuencia cardíaca disminuye. Cuando la activación es menor, predominan

los efectos del sistema nervioso simpático y la frecuencia cardíaca aumenta. La frecuencia de activación del nervio vago se conoce como tono vagal. Otro importante centro nervioso cardioinhibidor (parasimpático) es el seno carotídeo, sección ligeramente dilatada de la arteria carótida común, localizada en el punto de ramificación de las arterias carótidas interna y externa. Las terminaciones nerviosas sensitivas del seno carotídeo intervienen en la regulación de la presión arterial y de la frecuencia cardíaca.

La estimulación del sistema nervioso parasimpático da lugar a los siguientes efectos:

- ✦ Disminución de la frecuencia de descarga del nódulo SA y marcapasos de escape y ectópicos en las aurículas y en la unión AV.

✗ Menor velocidad de conducción de los impulsos eléctricos a través del nódulo AV.

El resultado es una disminución de la frecuencia cardíaca, el gasto cardíaco y la presión arterial, en ocasiones con bloqueo AV.

Al cambiar los requerimientos de presión arterial, múltiples sensores presentes en el cuerpo envían impulsos a los centros cardioinhibidor y cardioacelerador para su análisis. Desde ahí, los nervios simpáticos y parasimpáticos transmiten los impulsos adecuados al sistema de conducción eléctrica del corazón y al miocardio auricular y ventricular, donde influyen en el automatismo, la conductividad y la contractilidad de las células cardíacas.

Bibliografía

- Drake, R. L., Vogl, A. W., & Mitchell, A. W. (2013). *GRAY Anatomía Básica*. Barcelona, España: Elsevier España, S.L.
- Fortoul van der Goes, T. I. (2013). *Histología Y Biología Celular*. México, D. F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C. V.
- Marieb, E. N. (2008). *Anatomía Y Fisiología Humana*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Martini, F. H., Timmons, M. J., & Tallitsch, R. B. (2009). *Anatomía humana Sexta edición*. Madrid (España): PEARSON EDUCACIÓN S. A.
- Saladin, K. S. (2013). *Anatomía Fisiología; La Unidad Entre Forma Y Función Sexta edición*. México, D. F.: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. de C. V.
- Thibodeau, G. A., & Patton, K. T. (2007). *Anatomía y Fisiología sexta edición*. Barcelona (España): Elsevier España, S.L.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2011). *Principios de Anatomía y Fisiología*. DF., México: Editorial Panamericana, S.A deC.V.
- Wesley, K. (2017). *Huszar. Interpretación del ECG: monitorización y 12 derivaciones, 5.ª ed.* Barcelona, España: Elsevier España.