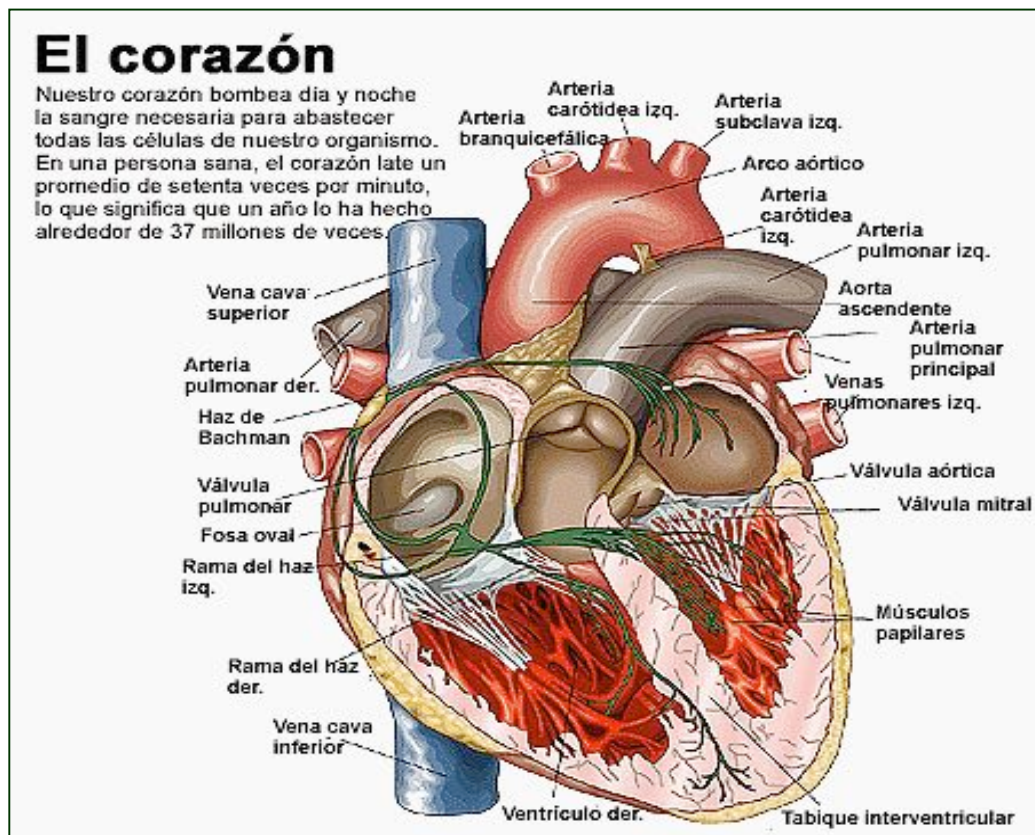


FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

ESTRUCTURA DEL CORAZÓN

El corazón es el órgano encargado de impulsar la sangre por todo el organismo. La contracción de su masa muscular (miocardio), permite la circulación de la sangre a través de los vasos sanguíneos.



FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Consta de 4 cavidades: dos aurículas, que reciben sangre venosa, y dos ventrículos, que expulsan la sangre a las arterias.

El ventrículo derecho bombea la sangre a los pulmones, donde la sangre se oxigena; el ventrículo izquierdo bombea la sangre oxigenada a todo el cuerpo.

La aurícula y el ventrículo derechos (*bomba derecha*) están separados de las cavidades izquierdas, aurícula y ventrículo (*bomba izquierda*) por una pared muscular o tabique. En condiciones normales, este tabique evita que se mezcle la sangre de los dos lados del corazón (en el lado derecho está la sangre poco oxigenada, y en el lado izquierdo está la sangre muy oxigenada).

Entre las aurículas y los ventrículos existe una capa de tejido conjuntivo denso que se conoce con el nombre de esqueleto fibroso del corazón. Los haces de células miocárdicas de las aurículas se anclan en el borde superior de este esqueleto fibroso, mientras que los haces de las células miocárdicas de los ventrículos se anclan en el borde inferior. El resultado es que los miocardios de las aurículas y los ventrículos están estructural y funcionalmente separados entre sí, y es necesario un tejido especial de conducción para transportar los potenciales de acción desde las aurículas a los ventrículos.

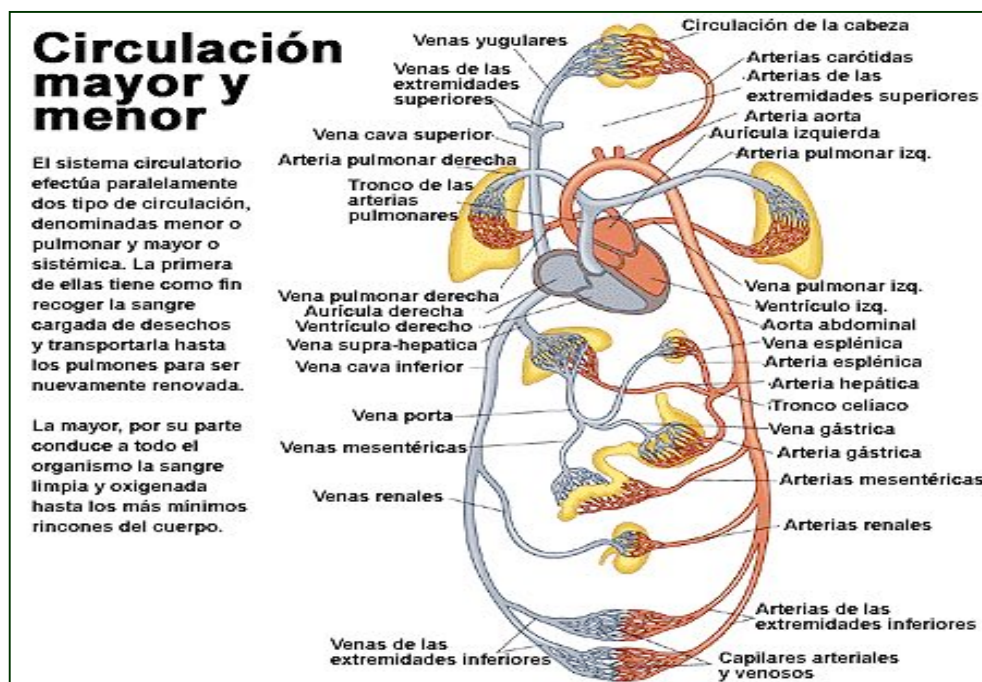
CIRCULACIÓN PULMONAR Y SISTÉMICA

La sangre cuyo contenido de oxígeno se ha agotado parcialmente y cuyo contenido en dióxido de carbono se ha incrementado como consecuencia del metabolismo tisular regresa a la aurícula derecha. Esta sangre penetra en el ventrículo derecho a través de una válvula unidireccional denominada tricúspide. El ventrículo derecho bombea la sangre al tronco de arteria pulmonar y a las arterias pulmonares derecha e izquierda, las cuales se van ramificando hasta llegar a los capilares pulmonares, donde se realiza el intercambio gaseoso con los alvéolos pulmonares. La sangre, una vez oxigenada, vuelve a la aurícula izquierda por las venas pulmonares. Este trayecto de la sangre

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

desde el ventrículo derecho hasta la aurícula izquierda se denomina **circulación pulmonar o circulación menor**.

La sangre bien oxigenada de la aurícula izquierda penetra en el ventrículo izquierdo, a través de la válvula mitral, y luego es bombeada a una arteria muy grande y elástica denominada aorta, de la que saldrán múltiples ramas arteriales que distribuirán la sangre por todos los sistemas orgánicos. La sangre, una vez realizado el intercambio gaseoso a nivel tisular, volverá a la aurícula derecha empobrecida en oxígeno y rica en dióxido de carbono, iniciándose un nuevo ciclo cardíaco. Este trayecto de la sangre desde el ventrículo izquierdo hasta la aurícula derecha se denomina **circulación sistémica o circulación mayor**.



Las numerosas arterias musculares pequeñas y las arteriolas de la circulación sistémica presentan una resistencia mayor al flujo sanguíneo que la que existe en la circulación pulmonar. A pesar de estas diferencias de resistencia, la velocidad del flujo sanguíneo a través de la circulación general tiene que ser pareja con el flujo sanguíneo de la circulación pulmonar, por lo cual el trabajo del ventrículo izquierdo debe ser mayor

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

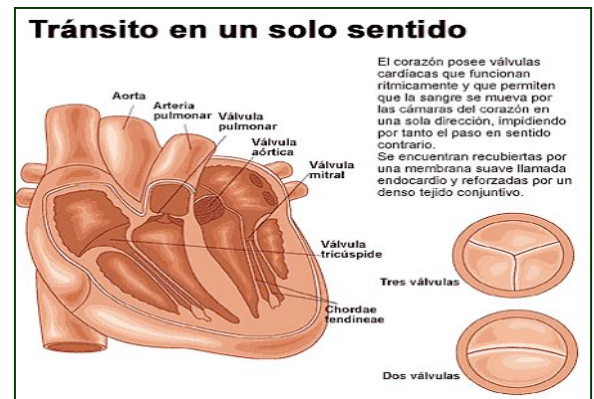
que el realizado por el ventrículo derecho. Esta diferencia de trabajo hace que el ventrículo izquierdo tenga un mayor espesor (8-10 mm) que el derecho (2-3 mm).

FLUJO INTRACARDÍACO. VÁLVULAS CARDÍACAS

El flujo adecuado de la sangre en el interior del corazón se produce por dos pares de válvulas unidireccionales:

✓ Válvulas auriculoventriculares (AV):

- Válvula **tricúspide**: Entre aurícula derecha y ventrículo derecho.
- Válvula **mitral**: Entre aurícula izquierda y ventrículo izquierdo.



✓ Válvulas semilunares:

- Válvula **pulmonar**: Entre ventrículo derecho y tronco arteria pulmonar.
- Válvula **aórtica**: Entre ventrículo izquierdo y aorta.

Las válvulas AV permiten que la sangre fluya de las aurículas a los ventrículos impidiendo, en condiciones normales, el flujo retrógrado de la sangre a las aurículas. La apertura y cierre de estas válvulas se produce como consecuencia de las diferencias de presión existentes entre las aurículas y los ventrículos.

- ✓ Cuando los ventrículos están relajados, el retorno venoso de la sangre a las aurículas hace que la presión de las aurículas supere a la de los ventrículos. Por lo tanto, las válvulas AV se abren, permitiendo que la sangre penetre en los ventrículos.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

- ✓ Cuando los ventrículos se contraen, la presión intraventricular se eleva por encima de la presión de las aurículas y se cierran las válvulas AV.

Existe el peligro de que la presión elevada producida por la contracción de los ventrículos empuje las aletas valvulares demasiado y las revierta; para evitar esto, existen unos músculos situados en el interior de los ventrículos y que están conectados a las aletas valvulares mediante fuertes cuerdas tendinosas. Éstos son los **músculos papilares**.

La contracción de los músculos papilares se produce de forma simultánea a la contracción de las paredes musculares de los ventrículos y sirve para mantener fuertemente cerradas las aletas valvulares.

Por su parte las válvulas semilunares unidireccionales se abren durante la contracción ventricular, permitiendo que la sangre penetre en las circulaciones pulmonar y general. Durante la relajación ventricular, cuando la presión de las arterias supera la presión de los ventrículos, las válvulas semilunares se cierran, impidiendo el flujo retrógrado de la sangre al interior de los ventrículos.

CICLO CARDÍACO

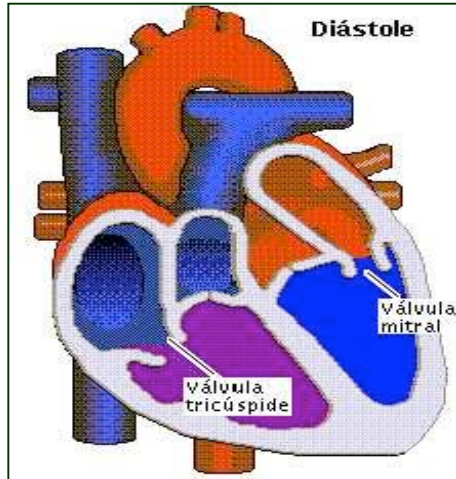
El ciclo cardíaco consiste en el patrón repetido de contracción y relajación del corazón.

- ✓ La fase de contracción se denomina **sístole**.
- ✓ La fase de relajación se denomina **diástole**.

Aunque existe una sístole y diástole auricular y ventricular, cuando se habla de sístole o de diástole se hace referencia a la sístole o diástole ventricular.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

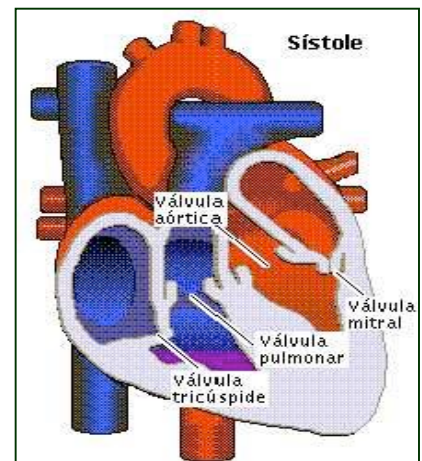
La contracción auricular se produce hacia el final de la diástole, cuando los ventrículos están relajados; cuando los ventrículos se contraen durante la sístole, las aurículas están relajadas.



El corazón tiene, por lo tanto, una acción de bombeo de dos etapas. Las aurículas derecha e izquierda se contraen de forma casi simultánea, seguidas de la contracción de los ventrículos derecho e izquierdo 0.1 a 0.2 segundos más tarde. Durante el tiempo en que están relajadas tanto las aurículas como los ventrículos, el retorno venoso de sangre llena las aurículas. La generación de presión resultante hace

que se abran las válvulas AV y que la sangre fluya de las aurículas a los ventrículos. Se ha calculado que los ventrículos se llenan aproximadamente un 80% antes de que se contraigan las aurículas. La contracción de las aurículas añade el último 20% del **volumen telediastólico**, que es el volumen total de sangre presente en los ventrículos al final de la diástole.

La contracción de los ventrículos en la sístole expulsa aproximadamente dos tercios de la sangre que contienen (volumen latido) dejando un tercio de la cantidad inicial en el ventrículo como **volumen telesistólico**, que es el volumen de sangre presente en los ventrículos al final de la sístole.

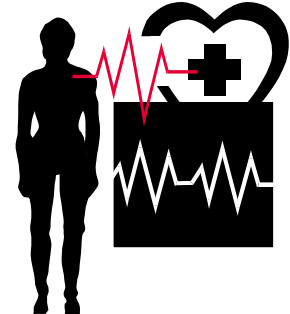


El cierre de las válvulas AV y semilunares produce sonidos que se pueden oír escuchando a través de un estetoscopio colocado sobre el tórax.

- ✓ El **primer tono** lo produce el **cierre de las válvulas AV** durante la contracción isovolumétrica de los ventrículos.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

- ✓ El **segundo tono** se produce por el **cierre de las válvulas semilunares** cuando la presión de los ventrículos desciende por debajo de la presión de las arterias.



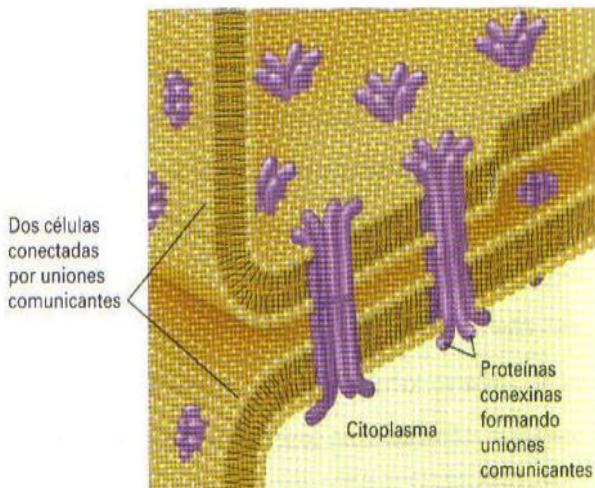
ACTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CORAZÓN

A diferencia del músculo esquelético, el miocardio tiene capacidad intrínseca para generar contracciones espontáneas en ausencia de estímulos neurales o endocrinos. Este automatismo contráctil del corazón es consecuencia de un automatismo eléctrico, es decir, la capacidad de generar de forma automática potenciales eléctricos a intervalos regulares. Las células miocárdicas son cortas, ramificadas y están conectadas entre sí por uniones comunicantes (*gap junctions*). Estas uniones comunicantes actúan como sinapsis eléctricas, es decir transfieren el potencial de acción **sin mediar neurotransmisor**.

El miocardio es una unidad funcional única, los potenciales de acción que se originan en cualquier célula de la masa se pueden transmitir a todas las demás células.

Ya se ha comentado con anterioridad que los miocardios de aurículas y ventrículos están separados por el esqueleto fibroso. El impulso eléctrico inicial que produce la contracción miocárdica, se origina normalmente en una

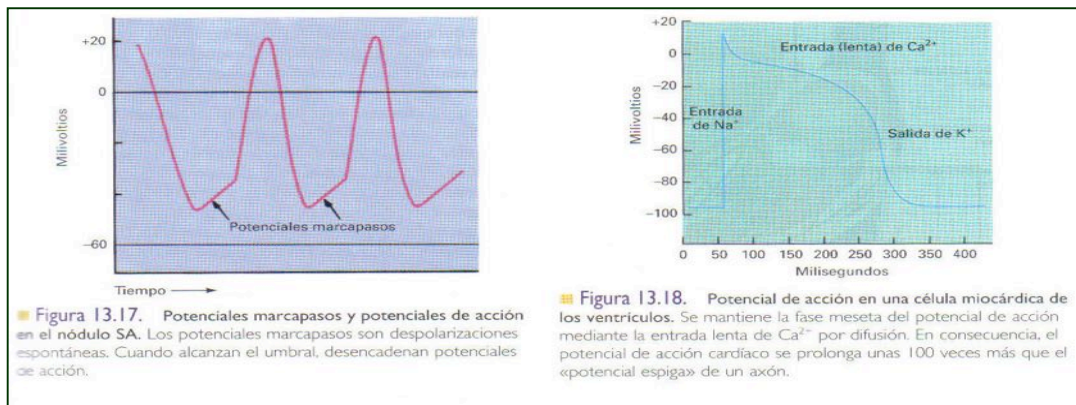
región del corazón denominada **marcapasos**. Esta región se localiza en las aurícula derecha, en el nodo sinoauricular. Por tanto, en condiciones normales durante la contracción el miocardio auricular se excita antes que el ventricular.



FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

El **nódulo sinoauricular** o **nódulo SA** (marcapasos normal del corazón) se encuentra en la aurícula derecha, cerca de la desembocadura de la vena cava superior.

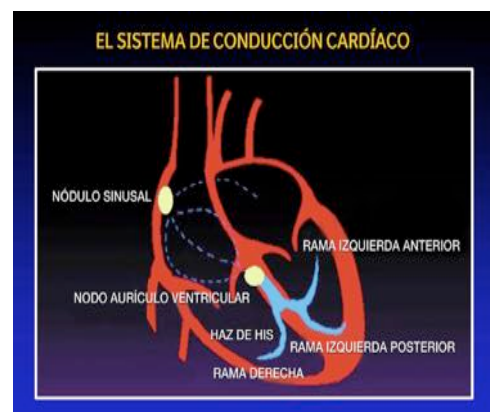
Las células del nódulo SA no mantienen el potencial de reposo de membrana como lo hacen las neuronas o las células musculares esqueléticas en reposo. Durante el período de la diástole, el nódulo SA exhibe una despolarización espontánea lenta que se denomina **potencial marcapasos**.



Tejidos conductores del corazón

Los potenciales de acción que se originan en el nódulo SA se propagan a las células miocárdicas adyacentes de la aurícula derecha e izquierda a través de las uniones comunicantes que existen entre estas células. Sin embargo, como el miocardio de las aurículas está separado del miocardio ventricular por el esqueleto fibroso del corazón, el impulso no se puede conducir de forma directa desde las aurículas a los ventrículos. Para ello es necesario el tejido de conducción especializado, compuesto por células miocárdicas modificadas. Estas células especializadas forman:

- ✓ Nódulo auriculoventricular (nódulo AV).
- ✓ Haz auriculoventricular (Haz de His).



FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

- Rama derecha haz de His.
- Rama izquierda haz de His.

✓ Fibras de Purkinje.

Las fibras de Purkinje están situadas en el interior de las paredes ventriculares. La estimulación de estas fibras causa la contracción simultánea de los dos ventrículos y la expulsión de sangre hacia las circulaciones pulmonar y general.

La despolarización de las células miocárdicas estimula la apertura de los canales del Ca^{2+} regulados por voltaje en el sarcolema, lo cual permite que el calcio difunda a favor de un gradiente de concentración hacia el interior de la célula. Además, la entrada del calcio estimula, a su vez, la salida de calcio desde el interior del retículo sarcoplásmico al sarcoplasma.

Una vez el calcio está en el citoplasma miocárdico (sarcoplasma), se une a la troponina y estimula la contracción al liberar los puntos de unión de la actina a la miosina. El resultado es que **las células miocárdicas se contraen cuando se despolarizan.**

Durante la repolarización, la concentración citoplasmática de calcio disminuye por el transporte activo de éste hacia el exterior de la célula atravesando el sarcolema (mediante intercambiador de Na^+ - Ca^{2+}) y por transporte activo de calcio al interior de las cisternas del retículo sarcoplásmico. Esto permite que se produzca la **relajación durante la repolarización.**

El corazón normalmente no puede estimularse de nuevo hasta después de que se ha relajado de su contracción precedente, debido a que las células miocárdicas tienen períodos refractarios largos que corresponden con la duración prolongada de sus potenciales de acción. De este modo se impide la sumación de las contracciones y el

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

miocardio tiene que relajarse después de cada contracción. De este modo, se asegura la acción rítmica de bombeo del corazón.

Electrocardiograma

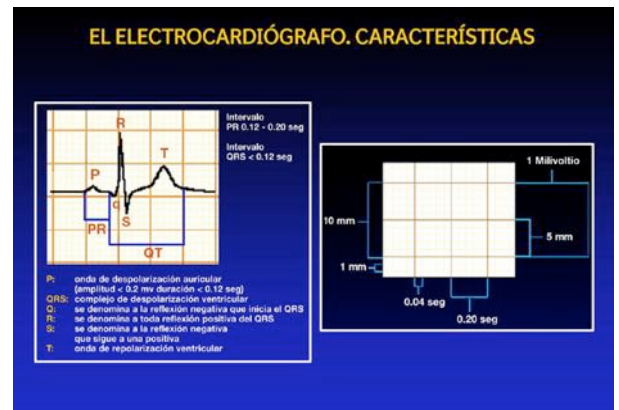
El cuerpo es un buen conductor de electricidad porque los líquidos tisulares poseen una concentración elevada de iones que se mueven en respuesta a diferencias de potencial. Las diferencias de potencial generadas por el corazón son conducidas por lo tanto hacia la superficie del cuerpo, donde pueden registrarse

mediante electrodos superficiales situados sobre la piel. El registro obtenido de esta manera se denomina electrocardiograma y el dispositivo de registro electrocardiógrafo.

Existen dos tipos de electrodos de registro del ECG o derivaciones.

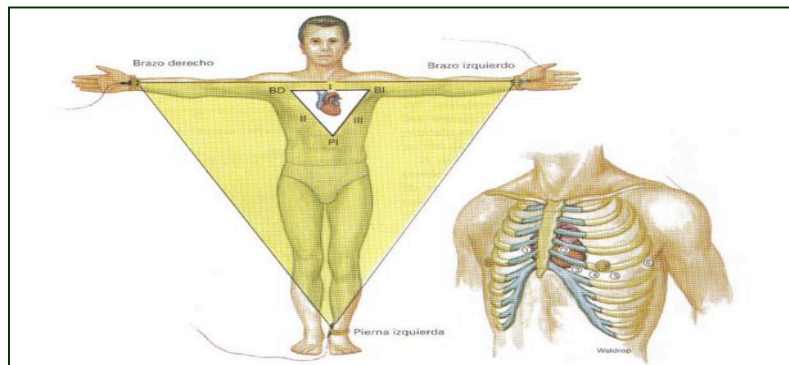
- ✓ Las derivaciones bipolares de las extremidades: Registran el voltaje que existe entre los electrodos colocados en las muñecas y las piernas.
 - I: Brazo derecho y brazo izquierdo.
 - II: Brazo derecho y pierna izquierda.
 - III: Brazo izquierdo y pierna izquierda.

- ✓ Las derivaciones unipolares: Registran el voltaje entre un único electrodo explorador situado sobre el cuerpo y un electrodo incorporado al electrocardiógrafo y que se mantiene a un potencial de cero (tierra).
 - Derivaciones unipolares de las extremidades:
 - AVR: Brazo derecho.
 - AVL: Brazo izquierdo.
 - AVF: Pierna izquierda.



FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

- Derivaciones unipolares del tórax:
 - V₁: Cuarto espacio intercostal a la derecha del esternón.
 - V₂: Cuarto espacio intercostal a la izquierda del esternón.
 - V₃: Quinto espacio intercostal a la izquierda del esternón.
 - V₄: Quinto espacio intercostal en la línea medioclavicular.
 - V₅: Quinto espacio intercostal en la línea axilar anterior.
 - V₆: Quinto espacio intercostal en la línea axilar media.

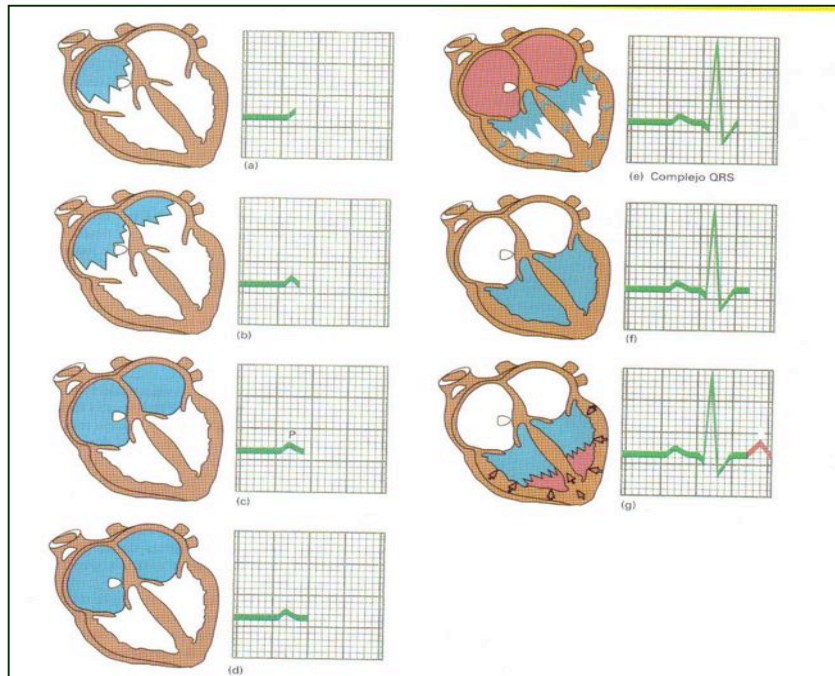


Cada ciclo cardíaco produce tres ondas en el ECG denominadas P, QRS y T. Estas ondas no son potenciales de acción; representan variaciones del potencial entre dos regiones de la superficie del corazón producidas por los efectos compuestos de los potenciales de acción de numerosas células miocárdicas.

- ✓ La **onda p** es consecuencia de la **despolarización auricular**.
- ✓ La **onda QRS** es consecuencia de la **despolarización ventricular**.
- ✓ La **onda T** es consecuencia de la **repolarización ventricular**.
- ✓ La onda de repolarización auricular no se observa en el registro del ECG, pues queda ocultada por la onda QRS de despolarización ventricular.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

La relación entre la conducción del impulso en el corazón y el ECG queda ilustrada en la siguiente figura:



Gasto cardíaco

El gasto cardíaco es el volumen de sangre que bombea por minuto cada ventrículo.

$$\text{Gasto cardíaco} = \text{Volumen sistólico} \times \text{Frecuencia cardíaca}$$

(ml/min)	(ml/lat)	(lat/min)
----------	----------	-----------

La frecuencia cardíaca promedio en reposo en un adulto es de 70 latidos por minuto, y el volumen sistólico promedio es de 70-80 ml. El producto de ambas variables da como resultado un gasto cardíaco promedio de 5,5 l/min. Como el volumen total de sangre también es aproximadamente 5,5 l, esto significa que **cada ventrículo realiza el bombeo de una cantidad equivalente al volumen sanguíneo total durante cada minuto en condiciones de reposo.**

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

El incremento del gasto cardíaco que ocurre, por ejemplo, durante el ejercicio físico se debe acompañar por tanto de un aumento de la velocidad del flujo de sangre a través de la circulación. Este incremento de la velocidad se consigue mediante **factores que regulan la frecuencia cardíaca y el volumen sistólico**.

Regulación de la frecuencia cardíaca

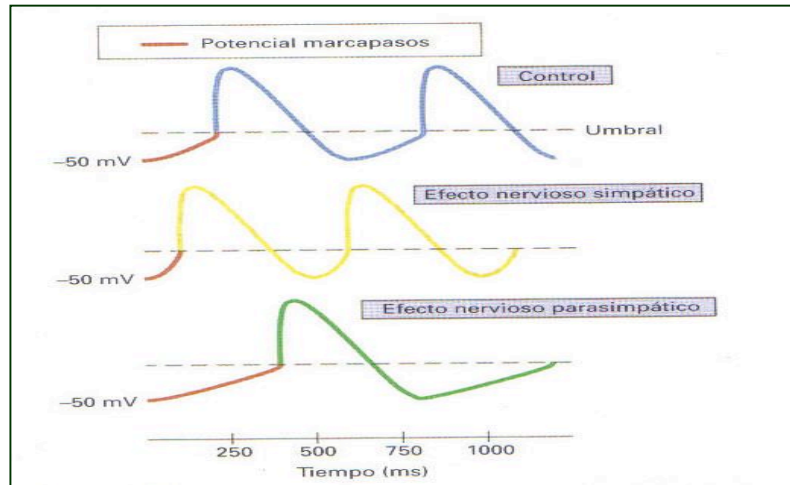
En ausencia completa de estimulación nerviosa, el corazón sigue latiendo según el ritmo establecido por el nódulo sinoauricular (SA).

Las fibras nerviosas simpáticas y del vago (parasimpáticos) que alcanzan el corazón muestran normalmente una actividad continua y modifican la tasa de despolarización espontánea del nódulo SA.

- ✓ La **noradrenalina**, que es liberada principalmente por las terminaciones nerviosas simpáticas, y la **adrenalina** que es segregada por la médula suprarrenal, estimulan la **apertura de los canales del Na⁺ y del Ca²⁺** localizados en la membrana plasmática de las células marcapasos del nódulo SA.
- ✓ La **acetilcolina** liberada de las terminaciones parasimpáticos induce la **apertura de los canales del K⁺** en las células marcapasos, con lo que se produce la hiperpolarización del nódulo SA y, por tanto, la disminución de su tasa de excitación espontánea.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

En consecuencia, el ritmo del corazón se establece por la tasa de despolarización espontánea del nódulo SA. Esta despolarización espontánea se denomina potencial marcapasos, y su frecuencia aumenta por la estimulación nerviosa simpática y disminuye por la acción inhibitoria del sistema parasimpático tal como muestra la siguiente figura:



Efecto cronotrope positivo: Aumento de la frecuencia cardíaca.

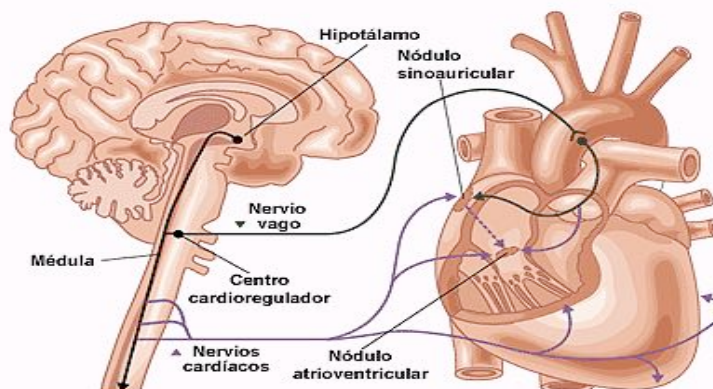
Efecto cronotrope negativo: Disminución de la frecuencia cardíaca.

Efecto inotrópico positivo: Aumento de la contractilidad.

Efecto inotrópico negativo: Disminución de la contractilidad.

Bajo control

El corazón está controlado por el sistema nervioso, específicamente por el nervio vago que impone un ritmo constante de alrededor de 70 latidos por minuto. Cuando aumenta la actividad física o la tensión, el hipotálamo manda la orden para acelerar el ritmo cardíaco y proporcionar así mayor cantidad de sangre oxigenada a los músculos.



Durante el ejercicio, la frecuencia cardiaca aumenta debido a la disminución de la inhibición del nódulo SA por parte del nervio vago. Y la existencia de bradicardia en reposo en los deportistas de resistencia se debe principalmente al incremento de la actividad del nervio vago.

La actividad de la inervación autónoma del corazón está coordinada por el **centro de control cardíaco** localizado en el **bulbo raquídeo** del tronco encefálico. A su vez, este centro de control cardíaco está influido por áreas cerebrales superiores (**hipotálamo**) y por los estímulos sensitivos de retroacción procedentes de los receptores de presión, o **barorreceptores**, localizados en la aorta y en las arterias carótidas.

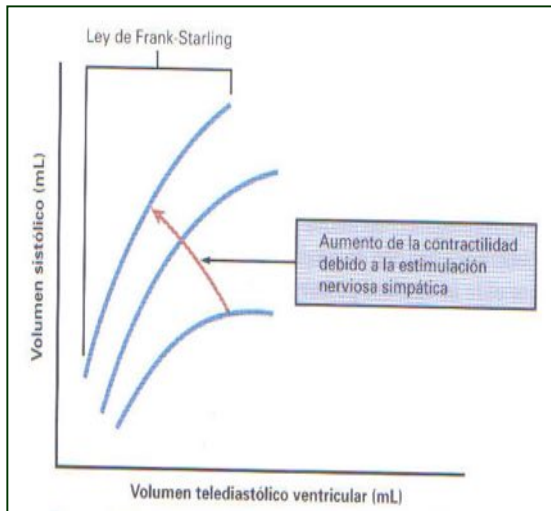
De esta manera, la disminución de la presión sanguínea puede dar lugar a un incremento reflejo de la frecuencia cardiaca.

Regulación del volumen sistólico

El volumen sistólico está regulado por tres variables:

1. **Volumen telediastólico o precarga:** volumen de sangre existente en los ventrículos al final de la diástole. El volumen sistólico es directamente proporcional al volumen telediastólico, es decir a más volumen telediastólico más volumen sistólico resultante.
2. **Resistencia periférica total o postcarga:** Resistencia de rozamiento o impedancia que presenta el flujo de sangre en las arterias. El volumen sistólico es inversamente proporcional a la resistencia o postcarga; es decir, cuanto mayor sea la postcarga, menos volumen sistólico será el resultante.

3. **Contractilidad:** Fuerza de contracción ventricular. El volumen sistólico es directamente proporcional a la contractilidad; a más fuerza de contracción más volumen sistólico resultante.



Hemos dicho que cuanto mayor es la resistencia periférica total, menor es el volumen sistólico; pero hemos de hacer una apreciación: esta disminución del volumen sistólico en respuesta a la elevación de las resistencias periféricas sólo tiene lugar durante unos pocos latidos. Poco después, el corazón sano puede compensar el incremento de la

resistencia periférica mediante un latido más intenso. Esta compensación tiene lugar a través del mecanismo descrito en **la Ley de Frank-Starling**.

Normalmente, la fuerza de contracción es suficiente para la expulsión de 70-80 ml de sangre de un volumen telediastólico total de 110-130 ml. Así **la fracción de eyección es de aproximadamente el 60%**.

A medida que aumenta el volumen telediastólico también se eleva la cantidad de sangre bombeada, de manera que la **fracción de eyección permanece constante**. Para que esto se produzca la fuerza de la contracción ventricular debe aumentar a medida que lo hace el volumen telediastólico.

El control intrínseco de la fuerza de contracción y del volumen sistólico se debe a variaciones en el grado con que el miocardio se estira por el volumen telediastólico. A medida que éste aumenta dentro de su intervalo fisiológico, el miocardio sufre un estiramiento progresivo y, debido a ello, se contrae con más fuerza.

El control extrínseco de la contractilidad es determinado por el sistema simpático-suprarrenal. La noradrenalina de las terminaciones nerviosas simpáticas y la adrenalina de la médula suprarrenal dan lugar a un incremento de la fuerza de contracción. Este

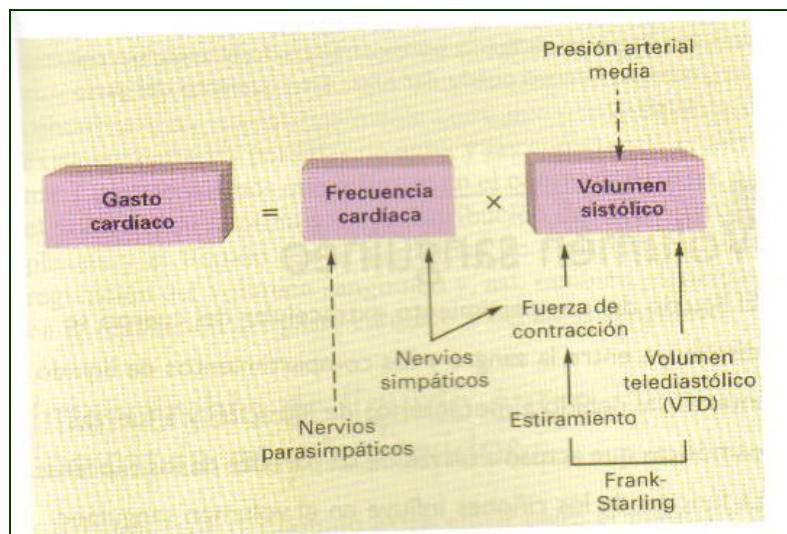
FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

efecto inotrópico positivo se debe al aumento de la cantidad de Ca^{2+} disponible para los sarcómeros.

De esta manera, el gasto cardíaco está influenciado por la actividad del sistema simpático-suprarrenal a través de dos mecanismos:

1. Por el efecto inotrópico positivo sobre la contractilidad.
2. Por el efecto cronotrópico positivo sobre la frecuencia cardíaca.

La estimulación ejercida por las terminaciones nerviosas parasimpáticas sobre el nódulo SA y sobre el tejido de conducción induce un efecto cronotrópico negativo pero no influye de manera directa en la fuerza de contracción de los ventrículos. No obstante, el aumento del volumen telediastólico debido a la disminución de la frecuencia cardíaca puede aumentar la fuerza de contracción a través del mecanismo de Frank-Starling.



VASOS SANGUÍNEOS

Los vasos sanguíneos forman una red tubular por todo el cuerpo que permite que la sangre fluya desde el corazón a todas las células del organismo y regrese luego al corazón.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

La sangre que abandona el corazón pasa a través de vasos de diámetros progresivamente menores, que se denominan arterias, arteriolas y capilares. Estos últimos son los que realizan el intercambio de gases y nutrientes, y enlazan con la circulación de retorno: vénulas y venas.



Arterias

Una arteria es aquel vaso sanguíneo que transporta la sangre **desde** el corazón, o bien hacia los pulmones (en el caso de la circulación pulmonar), o bien hacia el resto del organismo (circulación sistémica). No es preciso que la sangre arterial esté oxigenada, como ocurre en las arterias pulmonares, las cuales presentan sangre pendiente de ser oxigenada en los pulmones.

En la aorta y otras grandes arterias, existen numerosas capas de fibras de elastina entre las células musculares lisas de la túnica media. Estas grandes arterias elásticas se expanden cuando se eleva la presión sanguínea como resultado de la contracción cardiaca, y se retraen cuando cae la presión durante la relajación de los ventrículos.

Las arterias pequeñas y las arteriolas son menos elásticas y su capa de músculo liso es mayor en proporción con sus diámetros. Como éstas tienen diámetro menor, son las que oponen mayor resistencia al flujo sanguíneo de todo el sistema arterial.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Las arterias musculares pequeñas que tienen 100 micras de diámetro o menos, se ramifican para formar arteriolas (20-30 micras de diámetro). La sangre de éstas pasa a los capilares (7-10 micras) ramificándose ampliamente, de tal forma que ninguna célula del cuerpo se encuentra a más de 60 micras de distancia de cualquier capilar. Esto representa una superficie corporal de intercambio de nutrientes y gases entre sangre y líquido tisular de aproximadamente 2500 Km².

La cantidad de sangre que fluye a través de un lecho capilar determinado depende fundamentalmente de la resistencia al flujo sanguíneo en las pequeñas arterias y arteriolas que suministran sangre a ese lecho capilar. La vasoconstricción en estos vasos disminuye por lo tanto el flujo sanguíneo al lecho capilar, mientras que la vasodilatación aumenta el flujo sanguíneo. En algunos órganos, como el intestino, el flujo sanguíneo puede también estar regulado por bandas musculares circulares denominadas **esfínteres precapilares** situados en el origen de los capilares.

A diferencia de los vasos de los sistemas arterial y venoso, las paredes de los capilares están formadas solamente por una capa de células denominada **endotelio**. La ausencia de músculo liso y de capas de tejido conjuntivo permite un intercambio más rápido de materiales entre sangre y tejidos.

Tipos de capilares

Según su revestimiento endotelial consideramos tres tipos de capilares:

- Continuos.
- Perforados.
- Discontinuos.

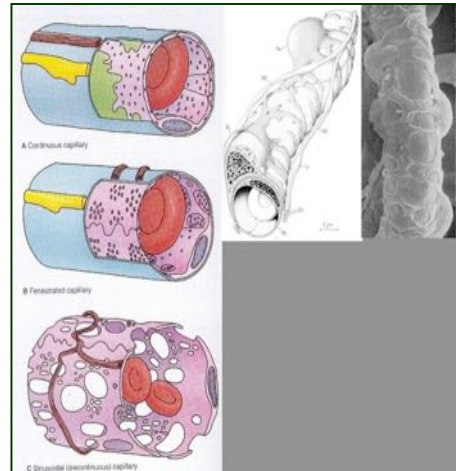
Los **capilares continuos** son aquellos en los que las células endoteliales vecinas están estrechamente unidas entre sí. Se encuentran principalmente en los músculos, los pulmones, el tejido adiposo y el sistema nervioso central, donde la falta de canales intercelulares en estos capilares contribuye a formar la barrera hematoencefálica, con lo cual el mecanismo de transporte a través de la membrana, en estos casos, sólo

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

puede producirse por endocitosis. En músculos, pulmones y tejido adiposo sí que existen canales intracelulares estrechos (40-45 Å de anchura), los cuales permiten el paso de moléculas más pequeñas que las proteínas entre la sangre capilar y el líquido tisular.

Los **capilares perforados** se caracterizan por la presencia de amplios poros intercelulares (800-1000 Å). Se encuentran en los riñones, las glándulas endocrinas y los intestinos.

Los **capilares discontinuos** se encuentran en la médula ósea, el hígado y el bazo. En estos capilares, la distancia entre las células endoteliales es tan grande que incluso tienen el aspecto de pequeñas cavidades o sinusoides en el interior del órgano.



Venas

Las venas son vasos sanguíneos que transportan la sangre **hacia** el corazón, ya sea desde los pulmones (circulación pulmonar) o bien desde el resto del organismo (circulación sistémica). Las venas pulmonares, que transportan sangre oxigenada procedente de los pulmones. El resto de venas transportan sangre poco oxigenada procedente de los tejidos periféricos después del intercambio a nivel capilar.

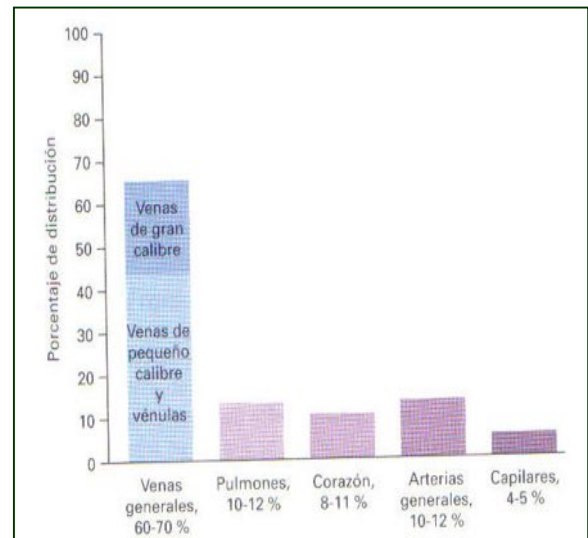
La mayor parte del volumen sanguíneo total está contenido en el sistema venoso. A diferencia de las arterias, que proporcionan la resistencia al flujo de la sangre procedente del corazón, las venas son capaces de expandirse a medida que acumulan mayores cantidades de sangre. Son **vasos de capacidad**.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Las venas presentan paredes musculares más delgadas que las de las arterias; por tanto, muestran una mayor **distensibilidad**.

Esto quiere decir que una presión de intensidad determinada da lugar a una distensión (expansión) mayor en las venas que en las arterias, de manera que las venas pueden contener más sangre. Aproximadamente las 2/3 partes del volumen sanguíneo total se encuentra en el interior de las venas.

Por eso a éstas se las llama **vasos de capacidad**, y a las arterias **vasos de resistencia**.



Aunque las venas contienen casi el 70% del volumen sanguíneo total, la presión venosa media es de sólo 2 mmHg, mientras que la presión arterial media es de 90-100 mmHg.

La presión venosa es mayor en las vénulas (10 mmHg) y menor en la zona de unión de las venas cava con la aurícula derecha (0 mmHg). Además de por esta diferencia de presión, el retorno venoso al corazón está facilitado por:

- ✓ La actividad nerviosa simpática, que estimula la contracción del músculo liso de las paredes venosas y, así, reduce la distensibilidad.
- ✓ El bombeo ejercido por el músculo esquelético que comprime extrínsecamente las venas durante su contracción.

La diferencia de presión existente entre las cavidades torácica y abdominal, que facilita el retorno del flujo venoso al corazón. Además, la contracción del diafragma durante la inspiración también mejora el retorno venoso. El diafragma desciende a medida que se contrae, por lo que incrementa el volumen torácico y disminuye el volumen

abdominal. Así se origina un vacío parcial de la cavidad torácica y se crea un aumento de la presión en la cavidad abdominal. De esta manera, la diferencia de presiones que tiene lugar favorece el flujo sanguíneo desde las venas abdominales a las torácicas

Vasos linfáticos

El sistema linfático está formado por un líquido llamado **linfa** que influye por el interior de los vasos linfáticos, por varias estructuras y órganos que contienen tejido linfático y por la médula ósea que es el lugar de donde proceden los linfocitos.

El líquido intersticial y la linfa son básicamente iguales; la principal diferencia entre ellos es su localización. Una vez que el líquido pasa del tejido intersticial a los vasos linfáticos recibe el nombre de linfa.

El tejido linfático es una forma especializada de tejido conjuntivo reticular que contiene grandes cantidades de linfocitos.

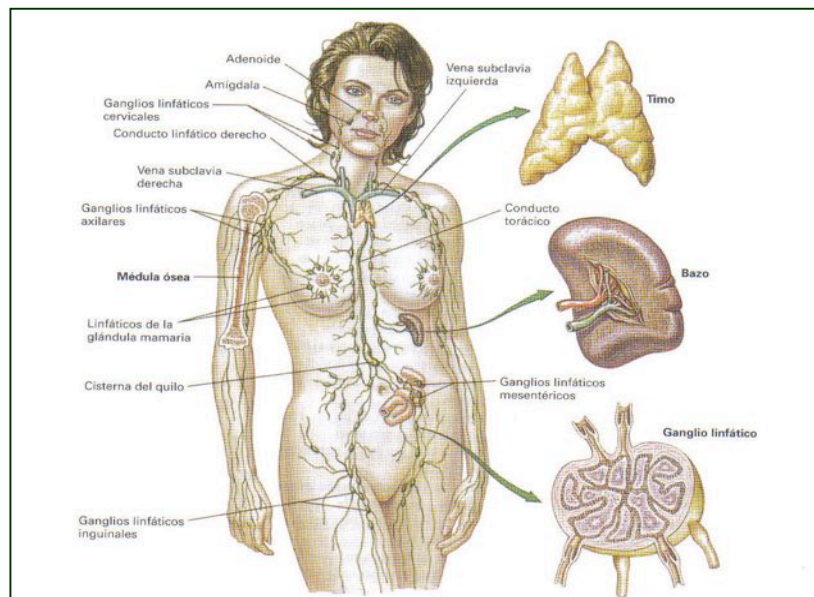
El sistema linfático presenta varias funciones:

1. **Drenaje de líquido intersticial** sobrante en los espacios de los tejidos.
2. **Transporte de las grasas** de la dieta (lípidos y vitaminas liposolubles).
3. **Protección contra la invasión**, es decir respuestas inmunitarias producidas por los linfocitos.

Los vasos linfáticos comienzan como vasos de extremo ciego llamados **capilares linfáticos**, que se encuentran en los espacios intersticiales. Los capilares linfáticos convergen para dar lugar a tubos de mayor calibre llamados **vasos linfáticos**. Éstos tienen una estructura muy parecida a las venas, pero con unas paredes mucho más finas y con mayor número de válvulas.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Situadas a intervalos a lo largo de los vasos linfáticos existen unas estructuras llamadas **ganglios linfáticos** por donde circula la linfa. Estos ganglios contienen fagocitos, que ayudan a eliminar patógenos, y centros germinativos que son lugares de producción de linfocitos.



En la piel, los vasos linfáticos se encuentran en el tejido subcutáneo y, en general, siguen a las venas. Los vasos linfáticos de las vísceras suelen seguir a las arterias formando plexos alrededor de ellas.

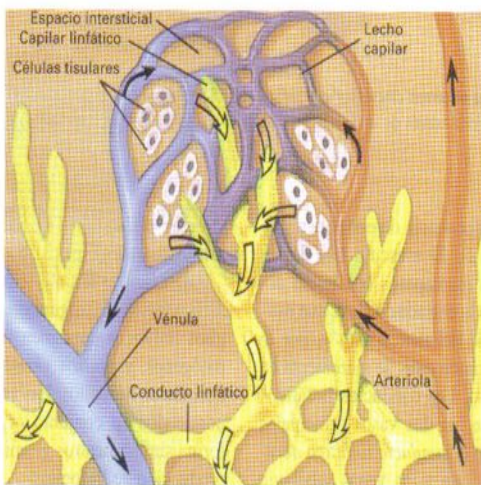
Los capilares linfáticos se encuentran en todo el organismo excepto en:

- ✚ Tejidos avasculares.
- ✚ Sistema nervioso central.
- ✚ Pulpa esplénica.
- ✚ Médula ósea.

Los capilares linfáticos tienen un diámetro ligeramente mayor que los sanguíneos y una estructura especial que permite que el líquido intersticial entre pero no salga de ellos. Los extremos de las células endoteliales que forman la pared de los capilares linfáticos se superponen.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

- Cuando la presión es mayor en el líquido intersticial que en la linfa, las células se separan ligeramente, como una válvula con apertura hacia un solo lado, y el líquido penetra en los capilares linfáticos.
- Cuando la presión es mayor dentro de los capilares que en el líquido intersticial, las células se adhieren de forma más íntima e impiden que la linfa pueda regresar hacia los espacios intercelulares.



Casi todos los componentes del plasma sanguíneo pasan libremente las paredes capilares y forman el líquido intersticial. La cantidad de líquido que sale de los capilares sanguíneos por filtración es mayor que la que vuelve a ellos por absorción. El exceso de líquido, entre 2 y 3 litros al día, drena hacia los vasos linfáticos, convirtiéndose en linfa.

En última instancia, la linfa vuelve a la sangre venosa por medio de los conductos linfáticos derecho e izquierdo que se unen a las venas yugular interna y subclavia.

Como la mayoría de las proteínas del plasma son demasiado grandes como para que puedan abandonar los vasos sanguíneos, el líquido intersticial sólo contiene pequeñas cantidades de las mismas. Sin embargo, las proteínas que escapan de la sangre no pueden volver a ella por difusión; el gradiente de concentración, con un mayor nivel de proteínas en el interior de los capilares sanguíneos, lo impide. Por tanto, una función importante de los vasos linfáticos consiste en devolver las proteínas plasmáticas a la sangre.

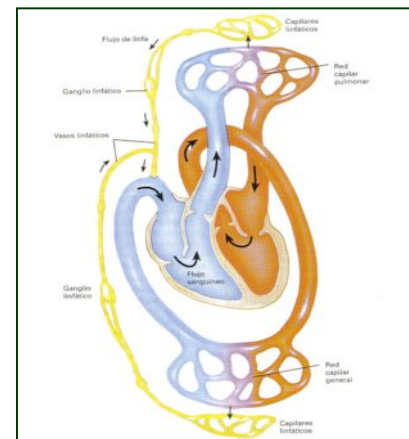
El flujo de la linfa desde los espacios de los tejidos a los grandes conductos linfáticos y a las venas subclavias se efectúa gracias sobre todo a la acción de ordeño de los músculos esqueléticos. Las contracciones de estos músculos comprimen los vasos

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

linfáticos y obligan a la linfa a dirigirse hacia las venas subclavas. Las válvulas de un solo sentido existentes en el interior de los vasos linfáticos impiden el reflujo.

Otro factor que mantiene el flujo linfático son los movimientos respiratorios, pues crean un gradiente de presión entre los dos extremos del sistema linfático. Con cada inspiración, la linfa fluye desde la región abdominal, donde la presión es más alta, hacia la región torácica, donde es menor.

El **conducto torácico** es el principal colector del sistema linfático y recibe la linfa del lado izquierdo de la cabeza, el cuello y el tórax, de la extremidad superior izquierda y de la totalidad de las estructuras situadas por debajo de las costillas. También se denomina conducto linfático izquierdo, tiene una longitud de 40-45 cm y comienza con una dilatación llamada **cisterna del quilo**, situada por delante de la segunda vértebra lumbar.



El **conducto linfático derecho** mide 1-2 cm de largo y drena la linfa procedente de la mitad superior de la parte derecha del cuerpo.

Presión sanguínea

La presión sanguínea está regulada por tres factores:

1. Volumen sanguíneo (volumen sistólico).
2. Frecuencia cardíaca.
3. Resistencia periférica total.

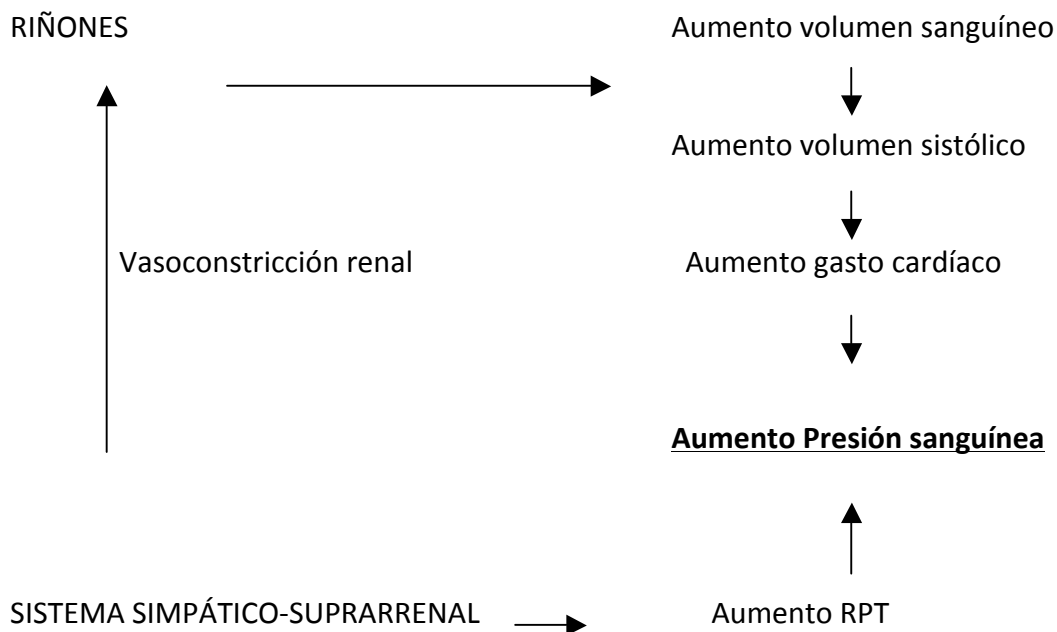
$$\text{PRESIÓN SANGUÍNEA} = \text{GC} \times \text{RPT}$$

GC: Gasto cardíaco = Frecuencia cardíaca x volumen sistólico.

RPT: Resistencia periférica total.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

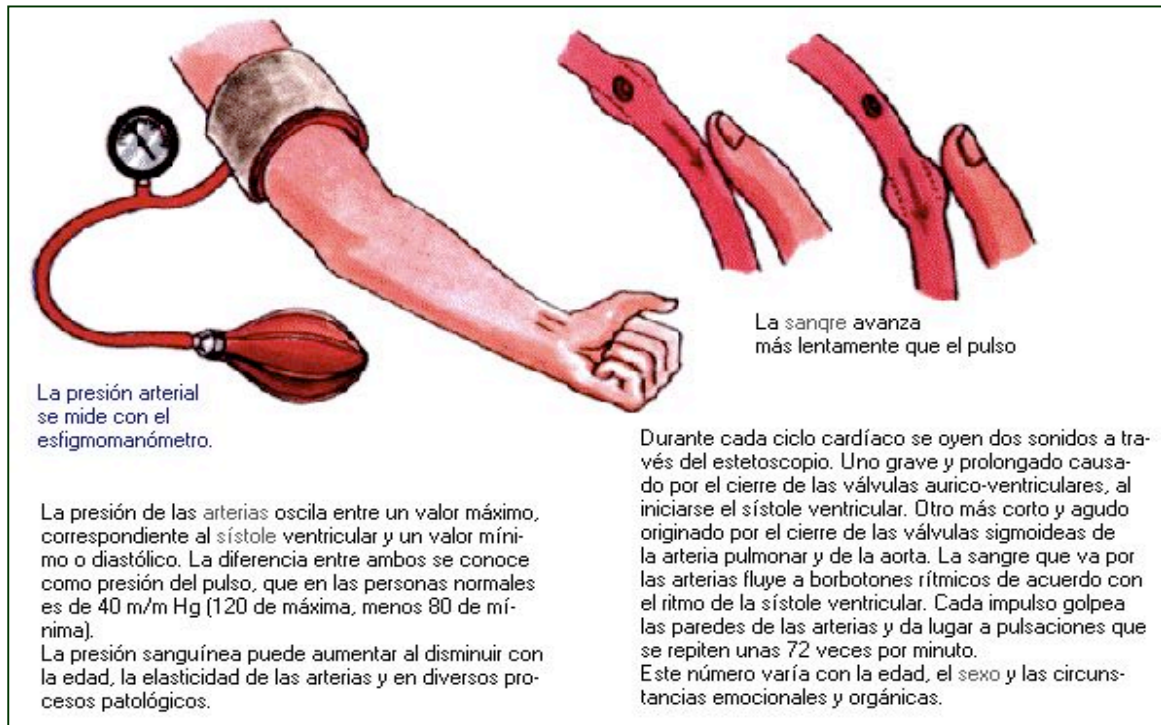
La presión sanguínea puede regularse de esta manera por parte de los riñones, que controlan el volumen sanguíneo y, por tanto, el volumen sistólico, y por el sistema simpático-suprarrenal, el cual puede incrementar la presión arterial mediante la vasoconstricción de las arteriolas, es decir aumentando la resistencia periférica total.



Los instrumentos utilizados para medir la presión sanguínea, denominados **esfigmomanómetros**, contienen un dispositivo de mercurio o un sistema de resorte que está calibrado respecto a instrumentos de mercurio. Por tanto, la presión sanguínea se mide en **milímetros de mercurio (mmHg)**.

El método de medición de presión sanguínea más utilizado es el indirecto o **auscultatorio**, que está fundamentado en la correlación entre la presión sanguínea y los sonidos arteriales.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

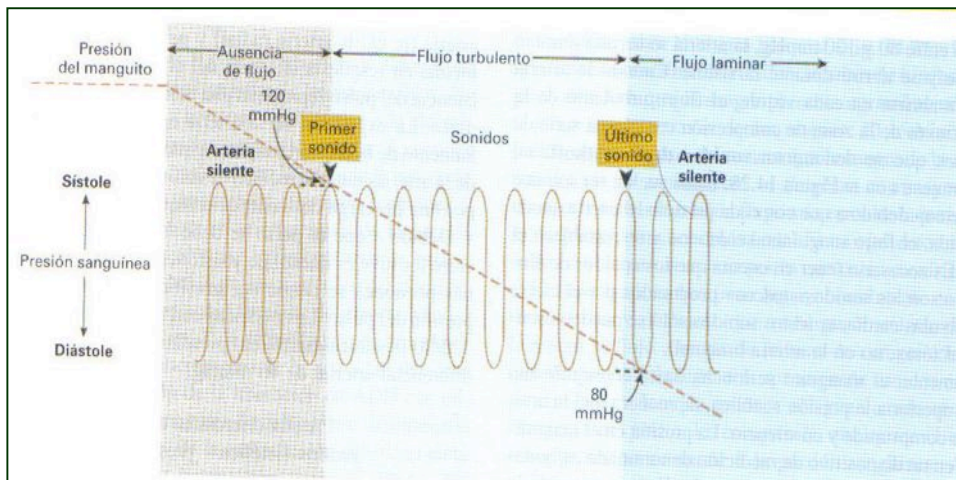
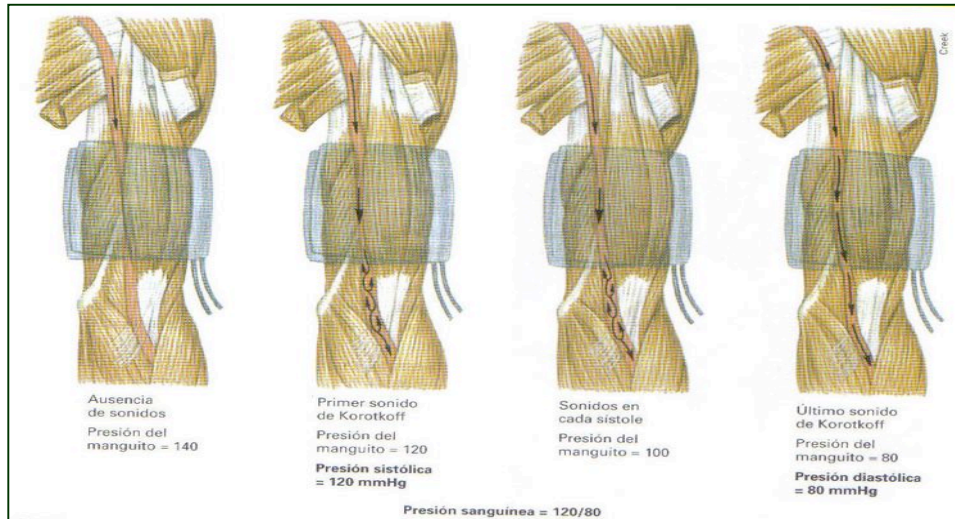


En este método se coloca un manguito hinchable alrededor de la parte superior del brazo y el fonendoscopio se sitúa sobre la arteria braquial. La arteria permanece en silencio antes de hinchar el manguito debido a que la sangre presenta normalmente un flujo laminar suave a través de las arterias, el cual es silencioso. Sin embargo, cuando se comprime la arteria el flujo a través de la zona de compresión se hace turbulento. Esto da lugar a la aparición de sonidos en la arteria similares a los que produce el agua cuando se dobla la manguera del jardín.

La compresión que ejerce el manguito sobre la arteria se opone a la presión sanguínea. Así, para poder comprimir la arteria, la presión del manguito debe ser superior a la presión sanguínea diastólica. Si la presión del manguito también es superior a la presión sistólica, la arteria queda ocluida y permanece en silencio.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Por tanto, el flujo turbulento y los sonidos producidos por la arteria debido a este flujo sólo tienen lugar cuando la presión del manguito es superior a la presión diastólica y inferior a la presión sistólica.



Presión diferencial y presión arterial media

Cuando alguien toma el pulso, lo que hace es palpar una arteria (radial, carótida, femoral) y percibir la expansión de la misma en respuesta al latido del corazón; por tanto, la frecuencia del pulso representa una medida de la frecuencia cardíaca. La

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

expansión de la arteria en cada latido se debe al aumento de la presión sanguínea que tiene lugar en el interior de las arterias cuando reciben el volumen de sangre expulsado por una descarga del ventrículo izquierdo.

Debido a que el pulso se debe al aumento de la presión entre los niveles diastólico y sistólico, la diferencia entre ambas presiones se denomina presión diferencial.

PRESIÓN DIFERENCIAL ARTERIAL = Presión sistólica – Presión diastólica

Las personas con una presión sanguínea de 120/80 presentan, por tanto una presión diferencial arterial de 40 mmHg.

La presión diferencial arterial es un reflejo del volumen sistólico, es decir, una presión diferencial alta implica un volumen sistólico elevado.

Por otra parte, la presión arterial media representa la presión media en las arterias durante el ciclo cardíaco. No se trata de una simple media aritmética, ya que la diástole representa un período mayor que la sístole.

La presión arterial media se puede estimar de manera más correcta añadiendo a la presión diastólica la tercera parte de la presión arterial diferencial.

PRESIÓN ARTERIAL MEDIA = P. diastólica + 1/3 P. Diferencial Arterial

En una persona con TA 120/80, la presión arterial media debe ser aproximadamente $80 + 1/3 (120-80) = 93$ mmHg.

Control de la presión arterial

Es llevada a cabo mediante dos tipos de reflejos:

1. Reflejo barorreceptor.
2. Reflejo de estiramiento auricular.

Los **barorreceptores** son receptores de estiramiento localizados en el **cayado aórtico** y en los **senos carotídeos**.

- ✓ El incremento de la presión da lugar al estiramiento de estas zonas arteriales con incremento de la frecuencia de potenciales de acción en las fibras sensitivas.
- ✓ La disminución de la presión por debajo del intervalo normal da lugar a una reducción de la frecuencia de potenciales de acción producidos por estas fibras nerviosas sensitivas.

La actividad nerviosa sensitiva originada en los barorreceptores asciende a través de los nervios vago y glossofaríngeo hasta el bulbo raquídeo, en donde estimula el sistema nervioso autónomo para que responda de manera adecuada.

- ✓ Los **centros de control vasomotor** localizados en el bulbo raquídeo controlan la vasoconstricción y la vasodilatación, por lo que regulan la **resistencia periférica total**.
- ✓ Los **centros de control cardíaco** localizados en el bulbo raquídeo regulan la **frecuencia cardíaca**.

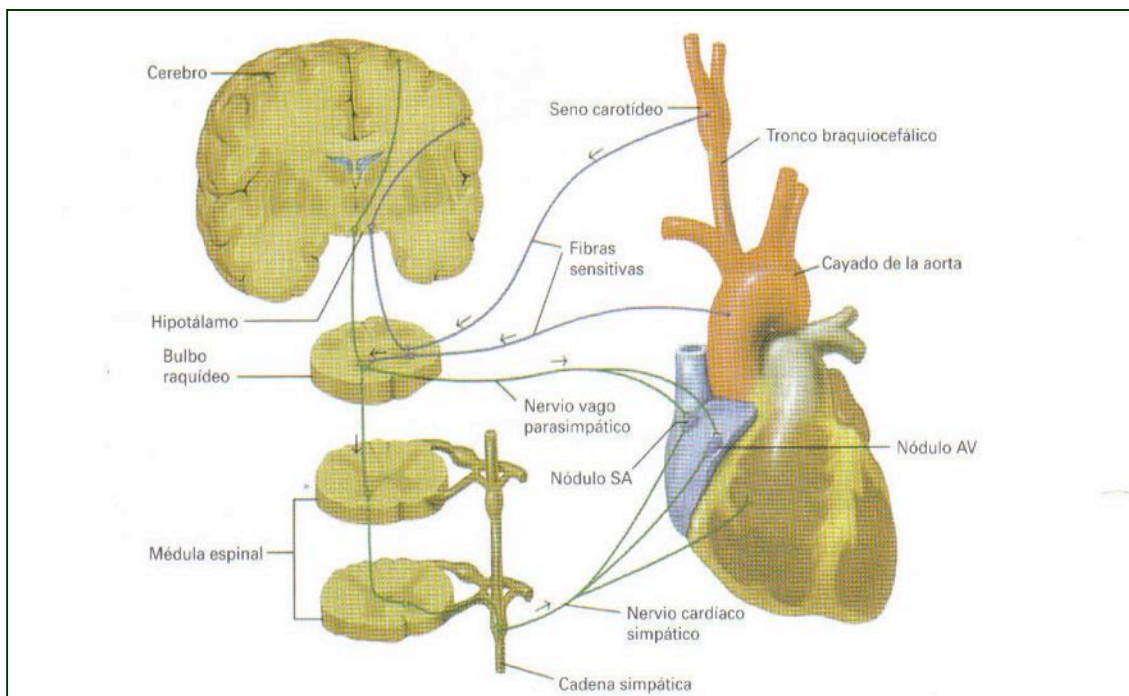
A través de la actividad de las fibras motoras de los nervios vago y simpáticos controlados por estos centros cerebrales, los barorreceptores contrarrestan las modificaciones de la presión sanguínea de manera que quedan minimizadas las

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

fluctuaciones de la misma. El reflejo barorreceptor se activa siempre que aumenta o disminuye la presión sanguínea. Este reflejo es en cierta medida más sensible a las disminuciones de presión que a sus aumentos, y también es más sensibles a las modificaciones bruscas de la tensión que a los cambios graduales.

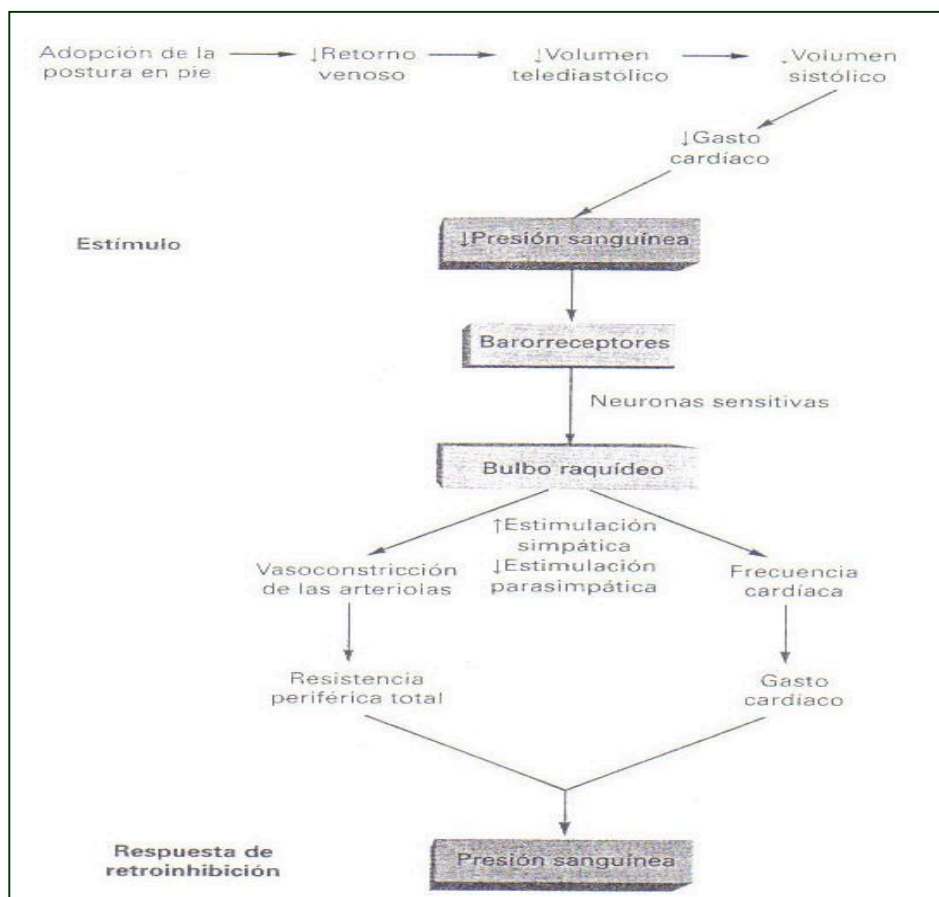
Un buen ejemplo del reflejo barorreceptor es el que tiene lugar cuando una persona se levanta desde la posición de tumbado. Al levantarse se produce un desplazamiento de sangre desde las venas torácicas a la de las extremidades inferiores, que se expanden para contener el volumen extra de sangre.

Esta acumulación extra de sangre en las extremidades inferiores reduce el retorno venoso y el gasto cardíaco, pero la caída resultante de la presión sanguínea queda compensada casi de inmediato por el reflejo barorreceptor, el cual a través de los centros de control vasomotor y cardíaco del bulbo raquídeo, inhibe la actividad parasimpático y estimula la simpática, con lo que se produce aumento de la frecuencia cardíaca y vasoconstricción, medidas ambas destinadas a aumentar la presión arterial.



FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Dado que el reflejo barorreceptor puede requerir unos pocos segundos antes de ser efectivo, muchas personas pueden sentir mareo cuando se ponen de pie con demasiada rapidez. La disminución patológica de la sensibilidad de los barorreceptores, por ejemplo por arteriosclerosis, puede inducir a disminución descompensada de la presión arterial; trastorno que se conoce con el nombre de **hipotensión ortostática o postural**, el cual puede dar lugar a disminución del nivel de consciencia por perfusión cerebral insuficiente.



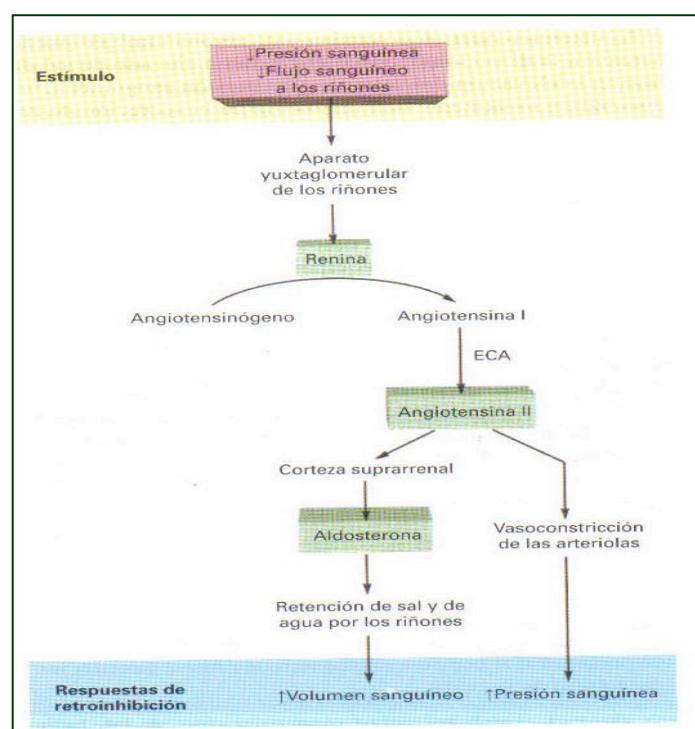
Además del reflejo barorreceptor existen otros reflejos importantes en la regulación de la presión arterial; son los provocados por los **receptores de estiramiento auricular** localizados en las aurículas del corazón.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Estos receptores se activan por el aumento del retorno venoso al corazón y su respuesta es:

- ✚ Estimulación de taquicardia refleja debido al incremento de la actividad nerviosa simpática.
- ✚ Inhibición de la liberación de ADH con eliminación de volúmenes mayores de orina y con disminución del volumen sanguíneo.
- ✚ Estimulación del incremento de la secreción de factor natriurético auricular (FNA), el cual disminuye el volumen sanguíneo al incrementar la excreción de sal y de agua y al antagonizar las acciones de la angiotensina II.

Otros mecanismos que también participan en la regulación de la presión sanguínea son el control reflejo de la liberación de ADH ejercido por los osmorreceptores del hipotálamo, así como el control de la producción de angiotensina II y de la secreción de aldosterona por parte del aparato yuxtaglomerular de los riñones. La hormona antidiurética y la aldosterona incrementan la presión sanguínea al aumentar el volumen de sangre, mientras que la angiotensina II estimula la vasoconstricción, la cual da también lugar al aumento de la tensión arterial, tal como queda reflejado en la siguiente ilustración:

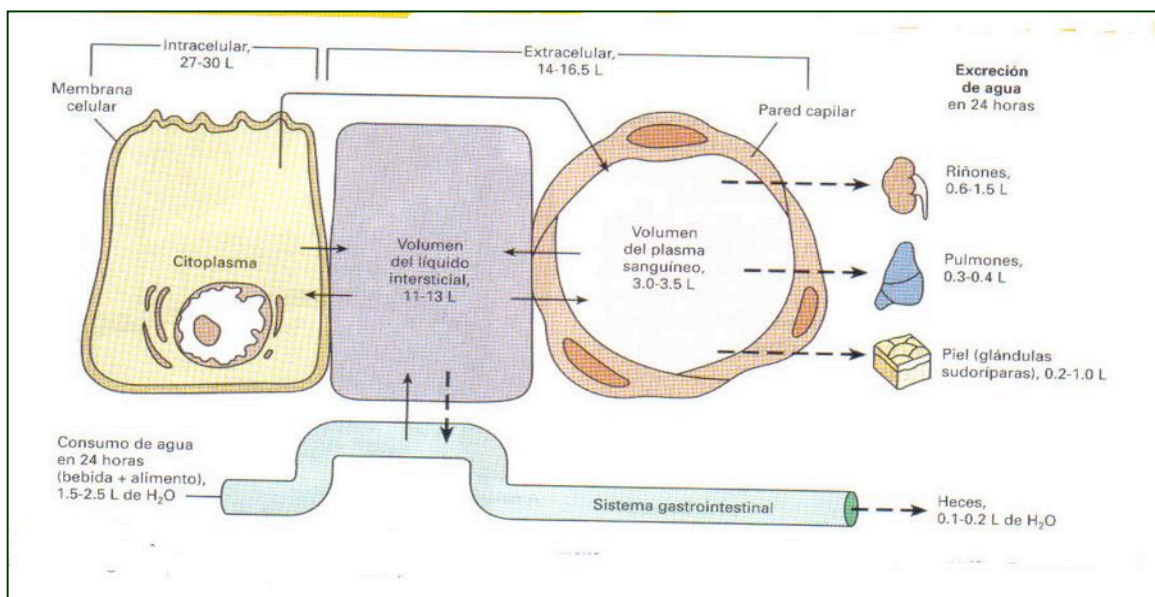


Volumen sanguíneo

El volumen sanguíneo representa una parte del agua corporal total.

Aproximadamente 2/3 partes del agua corporal total están en el interior celular. El 1/3 restante se encuentra en el espacio extracelular:

- ✓ 80% en el espacio intersticial.
- ✓ 20% constituye el plasma sanguíneo.



La distribución del agua entre el líquido tisular y el plasma sanguíneo está determinada por el equilibrio entre una serie de fuerzas opuestas que actúan en los capilares. Por ejemplo, la presión sanguínea facilita la formación de líquido tisular a partir del plasma, mientras que las fuerzas osmóticas tienden a extraer el agua de los tejidos para dirigirla hacia el sistema vascular.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

¡ La distribución del líquido extracelular entre el plasma y el intersticio se mantiene en un estado de equilibrio dinámico !.

El líquido tisular es un medio en circulación continua que se forma en el sistema vascular y que vuelve al mismo. Así las células reciben un aporte continuo de nutrientes y gases y liberan sus productos de deshecho.

La filtración se debe a la presión sanguínea que existe en el interior de los capilares. Es la llamada **presión hidrostática**, la cual es aproximadamente de 37 mmHg en el extremo arteriolar de los capilares y de 17 mmHg en el extremo venular.

La **presión de filtración neta** es igual a la presión hidrostática de la sangre en los capilares menos la presión hidrostática del líquido tisular en el exterior de los mismos. Esta presión hidrostática en los tejidos varía según los órganos. En los músculos esqueléticos esta presión hidrostática tisular es de 1, por tanto, la presión de filtración neta es de 36 mmHg (37-1) en el extremo arteriolar de los capilares y de 16 mmHg (17-1) en el extremo venular.

La presión osmótica de una solución es la determinada por la concentración de solutos de la misma. La glucosa, sales inorgánicas e iones se filtran junto con el agua a través de los canales de los capilares, por lo que las concentraciones de estas sustancias son iguales a nivel sanguíneo que a nivel tisular. Por el contrario, la concentración de proteínas en el líquido tisular (2 g/100 ml) es menor que su concentración sanguínea (6-8 g/100 ml). Esta diferencia se debe a la filtración restringida de las proteínas a través de los poros capilares.

En consecuencia, la presión osmótica ejercida por las proteínas plasmáticas es mucho mayor que la presión osmótica ejercida por las proteínas titulares. La diferencia de ambas presiones se denomina **presión oncótica**. Debido a que la presión osmótica del líquido tisular es lo suficientemente baja para que pueda ser despreciable, la presión oncótica es básicamente igual a la presión osmótica del plasma, cuyo valor es de 25 mmHg. La presión oncótica, a diferencia de la presión hidrostática, favorece el movimiento de agua desde el espacio tisular al espacio vascular.

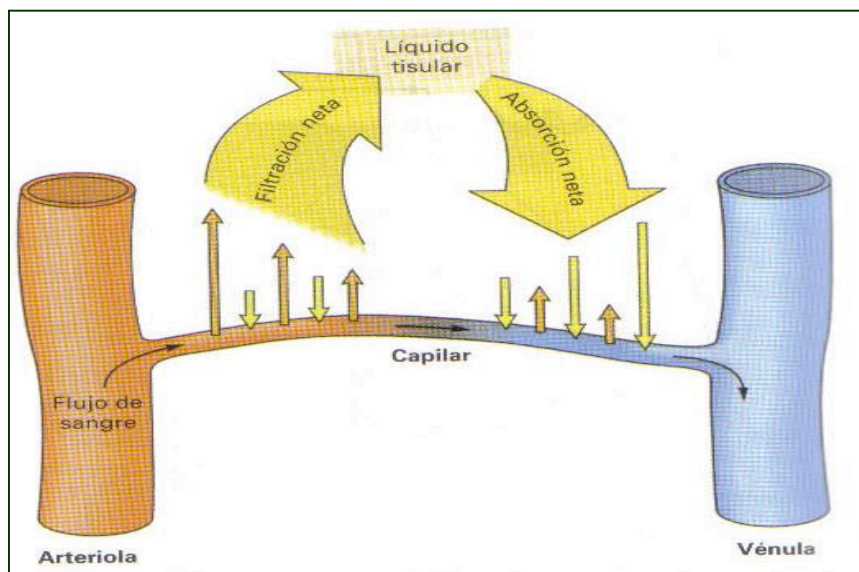
FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Las fuerzas opuestas que influyen en la distribución del líquido a través de los capilares se denominan **fuerzas de Starling** y sus efectos se pueden calcular según la ecuación:

$$(P_c + \pi_i) - (P_i + \pi_p)$$

(Presión hidrostática capilar + Presión osmótica intersticio) – (Presión hidrostática intersticio + Presión osmótica del plasma)

Es decir, líquido que sale del capilar – líquido que entra al capilar desde el intersticio.



El retorno del líquido al sistema vascular en los extremos venulares de los capilares no es exactamente igual a la cantidad filtrada en los extremos arteriolares. Aproximadamente el 85% del filtrado capilar vuelve directamente a los capilares; el 15% restante es devuelto al sistema capilar a través del sistema linfático.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

Por tanto, **los capilares linfáticos drenan el exceso de líquido tisular y de proteínas y, a través de los vasos linfáticos devuelven este líquido al sistema venoso.**

Si este líquido presenta dificultades en el drenado, o bien hay un exceso de filtrado por aumento de la presión hidrostática capilar, o un defecto de reabsorción a nivel venular por disminución de la presión osmótica del plasma, se produce una acumulación de líquido en el espacio intersticial que se denomina **edema**.

Regulación del volumen sanguíneo

Vamos a estudiar tres mecanismos que regulan el volumen sanguíneo:

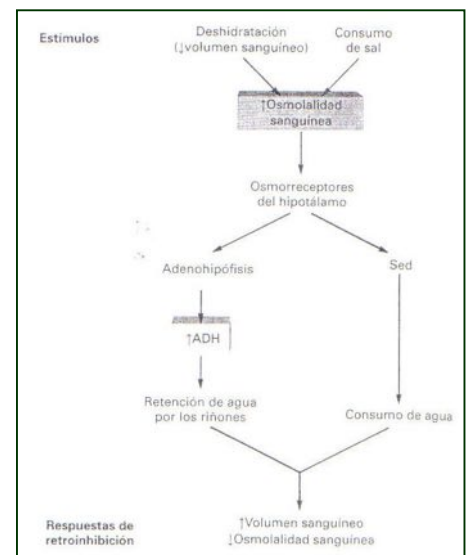
1. Regulación por la hormona antidiurética (ADH).
2. Regulación por el sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona.
3. Regulación por el péptido natriurético.

Regulación por la hormona antidiurética (ADH)

La hormona antidiurética (ADH), también denominada vasopresina, es producida por las neuronas del hipotálamo y almacenada por la neurohipófisis.

La liberación de la ADH se produce en respuesta a la estimulación por parte de osmorreceptores del hipotálamo que detectan el estado de la osmolalidad del plasma. El aumento de ésta, induce a la liberación de la ADH, la cual facilita la reabsorción de agua a nivel renal.

El aumento de la osmolalidad plasmática puede tener lugar por deshidratación o por consumo excesivo de sal. La estimulación de los osmorreceptores da lugar a la



sensación de sed y al aumento de liberación de ADH por parte de la neurohipófisis.

Regulación por aldosterona. Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona

La aldosterona es una hormona esteroidea segregada por la corteza suprarrenal que estimula la reabsorción de sal por parte de los riñones. La retención de sal facilita de manera indirecta la retención de agua.

La aldosterona da lugar a un incremento del volumen sanguíneo pero, a diferencia de la ADH, no produce modificaciones en la osmolalidad del plasma. La razón es que facilita la reabsorción de sal y agua en cantidades proporcionales, mientras que la ADH sólo estimula la reabsorción de agua. Por tanto, la aldosterona no da lugar a la dilución de la sangre como hace la ADH.

Cuando disminuyen el flujo y la presión sanguíneos en la arteria renal, un grupo de células de los riñones denominadas aparato yuxtaglomerular segrega la enzima **renina** a la sangre. Esta enzima cataliza el paso de una proteína plasmática inactiva denominada angiotensinógeno, la cual pasa a ser un polipéptido de 10 aminoácidos denominado **angiotensina I**.

A medida que la angiotensina I atraviesa los capilares pulmonares la **enzima de conversión de la angiotensina (ECA)** elimina dos de sus aminoácidos, con lo que queda un polipéptido de 8 aminoácidos denominado **angiotensina II**.

La angiotensina II ejerce numerosos efectos que dan lugar al aumento de la presión sanguínea. Este aumento de la presión sanguínea se debe en parte a vasoconstricción y en parte al aumento del volumen de sangre.

FISIOLOGÍA CARDIOVASCULAR

- ✓ La vasoconstricción de las arteriolas y de las arterias musculares de pequeño calibre es un efecto directo de la angiotensina II sobre las células musculares lisas de estos vasos.

- ✓ El aumento del volumen sanguíneo por la angiotensina II se produce por:
 - Estimulación de los centros de la sed del hipotálamo, con lo que la persona ingiere más cantidad de agua.
 - Estimulación de la secreción de aldosterona por parte de la corteza suprarrenal, con lo que induce una retención mayor de sal y agua por parte de los riñones.

Regulación por la hormona natriurética

Se trata de una hormona denominada factor natriurético auricular, que se forma en las aurículas del corazón en respuesta a un estiramiento de las fibras musculares como consecuencia de un aumento del volumen sanguíneo.

Es una hormona antagonista de la aldosterona y facilitaría la eliminación de sodio y de agua con la orina en respuesta a un incremento del volumen sanguíneo.