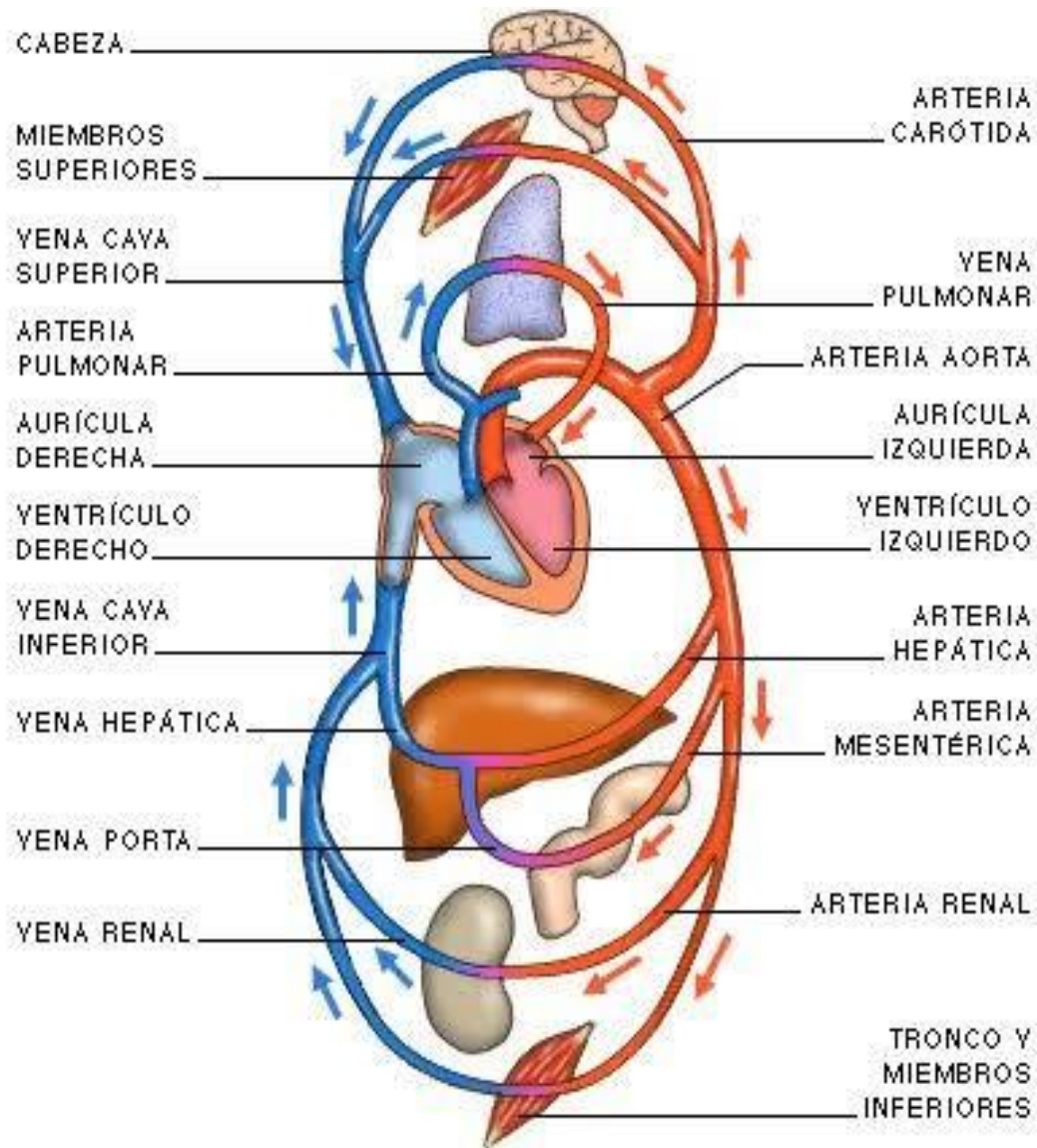


Visión general de la circulación; biofísica de la presión, el flujo y la resistencia

La función de la circulación consiste en atender las necesidades del organismo:

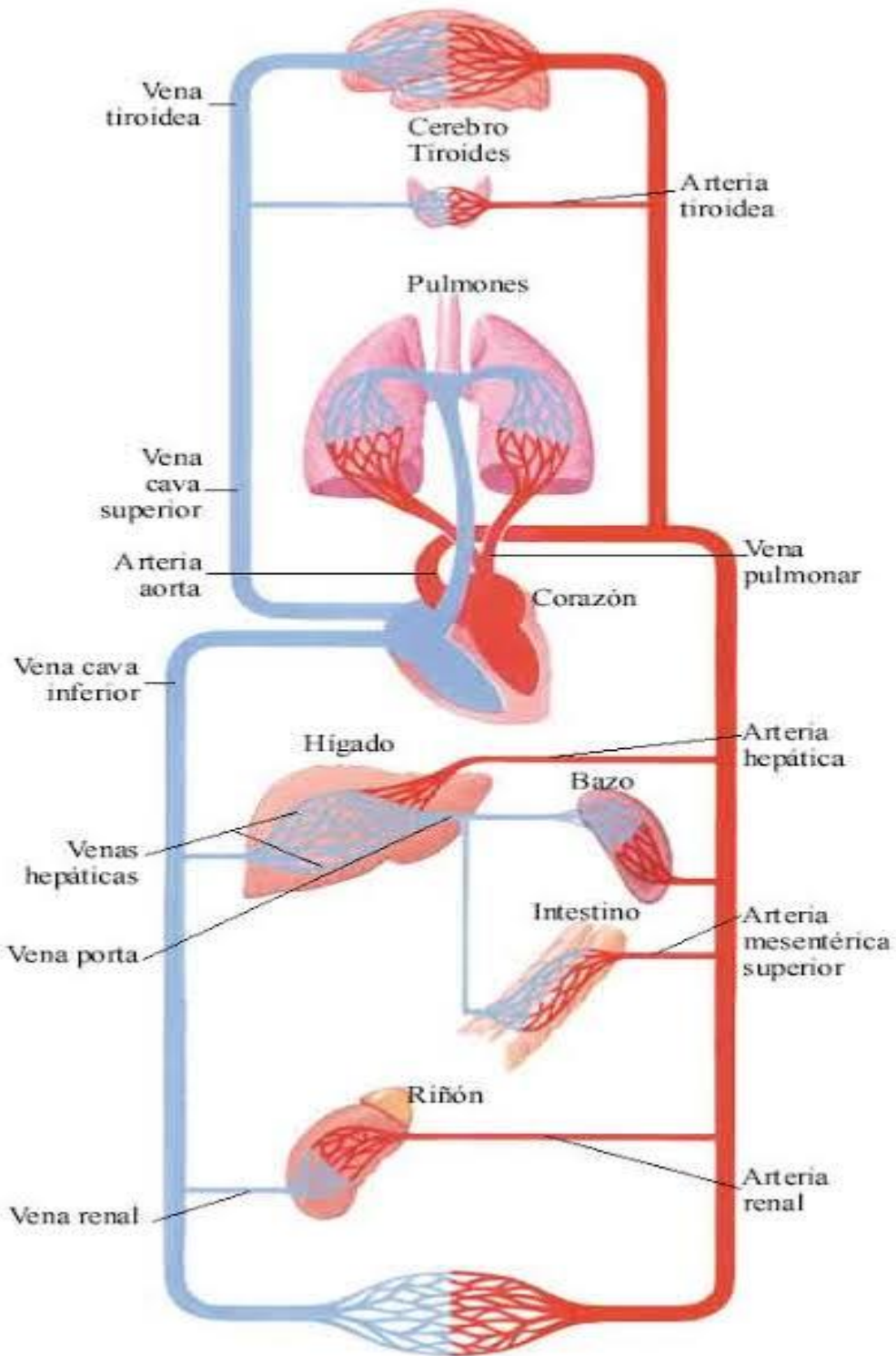
- ✚ transportar nutrientes hacia los tejidos del organismo
- ✚ transportar los productos de desecho
- ✚ transportar las hormonas de una parte del organismo a otra
- ✚ mantener un entorno apropiado en todos los líquidos tisulares del organismo para lograr la supervivencia y una funcionalidad óptima de las células

La velocidad del flujo sanguíneo en muchos de los tejidos se controla principalmente en respuesta a su necesidad de nutrientes.



Características físicas de la circulación

La circulación está dividida en circulación sistémica y circulación pulmonar. Como la circulación sistémica aporta el flujo sanguíneo a todos los tejidos del organismo excepto los pulmones, también se conoce como circulación mayor o circulación periférica.

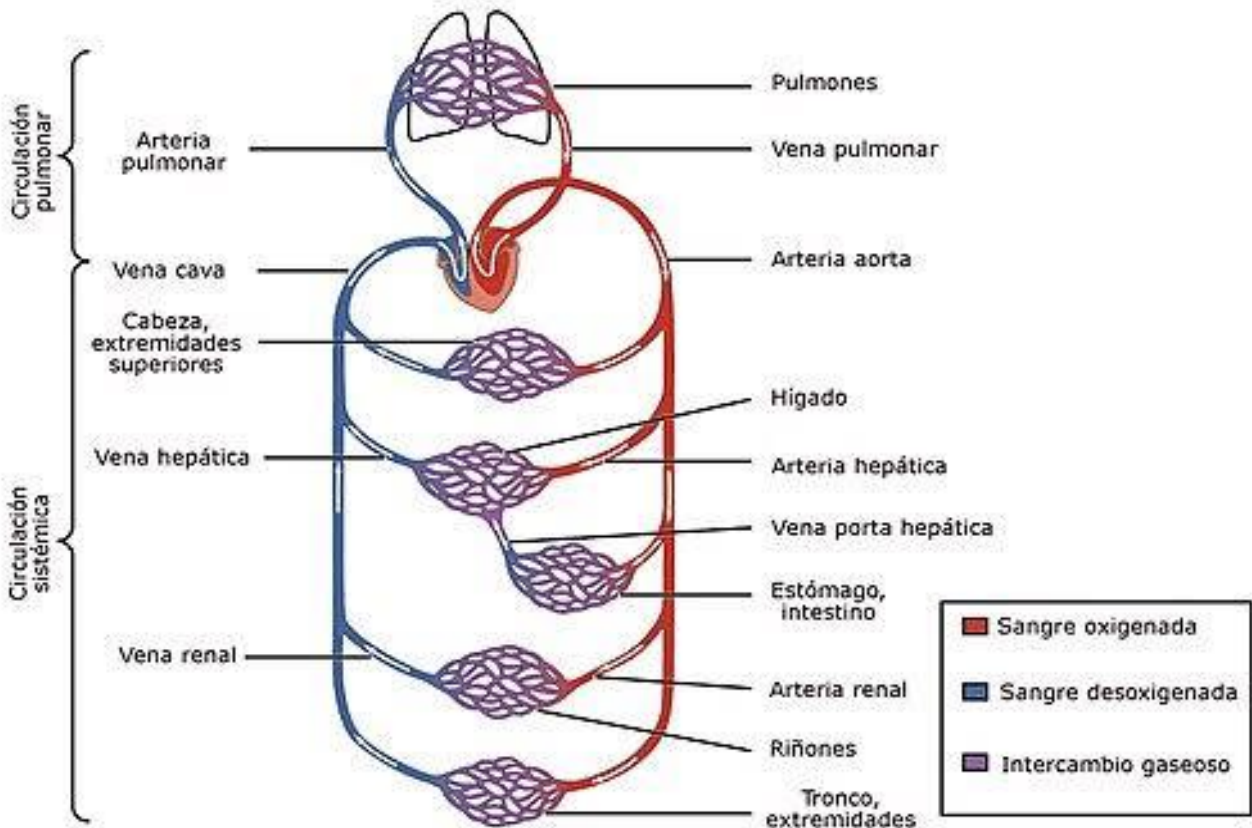


Componentes funcionales de la circulación

función de las arterias: consiste en transportar la sangre con una presión alta hacia los tejidos, motivo por el cual las arterias tienen unas paredes vasculares fuertes y unos flujos sanguíneos importantes con una velocidad alta. Las arteriolas son las últimas ramas pequeñas del sistema arterial y actúan controlando los conductos a través de los cuales se libera la sangre en los capilares. Las arteriolas tienen paredes musculares fuertes que pueden cerrarlas por completo o que pueden, al relajarse, dilatar los vasos varias veces, con lo que pueden alterar mucho el flujo sanguíneo en cada lecho tisular en respuesta a sus necesidades.

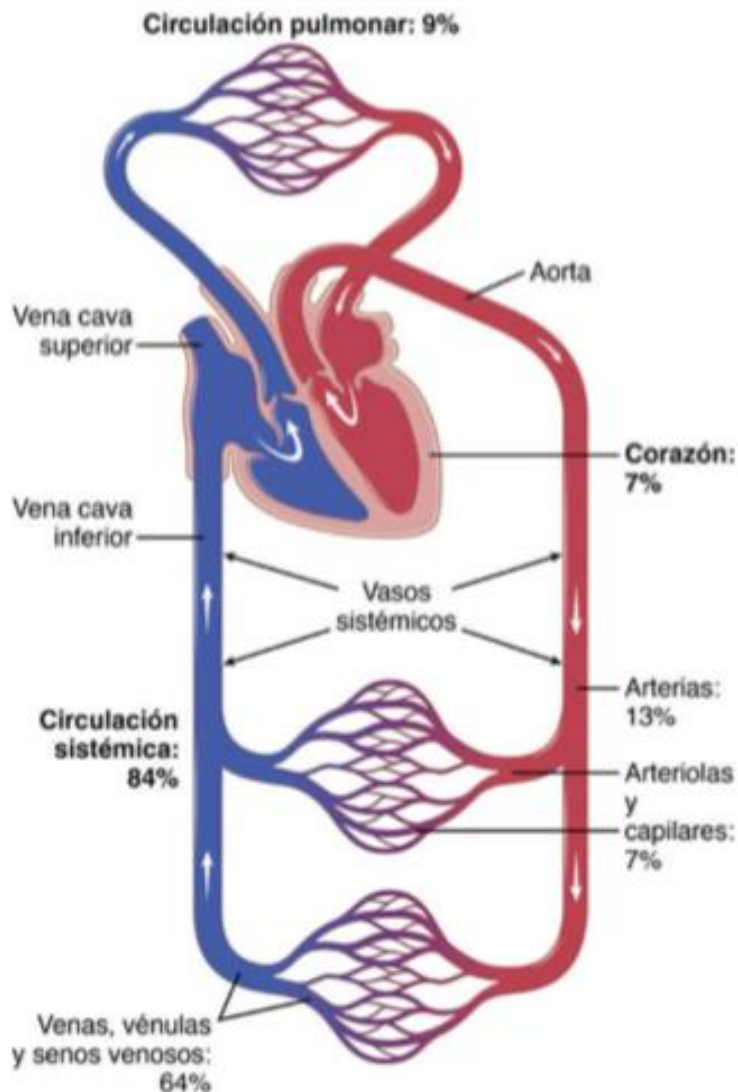
función de los capilares: consiste en el intercambio de líquidos, nutrientes, electrolitos, hormonas y otras sustancias en la sangre y en el líquido intersticial. Para cumplir esta función, las paredes del capilar son finas y tienen muchos poros capilares diminutos, que son permeables al agua y a otras moléculas pequeñas. Las vénulas recogen la sangre de los capilares y después se reúnen gradualmente formando venas de tamaño progresivamente mayor.

Función de las venas: funcionan como conductos para el transporte de sangre que vuelve desde las vénulas al corazón; igualmente importante es que sirven como una reserva importante de sangre extra. Como la presión del sistema venoso es muy baja, las paredes de las venas son finas. Aun así, tienen una fuerza muscular suficiente para contraerse o expandirse y, de esa forma, actuar como un reservorio controlable para la sangre extra, mucha o poca, dependiendo de las necesidades de la circulación.



Volúmenes de sangre en los distintos componentes de la circulación

aproximadamente el 84% de todo el volumen de sangre del organismo se encuentra en la circulación sistémica y el 16% en el corazón y los pulmones. Del 84% que está en la circulación sistémica, aproximadamente el 64% está en las venas, el 13% en las arterias y el 7% en las arteriolas y capilares sistémicos. El corazón contiene el 7% de la sangre, y los vasos pulmonares, el 9%. Resulta sorprendente el bajo volumen de sangre que hay en los capilares, aunque es allí donde se produce la función más importante de la circulación, la difusión de las sustancias que entran y salen entre la sangre y los tejidos.



Superficies transversales y velocidades del flujo sanguíneo

Si todos los vasos sistémicos de cada tipo se pusieran uno al lado del otro, la superficie transversal total aproximada para un ser humano medio sería la siguiente:

| Vaso | Superficie transversal (cm ²) |
|-------------------|---|
| Aorta | 2,5 |
| Pequeñas arterias | 20 |
| Arteriolas | 40 |
| Capilares | 2.500 |
| Vénulas | 250 |
| Pequeñas venas | 80 |
| Venas cavas | 8 |

Como debe pasar el mismo volumen de flujo sanguíneo (F) a través de cada segmento de la circulación en cada minuto, la velocidad del flujo sanguíneo (v) es inversamente proporcional a la superficie transversal vascular (A).

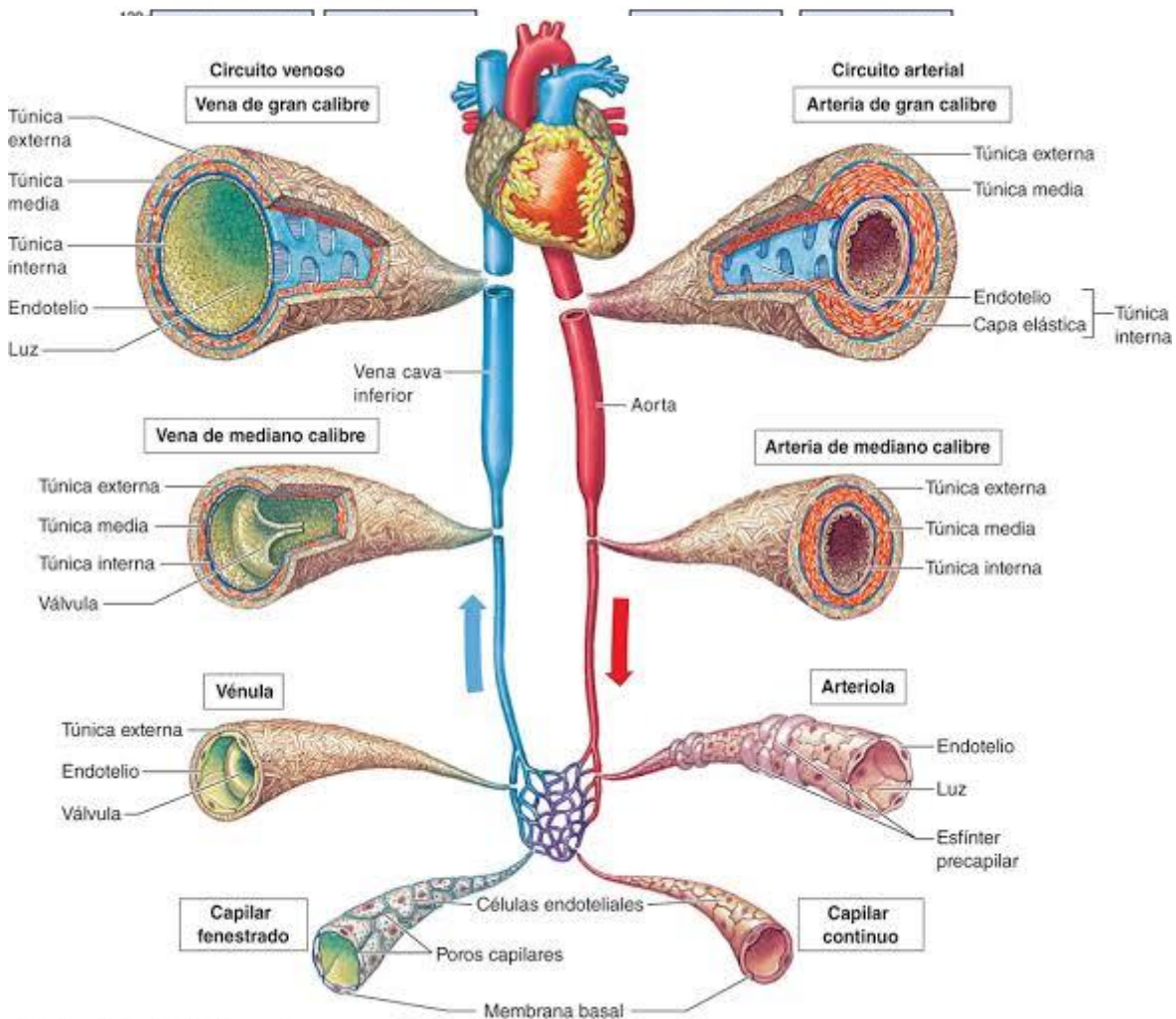
$$v = F/A$$

Presiones en las distintas porciones de la circulación

Como el corazón bombea la sangre continuamente hacia la aorta, la presión media en este vaso es alta, con una media en torno a los 100 mmHg. Además, como el bombeo cardíaco es pulsátil, la presión arterial alterna entre una presión sistólica de 120 mmHg y una diastólica de 80 mmHg.

A medida que el flujo sanguíneo atraviesa la circulación sistémica, la presión media va cayendo progresivamente hasta llegar casi a 0 mmHg en el momento en el que alcanza la terminación de las venas cava superior e inferior, donde se vacía en la aurícula derecha del corazón. La presión de los capilares sistémicos oscila desde 35 mmHg cerca de los extremos arteriolares hasta tan solo 10 mmHg cerca de los extremos venosos, pero la presión media «funcional» en la mayoría de los lechos vasculares es de 17 mmHg, aproximadamente, una presión suficientemente baja que permite pequeñas fugas de plasma a través de los poros diminutos de las paredes capilares, aunque los nutrientes pueden difundir fácilmente a través de los mismos poros hacia las células de los tejidos externos. En las arterias pulmonares la presión es pulsátil, igual que en la aorta, pero la presión es bastante menor: la presión sistólica arterial pulmonar alcanza un promedio de 25 mmHg, y la

diastólica, de 8 mmHg, con una presión arterial pulmonar media de solo 16 mmHg. La media de la presión capilar pulmonar alcanza un promedio de solo 7 mmHg.



Fuente: Stuart Ira Fox: Fisiología humana, 14e: www.accessmedicina.com
Derechos © McGraw-Hill Education. Derechos Reservados.

Principios básicos de la función circulatoria

Tres principios básicos que subyacen en todas las funciones del sistema:

- 1. El flujo sanguíneo en la mayoría de los tejidos está controlado según la necesidad tisular.** Cuando los tejidos son activos necesitan un aporte mucho mayor de nutrientes y, por tanto, un flujo sanguíneo mucho mayor que en reposo, en ocasiones hasta 20 o 30 veces el nivel de reposo, a pesar de que el corazón normalmente no puede aumentar su gasto cardíaco en más de 4-7 veces su gasto cardíaco por encima del nivel en reposo.
- 2. El gasto cardíaco es la suma de todos los flujos locales de los tejidos.** Cuando el flujo sanguíneo atraviesa un tejido, inmediatamente vuelve al corazón a través de las venas y el corazón

responde automáticamente a este aumento del flujo aferente de sangre bombeándolo inmediatamente hacia las arterias. Así, el corazón actúa como un autómatas respondiendo a las necesidades de los tejidos.

3. La regulación de la presión arterial es generalmente independiente del control del flujo sanguíneo local o del control del gasto cardíaco. El sistema circulatorio está dotado de un extenso sistema de control de la presión arterial.

Interrelaciones entre la presión, el flujo y la resistencia

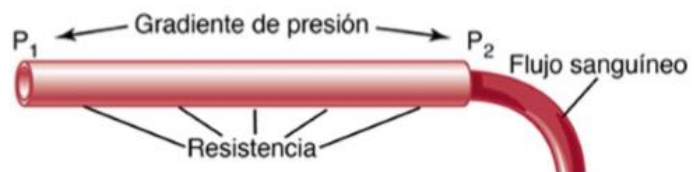
El flujo sanguíneo que atraviesa un vaso sanguíneo está determinado por dos factores:

1) diferencia de presión de la sangre entre los dos extremos de un vaso, también denominado «gradiente de presión» en el vaso, que empuja la sangre a través del vaso

2) los impedimentos que el flujo sanguíneo encuentra en el vaso, que se conoce como resistencia vascular

P1 representa la presión en el origen del vaso; en el otro extremo, la presión es P2. La resistencia es consecuencia de la fricción entre el flujo de sangre y el endotelio intravascular en todo el interior del vaso. El flujo a través del vaso se puede calcular con la fórmula siguiente, que se conoce como ley de Ohm:

$$F = \frac{\Delta P}{R}$$

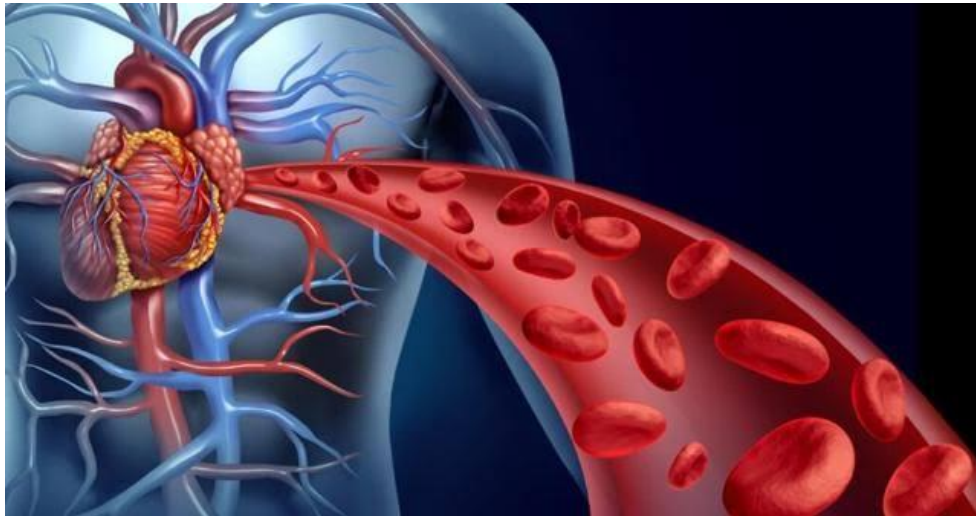


donde F es el flujo sanguíneo, ΔP es la diferencia de presión ($P_1 - P_2$) entre los dos extremos del vaso y R es la resistencia. En esta fórmula se afirma que el flujo sanguíneo es directamente proporcional a la diferencia de presión, pero inversamente proporcional a la resistencia.

Flujo sanguíneo

El flujo sanguíneo es la cantidad de sangre que atraviesa un punto dado de la circulación en un período de tiempo determinado. Normalmente se expresa en mililitros por minuto o litros por

minuto, pero puede expresarse en mililitros por segundo o en cualquier otra unidad del flujo y de tiempo. El flujo sanguíneo global de toda la circulación de un adulto en reposo es de unos 5.000 ml/min, cantidad que se considera igual al gasto cardíaco porque es la cantidad de sangre que bombea el corazón en la aorta en cada minuto.



Métodos de medición del flujo sanguíneo

Se pueden introducir muchos dispositivos mecánicos y electromecánicos en serie dentro de un vaso sanguíneo o bien aplicarse en el exterior de la pared del vaso para medir el flujo. Estos dispositivos se denominan flujómetros.

Flujómetro electromagnético



Un dispositivo que permite medir experimentalmente el flujo sanguíneo sin abrir el vaso.

Flujómetro ultrasónico Doppler



flujómetro que puede aplicarse al exterior del vaso y que tiene las mismas ventajas que el flujómetro electromagnético es el flujómetro ultrasónico Doppler.

Flujo de sangre laminar en los vasos

- ✓ **flujo laminar o flujo aerodinámico:** cuando el flujo sanguíneo se mantiene en equilibrio a través de un vaso sanguíneo largo y liso, el flujo se produce de forma aerodinámica, manteniéndose cada capa de sangre a la misma distancia de la pared del vaso. Además, la porción de sangre más central se mantiene en el centro del vaso.
- ✓ **flujo turbulento:** es el flujo sanguíneo que transcurre en todas las direcciones del vaso y se mezcla continuamente en su interior.

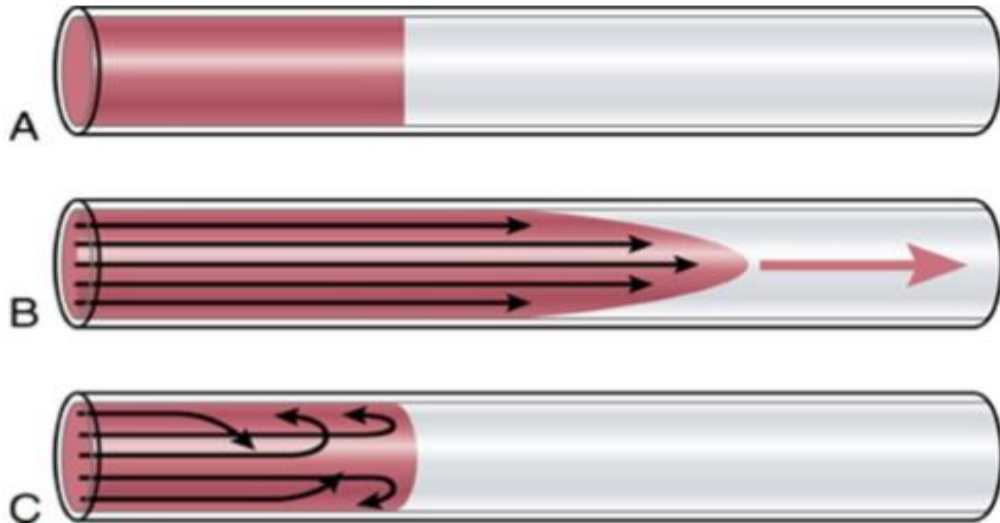


FIGURA 14-6 A. Dos líquidos (uno teñido de rojo y el otro transparente) antes de que comience el flujo. B. Los mismos líquidos 1 s después de que comience el flujo. C. Flujo turbulento, con elementos del líquido moviéndose con un patrón desordenado.

Flujo de sangre turbulento en algunas situaciones

Cuando la velocidad del flujo sanguíneo es demasiado grande, cuando atraviesa una obstrucción en un vaso, hace un giro brusco o pasa sobre una superficie rugosa, el flujo puede volverse turbulento o desordenado en lugar de aerodinámico. El flujo turbulento significa que el flujo sanguíneo atraviesa el vaso en dirección transversal y también longitudinal, formando espirales que se denominan corrientes en torbellino, similares a los remolinos que se ven con frecuencia en un río que fluye rápidamente en un punto de obstrucción. Cuando hay corrientes en torbellino el flujo sanguíneo encuentra una resistencia mucho mayor que cuando el flujo es aerodinámico, porque los torbellinos aumentan mucho la fricción global del flujo en el vaso. El flujo turbulento tiende a aumentar en proporción directa a la velocidad del flujo sanguíneo, al diámetro del vaso sanguíneo

y a la densidad de la sangre y es inversamente proporcional a la viscosidad de la sangre, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}$$

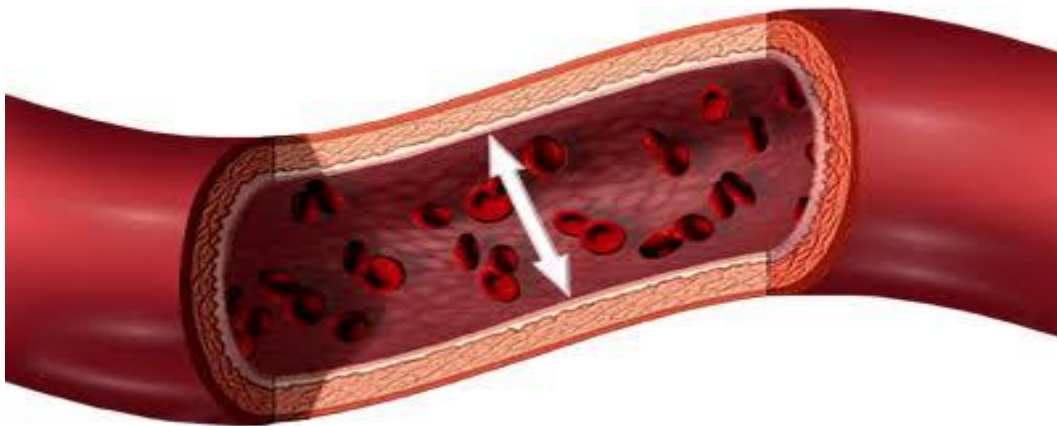
donde **Re** es el número de Reynolds, una medida que da idea de la tendencia a producirse turbulencias, (**v** es la velocidad media del flujo sanguíneo (en centímetros/segundo), **d** es el diámetro del vaso (en centímetros), **ρ** es la densidad y **η** es la viscosidad (en poises).

Presión sanguínea

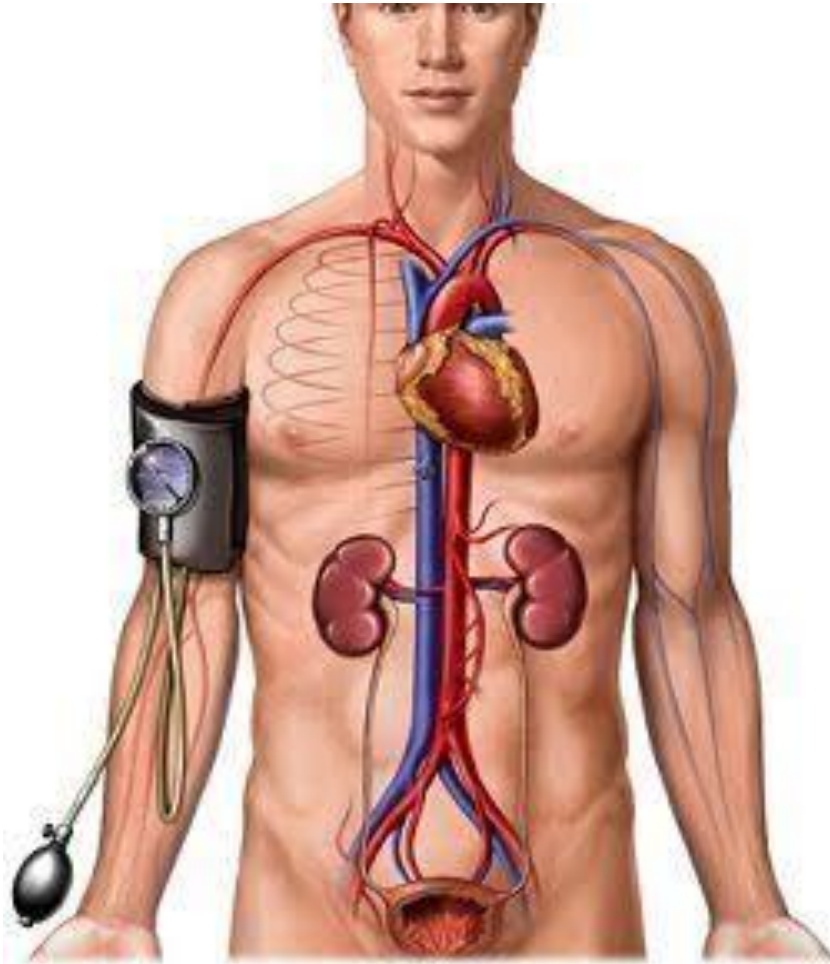
Unidades estándar de presión

La presión sanguínea se mide casi siempre en milímetros de mercurio (mmHg) porque el manómetro de mercurio se ha usado como patrón de referencia para medir la presión desde su invención en 1846 por Poiseuille. En realidad, la presión arterial mide la fuerza ejercida por la sangre contra una unidad de superficie de la pared del vaso. En ocasiones, la presión se mide en centímetros de agua (cmH₂O). Una presión de 1 mmHg es igual a una presión de 1,36 cmH₂O, porque la densidad del mercurio es 13,6 veces mayor que la del agua y 1 cm es 10 veces mayor que 1 mm.

La presión arterial mide la fuerza que se aplica a las paredes arteriales



ADAM.



Resistencia al flujo sanguíneo

Unidades de resistencia

La resistencia es el impedimento al flujo sanguíneo en un vaso, pero no se puede medir por medios directos. Por el contrario, la resistencia debe calcularse a partir de las determinaciones del flujo sanguíneo y de la diferencia de presión entre dos puntos del vaso. Si la diferencia de presión entre los dos puntos es de 1 mmHg y el flujo es de 1 ml/s, se dice que la resistencia es de una unidad de resistencia periférica, abreviada habitualmente como PRU.

Expresión de la resistencia en unidades CGS

En ocasiones se usa una unidad física básica en CGS (centímetros, gramos, segundos) para expresar la resistencia. Esta unidad es la dina · s/cm⁵. La resistencia en esas unidades puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$R \left(\text{en } \frac{\text{dina} \cdot \text{s}}{\text{cm}^5} \right) = \frac{1.333 \times \text{mmHg}}{\text{ml/s}}$$

Resistencia vascular periférica total y resistencia vascular pulmonar total

La velocidad del flujo sanguíneo a través de todo el sistema circulatorio es igual a la velocidad de la sangre que bombea el corazón, es decir, es igual al gasto cardíaco. En un ser humano adulto es aproximadamente igual a 100 ml/s. La diferencia de presión entre las arterias sistémicas y las venas sistémicas es de unos 100 mmHg. Por tanto, la resistencia de toda la circulación sistémica, que se denomina resistencia periférica total, es de 100/100 o 1 PRU.

La «conductancia» de la sangre en un vaso es inversa a la resistencia

La conductancia es la medición del flujo sanguíneo a través de un vaso para dar una diferencia de presión dada. Esta medida se expresa en milímetros por segundo por milímetro de mercurio de presión, pero también se puede expresar en litros por segundo por milímetro de mercurio o en cualquier otra unidad del flujo sanguíneo y presión. Es evidente que la conductancia es el recíproco exacto de la resistencia según la ecuación:

$$\text{Conductancia} = \frac{1}{\text{Resistencia}}$$

Cambios pequeños en el diámetro de un vaso cambian mucho la conductancia

Pequeños cambios en el diámetro de un vaso provocan cambios enormes en su capacidad de conducir la sangre cuando el flujo sanguíneo es aerodinámico. La conductancia del vaso aumenta en proporción a la cuarta potencia del diámetro según la fórmula siguiente:

$$\text{Conductancia} \propto \text{Diámetro}^4$$

Ley de Poiseuille

$$F = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 \eta l}$$

en la que F es la velocidad del flujo sanguíneo, ΔP es la diferencia de presión entre los extremos del vaso, r es el radio del vaso, l es la longitud del vaso y η es la viscosidad de la sangre. En esta ecuación la velocidad del flujo sanguíneo es directamente proporcional a la cuarta potencia del radio del vaso, lo que demuestra, una vez más, que el diámetro de un vaso sanguíneo (que es igual a dos veces el radio) es el que tiene la mayor importancia entre todos estos factores para determinar la velocidad del flujo sanguíneo a través del vaso.

Resistencia al flujo sanguíneo en circuitos vasculares en serie y en paralelo

La sangre que bombea el corazón fluye desde la parte de presión alta de la circulación sistémica (es decir, la aorta) hacia el lado de baja presión (es decir, la vena cava) a través de muchos miles de vasos sanguíneos dispuestos en serie y en paralelo. Las arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas se disponen colectivamente en serie. Cuando esto sucede, el flujo de cada vaso sanguíneo es el mismo y la resistencia total al flujo sanguíneo (R_{total}) es igual a la suma de la resistencia de cada vaso:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots$$

Es decir, la resistencia vascular periférica total es igual a la suma de resistencias de las arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas.

UNIDAD IV La circulación

Los vasos sanguíneos emiten numerosas ramas que forman circuitos paralelos que aportan la sangre a los distintos órganos y tejidos del organismo. Esta distribución paralela permite que cada tejido regule su propio flujo sanguíneo en mayor grado, independientemente del flujo de los demás tejidos. En cuanto a los vasos sanguíneos en paralelo la resistencia total al flujo sanguíneo se expresa como:

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

La conductancia total (C_{total}) del flujo sanguíneo es la suma de la conductancia de cada vía paralela:

$$C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \dots$$

Hematocrito: proporción de sangre compuesta por eritrocitos

Si una persona tiene un hematocrito de 40 significa que el 40% del volumen sanguíneo está formado por las células y el resto es plasma. El hematocrito de un hombre adulto alcanza un promedio de 42, mientras que en las mujeres es de 38. Estos valores son muy variables, dependiendo de si la persona tiene anemia, del grado de actividad corporal y de la altitud en la que reside la persona. El hematocrito se determina centrifugando la sangre en un tubo calibrado. La calibración permite la lectura directa del porcentaje de células.

