

Capítulo 9 Parte 1/4

BASES FISICAS DE LA CIRCULACION

9.1 ¿POR QUE EL HOMBRE TIENE UN SISTEMA CIRCULATORIO?

Los capítulos iniciales de este manual estuvieron dedicados a explicar cómo el agua, el Na⁺ el K⁺, la glucosa, el O₂ el CO₂, etc. se intercambian entre el líquido intersticial y líquido intracelular. La pregunta es ahora cómo hacen esas sustancias para llegar al intersticial. En una célula aislada, "nadando" en un compartimento de volumen infinito (concentración constante), el problema es sencillo: las sustancias simplemente están allí y lo único que tienen que hacer es atravesar una membrana celular de unos 5 nm (5 nanómetros = 5 · 10⁻⁹ m = 5 · 10⁻⁷ cm). Si entre afuera y adentro hay una diferencia de concentración de, supongamos, 0,1 mmol/L de glucosa, el gradiente de concentración será de:

$$\text{Gradiente} = \frac{\Delta C}{\Delta X} = \frac{10^{-4} \text{ mol/L}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ cm}} = 200 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

El flujo de glucosa (J_{gl}), de acuerdo a la ley de Fick, donde P_{gl} será la permeabilidad a la glucosa

$$J_{gl} = P_{gl} \cdot A \cdot \Delta C / \Delta x$$

El flujo será proporcional a ese gradiente y la concentración glucosa dentro de la célula irá cambiando con el tiempo en función a ese flujo

Willam Harvey y Marcello Malpighi. Ya en la escuela primaria nos enseñan el sistema circulatorio del hombre, con un corazón, arterias, venas y capilares. Esto que ahora parece tan lógico y sencillo, significó un gran cambio en el pensamiento médico cuando en 1628 W. Harvey publicó su trabajo mostrando que la sangre circula, en contraposición con la idea de que la sangre se forma en el hígado y se extingue en la periferia. Harvey no llegó a explicar cómo se conectaban arterias y venas porque no pudo ver los capilares, lo que haría M. Malpighi unos 30 años más tarde, con la ayuda del microscopio, recientemente inventado. Este capítulo trata lo de ellos y lo mucho que

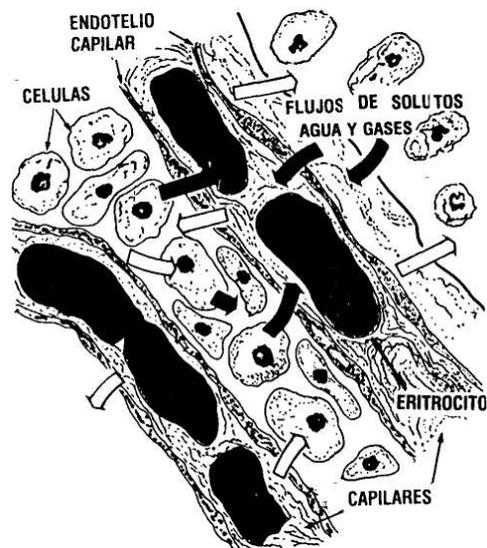
INDICE - Parte 1	Pág.
9.1 ¿Por qué el hombre tiene un sistema circulatorio?	1
9.2 Disposición del sistema circulatorio en el hombre	3
9.3 Volúmenes, flujos, presiones y velocidades en el sistema circulatorio	4
• Volumen sanguíneo o volemia	4
• Volumen minuto o gasto cardíaco	5
• El gasto cardíaco como producto del volumen sistólico y la frecuencia cardíaca	6
• El Índice cardíaco por metro cuadrado	7
• Presiones en el sistema circulatorio del hombre	7
• Presión sistólica, diastólica, de pulso y media	10
• Velocidad de la sangre en el sistema circulatorio	12

Para una célula muscular humana, por ejemplo, las sustancias no "están allí", en el intersticial sino que *hay que traerlas*. ¿De dónde? Pues de afuera, a través del epitelio digestivo y respiratorio o de adentro mismo del cuerpo, desde otros órganos. Conceptualmente no habría problema en pensar, por ejemplo, en una cierta cantidad de moléculas de glucosa viajando desde la cara serosa del epitelio intestinal a una célula del bíceps por simple difusión. Después de todo, el intersticial es un continuo interconectado. El problema es simplemente de tiempo. Si imaginamos que aquí hay también una diferencia de concentración de 0,1 mmol/L, y como los puntos a considerar son intestino y bíceps, la distancia será de unos 50 cm, el gradiente será:

$$\text{Gradiente} = \frac{10^{-4} \text{ mol/L}}{50 \text{ cm}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

El gradiente es ahora 100 millones de veces menor y el flujo de glucosa será 100 millones de veces menor: la concentración de glucosa dentro de la célula cambiará, sí, pero ¡años después! La cuestión en un animal "grande" como el hombre es, entonces, no sólo traer la molécula a la célula, sino ponerla rápidamente lo más cerca posible de la célula que la habrá de utilizar.

En el hombre es su sistema circulatorio, con sus arterias, corazón y venas, el que se encarga de llevar, en cuestión de segundos, la molécula al **capilar** más cercano a la célula que hemos elegido (Fig. 9.1) ¿Y del capilar a las células? La distancia que hay entre la pared del capilar y una célula nunca es mayor de 1-2 μm (1-2 $\cdot 10^{-4}$ cm). El gradiente es alto, el flujo por difusión es alto y el cambio de concentración se hace en fracciones de segundo. Del mismo modo, las moléculas de CO_2 o los iones K^+ saldrán de la célula, por difusión llegarán al interior del capilar y de allí, por vía sanguínea al pulmón y al riñón. En resumen:



$J_s = \text{gradiente} \cdot \text{área}$ (Cap 2)

Acelerar el proceso de intercambio no es lo único que realiza el sistema circulatorio del hombre: es también un sistema de **distribución, de mezcla** y de **integración**.

Fig. 9.1. Relación entre capilares y células: la distancia es muy corta. haciendo que el gradiente de solutos, agua y gases sea alto y también el flujo.

Uno de los tantos argumentos que usó **William Harvey** para sostener que la sangre circulaba fue que el volumen de sangre que se expulsa por hora el corazón sobrepasaba en mucho todo el volumen de sangre del cuerpo y que el hígado podía, de acuerdo a la teoría de Galeno, producir. Fue una medida, realizada por una mente muy preparada, que revolucionó la medicina y dio las bases de la medicina basada en hechos. Harvey nació en 1578 en Folkstone, Kent., estudió en el King's School, en Canterbury y fue al Causis College en Cambridge. Obtuvo el título de médico en la Escuela de Medicina de Padua en 1602. Desde 1609 a 1615 fue médico en el St. Bartholomew Hospital de Londres. Su libro *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus* fue publicado en Frankfurt 1628 y en Londres en 1653, pero sus ideas y hallazgos los había presentado en 1616 en el Royal College of Physicians. Murió en 1657.

El oxígeno que atraviesa la membrana alvéolo-capilar, la glucosa, los aminoácidos y el Na⁺ absorbido en el intestino, las hormonas segregadas por las glándulas endocrinas, etc., son distribuidas desde un punto hacia todo el cuerpo y mezcladas con las otras moléculas ya presentes. La hormona tiroidea, por ejemplo, será segregada por las células de la glándula tiroidea, vertida a la sangre a ese nivel y llevada hasta las proximidades de todas sus "células blanco" por el sistema circulatorio, integrando, coordinando, su funcionamiento.

9.2 DISPOSICIÓN DEL SISTEMA CIRCULATORIO EN EL HOMBRE

El sistema de tubos que conforman el sistema circulatorio del hombre, con la **circulación general o sistémica** y la **circulación pulmonar** está esquematizado en la Fig. 9.2. Estos dos circuitos están dispuestos en **serie** de modo que una partícula que pase por la **aorta** obligatoriamente deberá pasar por la **arteria pulmonar** y el **flujo de sangre** y los **mililitros por minuto** que pasan por la aorta, serán los mismos que pasan por la arteria pulmonar. Por el contrario, los distintos órganos irrigados por la circulación general están dispuestos en **paralelo** con respecto la aorta y las **venas cavas**. Lo mismo ocurre en la circulación pulmonar con los pulmones y sus lóbulos con respecto a la arteria pulmonar y las **venas pulmonares**. Una partícula que sale, por ejemplo, del **ventrículo izquierdo** tiene varios caminos para llegar a la aurícula derecha y los flujos por las distintas resistencia pueden ser distintos. Una característica importante del sistema arterial del hombre es la forma en que se va bifurcando. **siempre** que de un tronco se generen ramas, la suma del área de sección transversal de las ramas será mayor que el área de sección del tronco original. Mientras que la sección de **una** arteria es menor que la sección de la aorta, la **sección total** de las arterias, dada por la sumatoria de las áreas de sección de todas las arterias será mayor que el área de sección de la aorta.

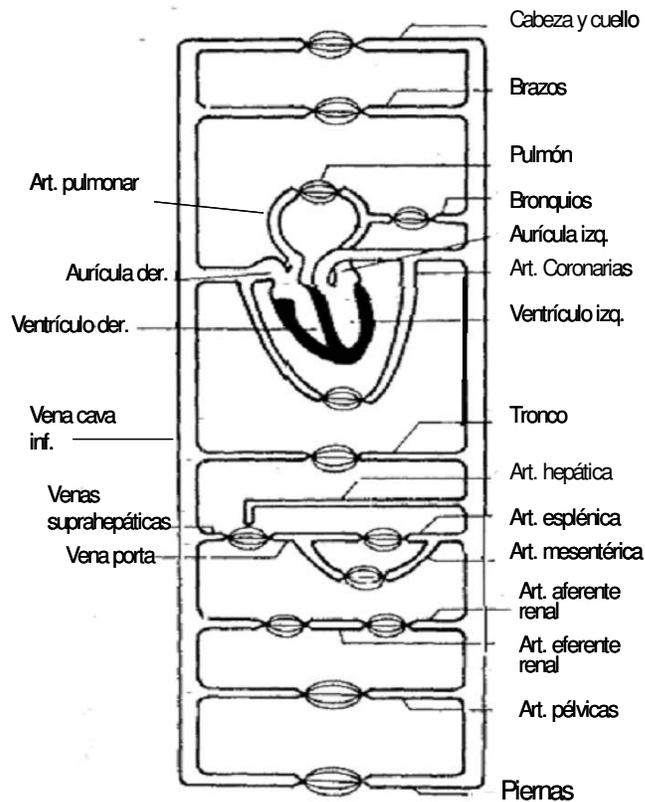


Fig. 9-2 El sistema circulatorio en el hombre. La circulación sistémica y pulmonar se disponen en serie, mientras que las de los órganos se disponen en paralelo. Los términos "serie" y "paralelo" vienen de los circuitos eléctricos y para identificarlos como paralelo basta ver si 2 o más resistencias (lechos vasculares) están sometidos a la misma diferencia de voltaje (presión). En serie hay una caída de presión entre el primer y segundo lecho vascular.

Esto mismo ocurre con **arteriolas** y **capilares** y sigue un proceso inverso en **venas**. Esta disposición está resumida en la Fig. 9.3. Nótese que el gran incremento ocurre en las arteriolas y capilares. Si el área de la aorta puede estimarse en 7 cm², el área de todos los capilares es superior a los 4000 cm², aunque el radio de **un** capilar sea de 8 μm = 8 · 10⁻⁴ cm y su área de 2·10⁻⁶ cm².

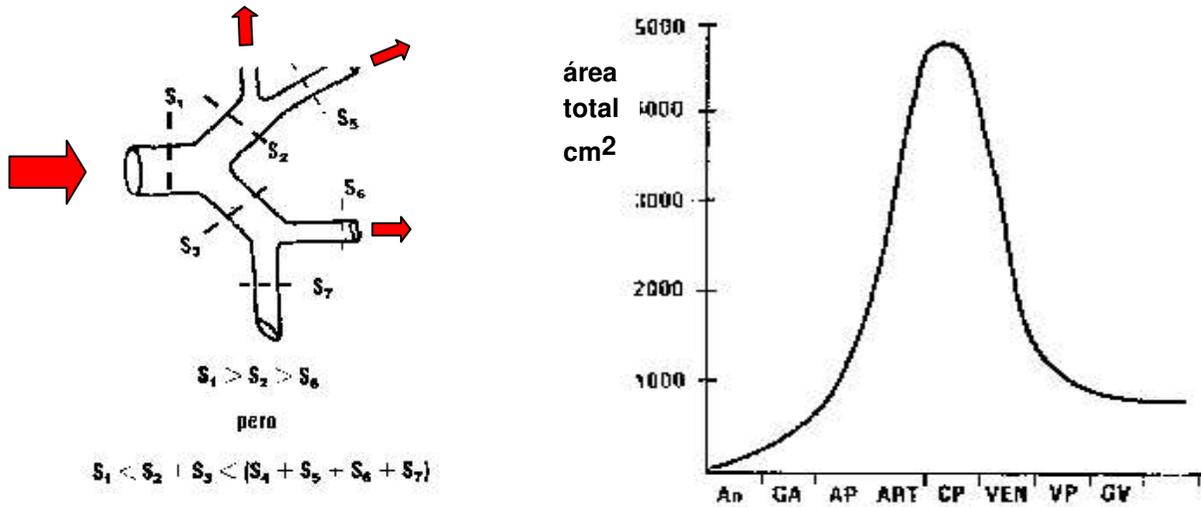


Fig. 9.3. Ramificaciones del sistema circulatorio. A la izquierda: la sección de **cada una de las ramas** es progresivamente menor, pero la **suma de las secciones** es progresivamente mayor. A la derecha: el área total de cada uno de los segmentos vasculares (Ao: aorta; GA: grandes arterias; AP: arterias pequeñas; ART: arteriolas; CP: capilares; VEN: vénulas; VP: venas pequeñas; GV: grandes venas)

Lo que se mueve por el sistema circulatorio del hombre es SANGRE, compuesta por agua y sustancias disueltas formando soluciones verdaderas (glucosa, urea, ácido úrico, bicarbonato, sodio, potasio, etc.), soluciones coloidales (proteínas plasmáticas) y suspensiones (eritrocitos). Todo ello forma un líquido que presenta **viscosidad**. Por ahora sólo es necesario entender que la viscosidad es una **propiedad del líquido** que se opone a que éste fluya. Dicho de otra manera, porque la sangre tiene viscosidad, en el sistema circulatorio existe una **resistencia** al flujo de sangre. Y, siguiendo con este razonamiento, si pese a la resistencia, la sangre fluye de un modo constante, es porque existe una fuente de energía, una bomba, el **corazón**, que permite recuperar la energía que se pierde por efecto de la viscosidad.

9.3 VOLÚMENES, FLUJOS, PRESIONES Y VELOCIDADES EN EL SISTEMA CIRCULATORIO

- **Volumen sanguíneo o volemia**

En el Cap. 1 se señaló que el **volumen de agua** del intravascular se podía calcular como el 5 % del peso corporal y para un hombre de 70 kg, como unos 3,5 L de **agua** intravascular. El volumen total ocupado por la **sangre** recibe el nombre de **volemia** y es el volumen de agua y el volumen ocupado por los sólidos del plasma y los sólidos de las células sanguíneas. La volemia es de unos 70 a 80 mL de sangre por kilogramo de peso corporal y, para el sujeto de 70 kg, unos 4900 a 5600 mililitros de sangre. Un valor fácil de recordar, y que usaremos de aquí en adelante, es el de 5000 mL (5 L) para un adulto sano.

Si pudiéramos detener bruscamente la circulación y medir el volumen de sangre en las distintas partes del cuerpo y en los distintos segmentos del árbol arterial, veríamos que estos 5 litros de sangre no están homogéneamente distribuidos. Hay más sangre por debajo del diafragma que por arriba de él y esta diferencia aumenta notablemente cuando el sujeto se pone de pie. También hay más sangre en las venas, en especial en las de pequeño calibre, que en el sector arterial y muchísimo más que en los capilares. Esto nos da una idea de la **capacidad y distensibilidad** de las venas, un tema sobre el que volveremos.saaaff

• VOLUMEN MINUTO O GASTO CARDIACO

El corazón, actuando como una bomba mecánica, impulsa la sangre por la aorta. El volumen de sangre que pasa en un minuto por la aorta es un **flujo o caudal (Q)** y, como tal, se podría medir en cualquiera de las unidades siguientes:

$$Q = \frac{\text{volumen } V}{\text{tiempo } t} = \frac{V}{t}$$

L/s; cm³/min; cm³/s; mL/ min; L/ min; etc.

Sin embargo, lo habitual es hablar del **gasto cardíaco** en litros por minuto. Cuando se quiere realizar algunos cálculos hemodinámicos se usan las unidades mL/min o cm³/s.

5 L/min para el gasto cardíaco es también una cifra fácil de recordar, pero que sólo debe usarse como válida para un sujeto adulto **en reposo** ya que durante un ejercicio intenso puede aumentar hasta 5 veces su valor basal.

OTROS MODELOS DE SISTEMA CIRCULATORIO

El sistema circulatorio del hombre, con una circulación pulmonar y otra sistémica y un corazón de cuatro cámaras, es la disposición general en aves y mamíferos pero vale la pena revisar qué ocurre en otras especies. Así, pese a su tamaño, las células de una medusa obtienen el oxígeno y los nutrientes por difusión, sin sistema circulatorio alguno. Tampoco tienen sistema circulatorio las lombrices planas, en las que un sistema digestivo con muchas ramificaciones permite colocar las sustancias a una distancia razonable de las células. Mientras estas lombrices son sólidas, en otros nematodos existe una cavidad central llena de líquido y serán los propios movimientos del animal los que lo propulsarán hacia adelante y atrás, haciéndolo circular. Los insectos tienen, dentro de la cavidad central, un tubo con actividad contráctil que bombea el líquido de la cavidad a través de canales y hendiduras. Es un **sistema abierto** ya que no hay una separación entre la "sangre", confinada en tubos, y el líquido intersticial. En las lombrices segmentadas (anélidos) hay una cavidad central y hay un sistema circulatorio **cerrado**, con 10 corazones (5 a cada lado) por cada segmento, que impulsa la sangre por un vaso dorsal hacia otro ventral. En los vertebrados el sistema circulatorio es cerrado y el más sencillo podría haber estado constituido, en los primitivos cordados, por un vaso que propulsa la sangre por movimientos peristálticos. En los peces, las branquias constituyen un importante lecho de resistencia al flujo y hay un corazón, con una cámara de recolección (aurícula) y una de expulsión (ventrículo) ya diferenciados. La presión creada por el ventrículo impulsa la sangre por las branquias, donde la presión cae y la sangre oxigenada recorre el cuerpo por "vis a tergo", como lo hace la sangre venosa en el hombre. En los anfibios hay circulación pulmonar y sistémica, pero con dos aurículas y un ventrículo. La sangre oxigenada en el pulmón llega a la aurícula derecha y pasa al ventrículo donde, en parte, es bombeada al pulmón y en parte a la circulación general, de donde regresa a la aurícula izquierda. Hay una situación nueva, el "rebombear" de sangre luego de pasar por los pulmones, pero hay una mezcla permanente de sangre venosa y arterial. En los reptiles persisten las tres cámaras, pero un tabique colocado en el ventrículo hace que la mezcla de sangre sea menor. Esta separación es completa en el cocodrilo, donde el sistema funciona con cuatro cámaras, una disposición que se repite en aves y mamíferos.

La aorta no es el único sitio donde se puede medir el gasto cardíaco. Si pasan 5 L/min por la aorta, ese será el caudal de la vena cava inferior y la vena cava superior **sumados**. Ese será también el caudal de la arteria pulmonar y el caudal de **todas** las venas pulmonares. Obviamente, si del ventrículo izquierdo salen 5 L/min, por **todos** los capilares pasan 5 L/min. Lo que sí no hay duda es que es más sencillo medir el flujo en la aorta que, al mismo tiempo, en **todos** los capilares y es por eso que, cuando se habla de gasto cardíaco se refiere, por lo general, a una medida hecha a la salida del ventrículo izquierdo. En la Fig. 9.4 se muestra que, en todas las ramas, la suma de los caudales es igual al caudal original

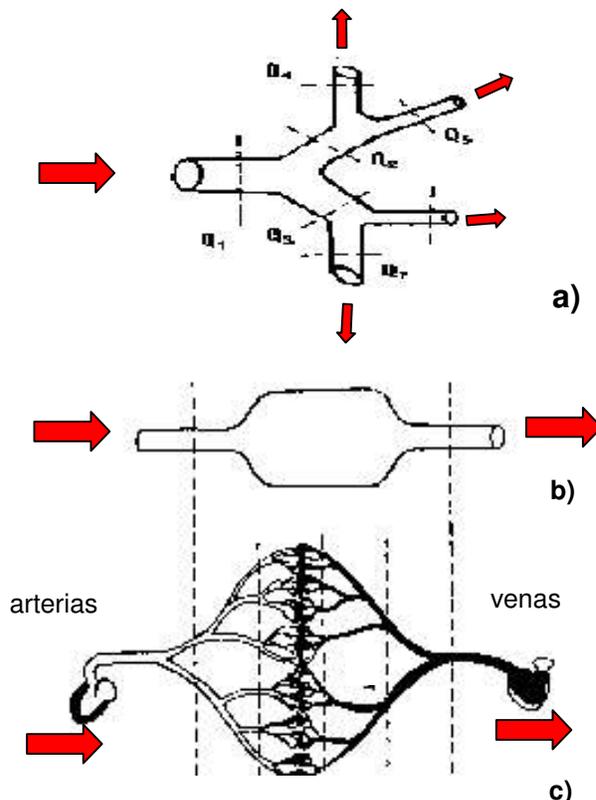


Fig. 9.4 Tres maneras de entender las características del sistema circulatorio. a) El área transversal total de las ramas es mayor que el área del tronco principal. b) El flujo de entrada es igual al flujo de salida, pero pasa por un especie de "lago", muy ancho. c) las arterias se ramifican en arteriolas y capilares y el flujo de entrada es colectado por las vénulas y venas, para llegar a la aurícula y ventrículo derecho

- **El gasto cardíaco como producto del volumen sistólico por la frecuencia cardíaca**

El corazón es una bomba que expulsa la sangre siguiendo ciclos o **latidos** formados por la **diástole**, período durante el cual la sangre ingresa al corazón y la **sístole** en que es expulsada. Estos ciclos se repiten con una frecuencia (**f**) de unos 80 latidos por minuto en reposo hasta más de 180 por minuto durante el ejercicio. Si aceptamos un gasto cardíaco de 5 L/min y una frecuencia de 80 latidos/min tendremos que por cada sístole se expulsan $5000 \text{ mL} / 80 = 62,5 \text{ mL/latido}$ se conoce como **volumen latido** o **volumen sistólico (VS)**. Sería lógico pensar que si se aumenta la frecuencia cardíaca aumenta simultáneamente el gasto cardíaco, ya que:

$$Q = f \cdot VS$$

Sin embargo, se necesita un tiempo para llenar las cavidades cardíacas y al aumentar la frecuencia este tiempo disminuye, lo que provocaría una disminución de VS, y Q no aumentaría en forma lineal con la frecuencia y la relación anterior sólo es válida a VS constante.

- **El índice cardíaco o gasto cardíaco por metro cuadrado de superficie corporal**

Si bien la cifra de 5 L/min de gasto cardíaco es fácil de recordar, es evidente que éste no puede ser igual para un hombre sano de 1,80 m de altura y 78 kg de peso que para un hombre también sano pero de 1,60 m de altura y 55 kg de peso. La manera de normalizar la medida es dividiendo el gasto cardíaco por la **superficie corporal** (SC) del sujeto. La superficie corporal se encuentra en tablas y nomogramas conociendo el peso y la altura. Si no se dispone de estas tablas, con una calculadora se la obtiene fácilmente, a partir de la fórmula de Du Bois y Du Bois:

$$SC = \text{Peso}^{0,425} \cdot \text{Altura}^{0,725} \cdot 71,84$$

El índice cardíaco "normal" o habitual es de 3-3,5 L . min⁻¹ . m⁻², estando el sujeto en reposo.

- **Presiones en el sistema circulatorio del hombre**

Todos los puntos del sistema circulatorio, ya sea la aorta, los capilares o las venas, se encuentran a una **presión** que es, generalmente y con el **sujeto acostado**, mayor que la presión atmosférica, la que rodea a todo el cuerpo del sujeto. Se dirá, por ejemplo, que en una arteria hay 100 mm Hg y en una cierta vena hay 3 mm Hg, indicando que en la arteria hay 100 mm Hg **más** que en la atmósfera y en la vena 3 mm Hg **más** que en la atmósfera. Esta manera de señalar las presiones es absolutamente válida si se tiene en cuenta que la sangre circula, venciendo la resistencia que le ofrece la **viscosidad de la sangre**, siempre que entre 2 puntos del sistema circulatorio haya una **diferencia de presión**. No importa, entonces, el valor absoluto de la presión. Un buzo a 40 m de profundidad está sometido a 5 atmósferas de presión (la atmosférica + 1 atmósfera por cada 10 m de profundidad) y su sangre seguirá circulando con una **diferencia de presión** igual a la de un hombre en la superficie. En clínica es rutinario usar "milímetros de mercurio" para las presiones arteriales y "milímetros de agua" para presiones venosas por el tipo de **manómetros** que se usan para medirlas. En la Fig. 9.5 se ha dibujado un manómetro sencillo. Es un tubo de vidrio doblado en U y con mercurio en su interior. En a) se ve que las dos ramas están abiertas a la atmósfera y, de ese modo, reciben la misma presión y están a igual nivel. En b) se ha conectado una de las ramas, por medio de una tubuladura llena de solución salina y una aguja hipodérmica, a la arteria de un sujeto. Se ve que el nivel de líquido en la rama izquierda bajó y en la rama derecha subió. La diferencia de altura, medida con una simple regla, nos da los "mm de mercurio" de presión. En este ejemplo 100 mm Hg.

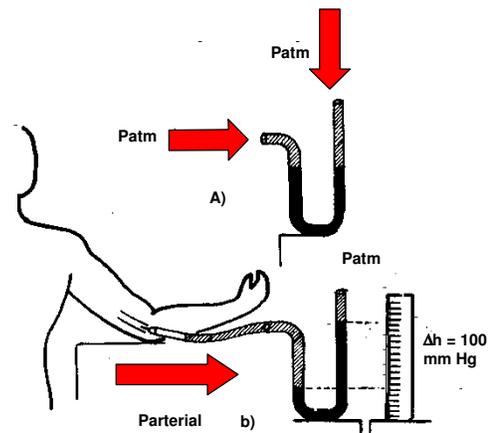


Fig. 9.5 Medición de la presión arterial (método directo - una aguja insertada en la arteria) Se mide por la diferencia de altura de las 2 ramas

Pero ¿qué es una presión? La presión es una magnitud intensiva (en el fondo de un recipiente hay la misma presión en 1 cm² que en 1 m² o en 1 km²) y es:

$$\text{Presión} = P = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{F}{A}$$

De acuerdo al SI (Sistema Internacional) su unidad es el **Pascal (Pa)**

$$P = \text{Newton} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa} \quad \text{y el kilopascal}$$

$$P = 1000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kPa}$$

y en el c.g.s: $P = \text{dina} \cdot \text{cm}^{-2}$

COMO SE MIDE LA PRESIÓN ARTERIAL: EL MÉTODO INDIRECTO

La manera habitual de medir la presión arterial en clínica es por medio del **método indirecto** usando un esfigmomanómetro. Este consiste en un manguito o brazaletes inflable que se enrolla en el brazo del paciente. La presión **dentro del brazaletes** se mide con un manómetro de mercurio o un manómetro aneroide (un tubo cerrado en forma de espiral cuyo radio de curvatura aumenta con la presión y mueve una aguja). La presión sistólica (máxima) y diastólica (mínima) se determinan, usando un estetoscopio colocado sobre la arteria humeral, a través de la auscultación de los "**ruidos de Korotkoff**". Hay 5 fases en los ruidos de Korotkoff y las fases I, IV y V son usadas como claves de la medida de la presión arterial.

El primer paso es inflar el manguito con una presión francamente mayor a la presión sistólica (p. ej.: 250 Hg), lo que determinará el cierre de la arteria por la presión que ejercen las masas musculares. No se oirá ningún ruido a través del estetoscopio. Luego se comienza lentamente a desinflar el manguito, observando la columna de mercurio. En un momento dado se comenzará a oír ruidos o golpes que coinciden con la sístole (FASE I) y la lectura del manómetro en ese momento indicará la presión sistólica. Se sigue, entonces, bajando la presión en el manguito y se notará que, primero (FASE IV), hay un cambio de tonalidad en los ruidos y segundo (FASE V), los ruidos desaparecen. La diferencia entre "cambio" y "silencio" no suele ser mayor a unos pocos mmHg.

La presión diastólica parece estar más cercana al cambio que al silencio, pero como éste es más difícil de percibir, se suele anotar como diastólica la presión en la que los ruidos desaparecen. En algunos servicios hospitalarios se anota, por ejemplo, 120/80/75 para indicar los tres momentos del registro, pero para las estadísticas de salud se usa sólo las medidas derivadas en la fase I y V. ¿Cuál es el origen de los ruidos de Korotkoff? La FASE I se debe a que la sangre comienza a pasar por una arteria estrechada. Eso determina un aumento de la velocidad local que, al encontrarse, debajo del manguito, con una arteria de radio normal, hace que aparezca un **flujo turbulento**, ruidoso. Esta turbulencia ocurre sólo en la sístole porque es el momento en el que la presión arterial logra vencer la presión externa. Estos golpes son reemplazados por un murmullo suave (FASE II) y por un murmullo más intenso (FASE III). Con una presión externa cercana a la diastólica el flujo se vuelve **laminar**, silencioso (FASES IV y V). Lo habitual es realizar este procedimiento con el paciente acostado pero, sobre todo cuando se utilizan drogas hipotensoras, puede ser importante repetir la medida con el paciente sentado y de pie.

La presión en mm Hg es fácilmente convertible en dina/cm² si se recuerda que, por el teorema general de la hidrostática:

$$P = h \cdot g \cdot \delta$$

donde:

h es la altura,

g es la aceleración de la gravedad (980 cm . s⁻²)

δ es la densidad del líquido (g/cm³)

Para el caso de la Fig. 9.5 (100 mm = 10 cm), usando mercurio:

$$P = 10 \text{ cm} \cdot 980 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 13,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 133280 \text{ dina} \cdot \text{cm}^{-2}$$

En general : **1 cm Hg = 13328 dina/cm²**

1 mm Hg = 1333 dina/cm²

Si bien el Pascal no es todavía de uso cotidiano, es una medida del SI y muchos manómetros llegan calibrados en mm Hg y en kPa. Si:

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^5 \text{ dina}}{10^4 \text{ m}^2} = 10 \text{ dina/cm}^2$$

y si 10 dina . cm⁻²1 Pa

1333 dina . cm⁻² x =133 Pa = 0,133 kPa

entonces

$$1 \text{ mmHg} \rightarrow 0,133 \text{ Pa}$$

` 1

EL CICLO CARDIACO

Los cálculos y análisis de funcionamiento del sistema circulatorio que se hacen en este capítulo están basados en presiones, velocidades o caudales **medios**, sin tener en cuenta las variaciones sistólicas y diastólicas. Sin embargo, para entender, por ejemplo, las curvas de Frank-Starling, es necesario saber el ciclo cardiaco. Podemos empezar con la sístole ventricular, usando el nombre de las válvulas del corazón izquierdo, entendiéndose que lo mismo ocurre con el corazón derecho: 1) **sístole ventricular**: el ventrículo se empieza a contraer, estando la válvula mitral y aórtica cerrada: hay un aumento de la presión ventricular, sin reducción del volumen ventricular. Es la **contracción isovolumétrica** o periodo isométrico. 2) La válvula aórtica se abre y comienza el **periodo de expulsión**: primero una fase de eyección rápida: el (lujo aórtico aumenta, el volumen ventricular comienza a disminuir y la presión aórtica aumenta. A esta fase sigue, con la válvula aórtica todavía abierta, una fase de eyección más lenta (fase de eyección reducida), el volumen ventricular sigue disminuyendo y el flujo aórtico es menor. 3) **diástole ventricular**: La válvula aórtica se cierra y el ventrículo comienza a relajarse, pero con la válvula mitral todavía cerrada (**relajación isolumétrica**), la presión intraventricular cae. 4) La válvula mitral se abre y comienza la fase de llenado ventricular rápido: el volumen ventricular aumenta, con una presión ventricular baja. 5) Con la válvula mitral todavía abierta, el llenado es más lento, el volumen ventricular aumenta lentamente con una presión intraventricular baja. 6) La aurícula se contrae y la sangre contenida allí pasa al ventrículo. 7) La válvula mitral se cierra, recomenzando el ciclo. (**Ver análisis de las curvas de presión y volumen**)

Para medir la presión venosa es preferible usar un manómetro lleno de solución salina (**manómetro de agua**), con densidad muy cercana a 1 g/cm^3 , ya que la presión es baja. Una presión de 5 mm Hg es muy difícil de medir con un manómetro de mercurio, pero con uno de agua los 5 mm se convierten en:

1 mm Hg 13,6 mm H₂O

5 mm Hg x = 68 mm H₂O = 6,8 cm H₂O y en general

1 mm Hg = 1,36 cm H₂O

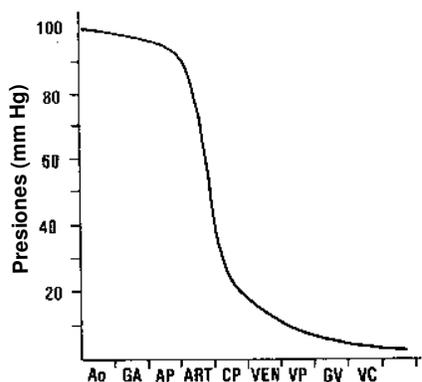


Fig. 9.6 Presiones en la circulación sistémica. Nótese que la mayor caída de presión ocurre en las arteriolas

En la Fig. 9.6 se pueden ver las presiones, en mm Hg, que se encuentran habitualmente en los distintos segmentos del sistema circulatorio correspondiente a la circulación general. Nótese que la presión **cae** muy poco al pasar por la aorta y las grandes arterias o aun por arterias pequeñas, para presentar una gran caída al pasar por las arteriolas. Si recordamos lo señalado en la Fig. 6.7 del Capítulo 6, esto sería una indicación de que existe poca **resistencia** al flujo de la sangre para su paso por la aorta y las arterias, mientras que la resistencia es un valor importante en las arteriolas

Presión sistólica, presión diastólica, presión de pulso y presión arterial media.

Lo habitual es decir que el corazón funciona como una **impelente y pulsátil**. Es impelente porque fundamentalmente **impulsa** la sangre en un sentido creando presiones positivas. Es pulsátil porque tiene ciclos, con momentos en que la presión alcanza un valor alto y luego baja. En la Fig. 9.7 se ve que hay una presión máxima que coincide con la **sístole ventricular**, por lo que se la llama **presión sistólica (PAS)**. Su valor es de unos 120 mm Hg. El punto de menor presión corresponde al final de la **diástole ventricular**, por lo que se la llama **presión diastólica (PAD)** y su valor es de unos 80 mm Hg. Es la "máxima" la "mínima" de la jerga médica.

A la diferencia entre PAS y PAD se la conoce como **presión de pulso**. Así:

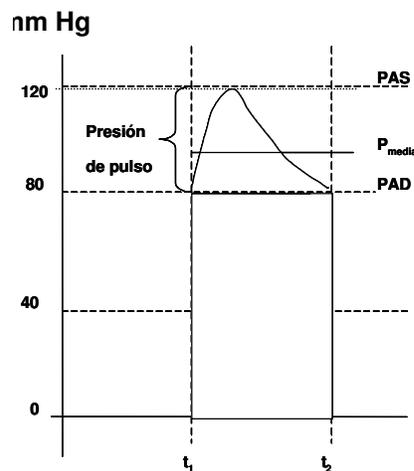


Fig. 9.7 Presiones en la aorta durante el ciclo cardíaco

$$P_{\text{pulso}} = P_{\text{AS}} - P_{\text{AD}} = 120 - 80 \text{ mm Hg} = 40 \text{ mm Hg}$$

Ahora, si la PAS es 120 mm Hg y la PAD de 80 mm ¿de donde salen los 100 mm Hg de presión aórtica que hemos venido usando y se muestra en la Fig. 9.7? Se trata de la presión arterial media (PAméd), la presión continua que debería existir en el sistema para cumplir las mismas funciones que la presión pulsante de la sistólica y la diastólica. Una manera rápida de calcularla es

$$P_{\text{Améd}} = P_{\text{AD}} + \frac{1}{3} (P_{\text{AS}} - P_{\text{AD}}) \quad P_{\text{Améd}} = 80 + \frac{1}{3} (120 - 80) = 93,3 \text{ mm Hg}$$

Por comodidad se usa: $P_{\text{Améd}} = 100 \text{ mm Hg}$

Nota: Debe comprenderse que la intención de este capítulo es enseñar cómo se pueden aplicar las leyes de hidrodinámica al sistema circulatorio del hombre. Si lo intentáramos con un sistema pulsátil, con su PAS y PAD, tendríamos que hablar de un caudal sistólico y uno diastólico, etc., etc... lo que sería sumamente complicado. La presión media funciona para nosotros y es la que usaremos en todo el capítulo cuando hablemos de "P". (Ver "El ciclo cardíaco" y las figuras de la página 13)

- **Velocidades de la sangre en el sistema circulatorio**

La **velocidad** de la sangre se determina, como en cualquier otro sistema, sabiendo el tiempo que tarda una partícula en recorrer una cierta distancia.

$$\text{Velocidad} = v = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{d}{t}$$

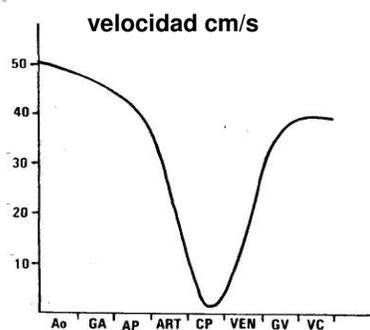


Fig. 9.8. Velocidades de la sangre en la circulación sistémica

es cm/s y la velocidad media de la sangre en la aorta es del orden de los 40 a 50 cm/s, mientras que en los capilares es 0,02 a 0,06 cm/s. En la Fig. 9.8 se muestra la velocidad de la sangre en cada uno

EI PULSO, LA ONDA DE PULSO Y LA ONDA DE PRESION

La toma del **pulso** en las arterias, especialmente la radial es, sin duda, el procedimiento médico más común y rutinario. El examinador, adoptando generalmente una postura seria y grave, pone sus dedos índice y medio en la muñeca del paciente y siente. La pregunta es: ¿Qué es lo que siente? Siente, claro, dilataciones rítmicas de la arteria que le permitirán decir, por ejemplo, que el pulso es regular (cada golpe está separado del otro por intervalos iguales), igual (cada golpe tiene la misma intensidad) y de una frecuencia de 72 por minuto. Son datos muy útiles, pero hay que entender su significado. La sístole ventricular tiene una duración de unos 0,3 s y en ese tiempo se expulsa el volumen sistólico, que creará un aumento de presión en la aorta, un aumento de velocidad de la sangre y una distensión de las paredes arteriales. Al ser la actividad cardíaca un fenómeno rítmico se crearán **ondas de presión, ondas de velocidad y ondas de pulso** que se irán propagando por el árbol vascular. Esta última resulta de la propagación, a través de la **pared** de las arterias, del incremento y disminución rítmico del diámetro de la aorta y las grandes arterias. La velocidad con que se propaga la onda de pulso es de 4 a 10 veces mayor que la velocidad de la sangre, por lo que el médico sentirá, en la arteria radial, por ejemplo, que se ha producido un latido antes que la sangre expulsada por ese latido llegue a la muñeca del paciente. Como se sabe, en una arteria estrechada la velocidad de la sangre aumenta y puede ocurrir que la onda de velocidad alcance a la de pulso. Esa situación provocaría vibraciones de la pared muy intensas y ha sido invocado como hipótesis alternativa para explicar los ruidos de Korotkoff, tradicionalmente atribuidos a turbulencia de la sangre.

de los segmentos del sistema circulatorio. Si se la compara con la Fig. 9.3 se verá que una es la inversa de la otra: cuando el área de sección transversal de **todos** los vasos aumenta, como en los capilares, la velocidad disminuye y cuando el área de sección transversal disminuye, como en el territorio venoso, la velocidad aumenta.

Esta relación inversa entre área de sección y velocidad sólo es válida si entre uno y otro territorio el caudal es el mismo. En la Fig. 9.9 se muestran dos casos. En a) el caudal en 1 es el mismo que en 2 y como la área en 2 es mayor que el área en 1, la velocidad en 2 es menor que la velocidad en 1, de modo que se cumple:

$$Q_1 = Q_2 = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

ya que

$$\text{Caudal} = \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Velocidad} = \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Area} = \text{cm}^2$$

$$Q = \text{Velocidad} \cdot \text{área} = \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$$

$$Q = \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

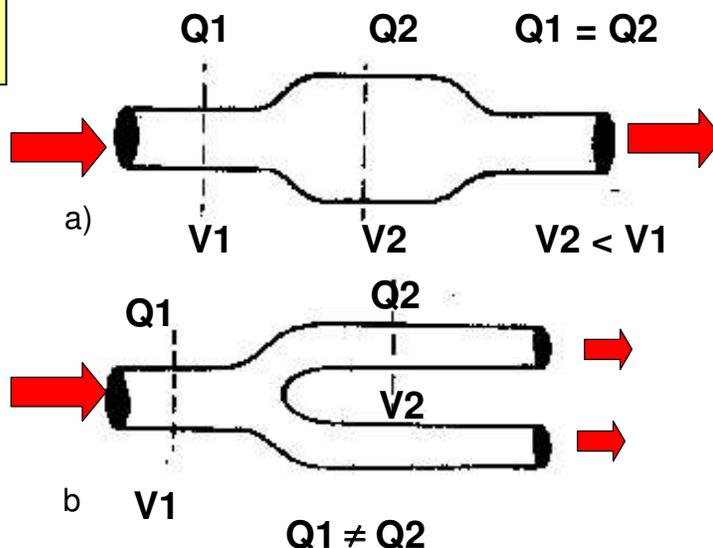


Fig. 9.9 La ecuación de continuidad sólo se cumple en los segmentos de igual caudal (panel a)

El producto velocidad por área es la **ecuación de continuidad**, y no se puede aplicar en el caso b) para calcular la velocidad en una rama, ya que en esa rama el caudal es distinto al caudal en el tronco. Para el caso de los capilares, sabemos que el caudal en **todos** los capilares es igual al gasto cardíaco y, entonces, la relación inversa ente entre velocidad y área sí se cumple. Pese a que cada uno de los capilares tiene un diámetro pequeño, a los fines hemodinámicos el conjunto de los capilares se comporta como un gran lago donde desembocan varios ríos de corriente muy rápida: la velocidad disminuye.

- **El cateterismo cardíaco, los flujos y las presiones en el ventrículo izquierdo y la aorta**

El cateterismo cardíaco consiste en la introducción, por una vena o arteria periférica, de un catéter delgado, flexible y opaco a los Rx, que es guiado, bajo control radiológico, hasta las cavidades derechas o izquierdas del corazón. Una vez allí se puede obtener: 1) Presiones. Estas se miden con un transductor de presión. Se llena el catéter con solución salina y se acopla un transductor de presión en el extremo de la tubuladura. 2) Presión parcial de oxígeno, presión parcial de dióxido de carbono y saturación de hemoglobina. Por el mismo catéter se pueden tomar muestras de sangre y medir estos parámetros. 3) Medición del gasto cardíaco. Se puede realizar utilizando el Principio de Fick y el Método de dilución del indicador (Ver las Fig. 9.10, 9.11, 9.12 y 9.13) (**ver al final del capítulo "Métodos Invasivos y no invasivos en hemodinámica clínica"**)

Fig. 9.10 Curva de presión el ventrículo izquierdo (mm Hg): 1-2: sístole auricular (la presión ventricular aumenta ligeramente); 2: cierre de la válvula mitral; 2-3: Fases de contracción isovolumétrica (la presión aumenta sin cambiar el volumen); 3: se abre la válvula aórtica; 3-4: Fase de expulsión rápida; 4-5: Fase de expulsión lenta; 5: cierre de la válvula aórtica; 5-6 Fase de relajación isovolumétrica; 6-7: Fase de llenado rápido; 7-8: Fase de llenado lento

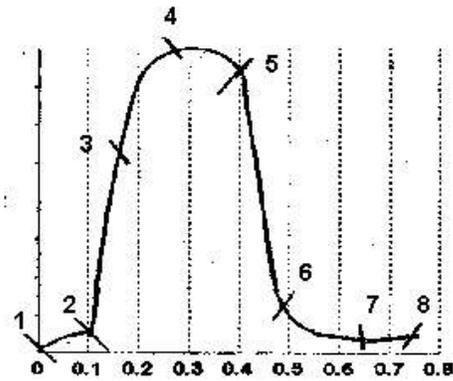


Fig. 9.11 Curva volumen ventrículo izquierdo (mL) 1-2: sístole auricular (el volumen ventricular aumenta por pasaje de sangre de A a V; 2-3: Fase isovolumétrica; 3-4 Fase de expulsión rápida (el ventrículo se vacía rápidamente) 4-5: ídem más lentamente; 5-6 Fase de relajación isovolumétrica; 6-7: Fase de llenado rápido; 7-8: Fase de llenado lento.

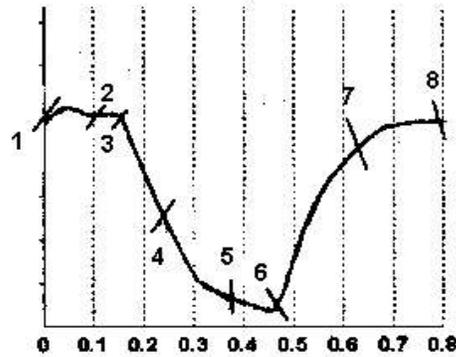


Fig. 9.12 Flujo ventrículo-aórtico en función del tiempo: (L/min) 1-2: No hay flujo aórtico. La válvula aórtica está cerrada; 2-3: Fase isovolumétrica (se contrae el ventrículo con las válvulas cerradas); 3: la válvula aórtica se abre; 3-4: el flujo aórtico alcanza su máximo; 4-5: el flujo cae al comenzar la diástole; 5-6: cese la expulsión de sangre del ventrículo a la aorta; 6-7 y 7-8: igual

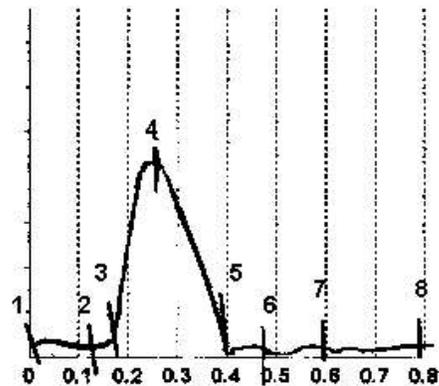


Fig. 9.13 Curva de presión en la aorta (mm Hg) 1-2: La presión es mantenida en la "mínima" por la elasticidad de la aorta (la válvula aórtica esta cerrada. 2-3: contracción isovolumétrica del ventrículo; 3: la válvula aórtica se abre; 3-4: la presión aumenta hasta llegar al máximo; 4: PAS; 5: la válvula aórtica se cierra; 5-6: la presión disminuye hasta alcanzar la PAD

