

Libros de **Cátedra**

# Biofísica para estudiantes de Ciencias Veterinarias

Fernanda Coll Cárdenas y Daniela Olivera (coordinadoras)

**n**  
naturales

FACULTAD DE  
CIENCIAS VETERINARIAS



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA

# **BIOFÍSICA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS VETERINARIAS**

Fernanda Coll Cárdenas  
Daniela Olivera  
(coordinadoras)

Facultad de Ciencias Veterinarias



# CAPÍTULO 8

## Biofísica de la circulación sanguínea animal

*Romina Becerra, Joaquín Bruzzo Lafratto, Francisco Pellegrino*

### Fluidos

Si buscamos una definición de fluido encontraremos que se trata de toda sustancia que se deforma de manera continua al actuar sobre ella una fuerza tangencial. Los fluidos incluyen a los líquidos y a los gases. Repasemos las características de estos últimos según el estado de agregación de la materia:

Líquidos: poseen volumen definido adoptando la forma del recipiente que los contiene, son ligeramente compresibles y sus moléculas presentan movimiento libre predominando las fuerzas de atracción entre ellas.

Gases: carecen de volumen y forma propios, son sensibles a los cambios de presión y temperatura, el movimiento de sus moléculas es libre, predominan las fuerzas de repulsión presentando una mayor distancia entre las moléculas.

### Algunas definiciones

En este Capítulo nos vamos a concentrar en características y definiciones relativas a los líquidos. Se considera un **líquido ideal** al que no ofrece resistencia al desplazamiento, si un líquido de esas características se encontrara en un tubo circular una vez puesto en movimiento fluiría permanentemente, sin ser sometido a una fuerza externa, ya que no se producirían rozamientos que lo detengan. De esto se desprende que un líquido ideal no forma torbellinos, no posee viscosidad, las capas que lo forman no se adhieren entre sí, no experimenta pérdida de energía por frotamiento y no sufre pérdidas por presión, siendo perfectamente incompresible y perfectamente móvil.

En cambio, un **líquido real** puede ser levemente compresible, su movimiento puede ser laminar o turbulento, dependiendo de la velocidad, densidad y geometría del recipiente, ofrece resistencia al desplazamiento (viscosidad), con pérdida de energía al producirse el frotamiento y sufre pérdidas de presión.

Se denomina **línea de corriente** a la trayectoria seguida por una partícula de un líquido en movimiento. El conjunto formado por todas las líneas de corriente que atraviesan una determinada sección se denomina **vena líquida**. Cuando un fluido se encuentra en movimiento y sus propiedades estáticas y dinámicas (presión, temperatura, velocidad) en un punto determinado no se modifican, se dice que presenta un **régimen estacionario**.

## Dinámica de fluidos

### Teorema de Bernoulli

Este Teorema es una consecuencia del Principio de conservación de la energía mecánica aplicado a la circulación de un líquido ideal con régimen estacionario. Está basado en el concepto de que la energía total que entra a través de una sección es la misma que sale por la otra, siendo esto válido solamente para líquidos (Fig. 8.1).

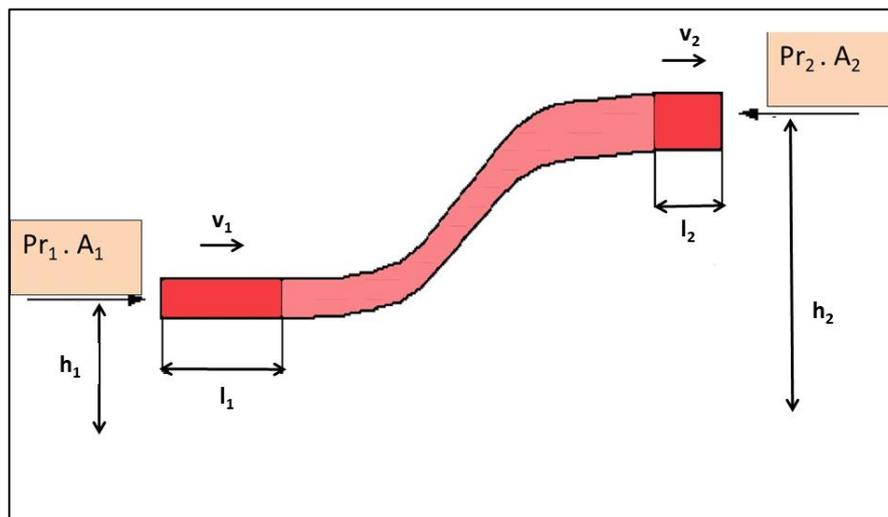


Figura 8.1: Esquema del Teorema de Bernoulli.

El teorema de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Como ya mencionamos, considera un fluido ideal circulando por un

conducto cerrado, afirma que la energía mecánica de un flujo incompresible y no viscoso (sin rozamiento) es constante a lo largo de una línea de corriente e implica una relación entre los efectos de la presión, la velocidad y la gravedad.

Debemos considerar que la energía de un fluido consta de tres componentes:

- a. Energía cinética ( $E_c$ ): es la energía debida a la velocidad que posee el fluido.
- b. Energía potencial gravitacional o de altura ( $E_p$ ): es la energía debida a la altura a la cual se encuentra el fluido.
- c. Energía de presión lateral ( $E_{pr}$ ): energía que el fluido contiene debido a la presión lateral que ejerce sobre las paredes del tubo.

Entonces, teniendo en cuenta la circulación de un líquido ideal, este teorema deduce que la sumatoria de estos tres tipos de energía permanece constante.

$$E_{pr} + E_p + E_c = Cte$$

$E_{pr}$  es equivalente al trabajo ( $W$ ) realizado sobre las paredes del tubo. Por lo tanto, matemáticamente podremos decir que:

$$(1) E_{pr} = W = F \cdot L = Pr \cdot A \cdot L = Pr \cdot V$$

$$(2) E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$(3) E_c = 1/2 m \cdot vel^2$$

Siendo: En (1)  $W$  = trabajo;  $F$  = fuerza;  $L$  = longitud;  $Pr$  = presión;  $A$  = área o superficie;  $V$  = volumen. En (2)  $m$  = masa;  $g$  = aceleración de la gravedad;  $h$  = altura. En (3)  $m$  = masa;  $vel$  = velocidad.

Aplicando el principio a cada unidad de volumen:

$$\frac{Pr \cdot V}{V} + \frac{m \cdot g \cdot h}{V} + \frac{1/2 m \cdot vel^2}{V} = \frac{Cte}{V}$$

Simplificando y reemplazando en esta ecuación diremos que:

$$Pr + \delta \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \delta \cdot vel^2 = Cte$$

En el árbol vascular este teorema no se cumple ya que la sumatoria de  $E_{pr} + E_p + E_c$  es mayor en el sector arterial que en el venoso.  $E_p$  y  $E_c$  permanecen constantes a lo largo de todo el árbol circulatorio, no así  $E_{pr}$ , siendo mayor en el lecho arterial que en el venoso. Además, la sangre no es un líquido ideal sino real (con pérdida de energía por frotamiento).

## Viscosidad dinámica

Newton definió la viscosidad dinámica como “la aspereza entre capas adyacentes de un líquido en movimiento”. También podemos definirla como la resistencia que los líquidos reales oponen a la deformación. Teniendo en cuenta un líquido ideal, podemos imaginarnos que discurre como una serie de láminas paralelas entre sí, con mayor velocidad en el centro y disminuye a medida que nos acercamos a las paredes del tubo que lo contiene. Si extraemos imaginariamente dos láminas de  $1 \text{ cm}^2$ , separadas por  $1 \text{ cm}$  de distancia y fuera necesario imprimirle a una de ellas una fuerza de una Dina para que exista entre las dos capas una diferencia de velocidad de  $1 \text{ cm/seg}$ , tendremos la unidad de viscosidad que fue denominada poise, en honor a Jean Poiseuille. El poise es una unidad muy grande y por eso se usa muy frecuentemente el centipoise ( $1 \text{ centipoise} = 0,01 \text{ poise}$ ) (Fig. 8.2).

Matemáticamente la fórmula se expresa como:

$$\eta = \frac{F \cdot h}{S \cdot vel}$$

Siendo:  $\eta$ = viscosidad dinámica

F= fuerza

h= altura

S= sección

vel= velocidad

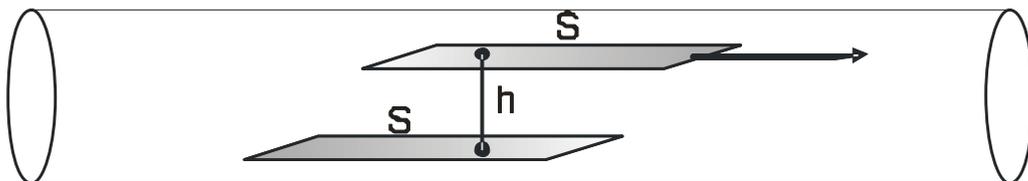


Figura 8.2: Esquema representativo de la viscosidad de un fluido que circula por un tubo

La viscosidad se modifica por los siguientes factores:

- Concentración: a temperatura constante, a medida que aumenta la concentración de soluto (sustancias disueltas), aumenta la viscosidad.
- Temperatura: El coeficiente de viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura, lo cual es lógico ya que al modificarse las fuerzas intermoleculares se han de modificar también los efectos de rozamiento entre las partículas líquidas que dan lugar a la viscosidad.

A concentración constante, la viscosidad de un fluido es tanto menor cuanto mayor es la temperatura, es decir que guarda una relación inversa.

### **Caudal. Ecuación de continuidad**

Como vimos en el Capítulo 1, se denomina caudal (Q o C) a la relación entre el volumen de líquido que discurre por una determinada sección de un tubo y el tiempo durante el cual ese volumen ha circulado.

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Imaginando que el líquido atraviesa todos los puntos de una determinada sección (S) con la misma velocidad (vel), esta puede relacionarse con el caudal. El espacio ( $\Delta x$ ) recorrido por el frente de este líquido en un tiempo ( $\Delta t$ ) dado quedará definido como:

$$\Delta x = vel . \Delta t$$

Durante este tiempo habrá atravesado la sección S un volumen ( $\Delta V$ ) de líquido expresado por:

$$\Delta V = S . \Delta x$$

$$\Delta V = S . vel . \Delta t$$

Por lo cual, pasando  $\Delta t$  al primer miembro se obtiene (Fig. 8.3):

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = S . vel$$

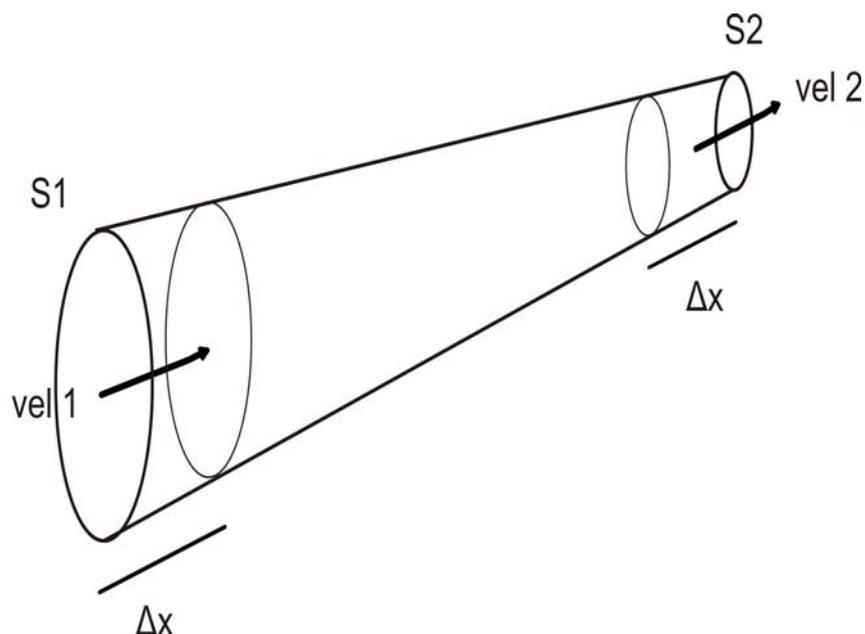


Figura 8.3. Representación de la ecuación de continuidad.

Esta relación se conoce como Ecuación de continuidad, la misma describe que el caudal ( $Q$ ) permanece constante en cualquier sección de un tubo por el cual circula un líquido ideal, con régimen estacionario y a temperatura constante:

$$Q = S_1 \cdot vel_1 = S_2 \cdot vel_2 = S_n \cdot vel_n$$

Esta ecuación puede utilizarse en el caso de los líquidos reales teniendo en cuenta la sección total y considerando como velocidad a la velocidad media, ya que en el caso de los líquidos reales las distintas capas de fluido adquieren diferentes valores de velocidad, siendo máxima en el centro y disminuyendo a medida que el fluido se acerca a las paredes del tubo que lo contiene.

### Ley de Poiseuille

Un líquido real en circulación, presenta cierta resistencia al desplazamiento, por lo cual es necesario que se realice cierto trabajo, implicando por tanto un gasto de energía. Esa resistencia a fluir es una propiedad común de todos los líquidos reales. La energía necesaria para mantener el movimiento puede provenir de una bomba (el corazón en el caso del aparato circulatorio) que genere una diferencia de presión ( $\Delta P$ ) entre los extremos del sistema.

Poiseuille determinó experimentalmente que cuando un líquido de viscosidad ( $\eta$ ) circula como formado por varias láminas o capas paralelas (flujo laminar) en un tubo rígido de radio ( $r$ ) y de longitud ( $l$ ) se observa que el caudal queda determinado por la siguiente expresión:

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

Donde: Q= caudal (cm<sup>3</sup>/s)

$\Delta P$ = diferencia de presión entre los puntos (Dinas/cm<sup>2</sup>)

r= radio del tubo (cm)

$\eta$ = viscosidad dinámica (poise)

l= longitud entre los puntos (cm)

Podemos decir entonces que el caudal es directamente proporcional a la diferencia de presiones entre dos puntos y que, de todos los términos de la ecuación, el radio se destaca por estar elevado a la cuarta potencia. Esto último implica que si duplicamos el radio y los otros factores permanecen constantes, el caudal aumentará 16 veces. Por lo tanto, para mantener el caudal constante la diferencia de presión deberá disminuir en la misma magnitud.

Por otro lado, sabemos que el caudal va a ser inversamente proporcional a la resistencia (R) que presente el líquido en cuestión a fluir, la cual depende de la viscosidad y de las características del sistema de tubos que lo contiene. La resistencia puede calcularse entonces como:

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

Por lo tanto:

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

## Flujo laminar y turbulento

Como explicamos anteriormente, cuando un líquido con una viscosidad determinada, circula por un tubo capilar, como si estuviese formado por capas o “láminas” paralelas entre sí, decimos que en estos casos el flujo se comporta como “laminar”.

Si este mismo líquido aumenta la velocidad con la que circula (como ocurre por ejemplo al reducir el diámetro del tubo), este flujo se altera, y se formarán remolinos o torbellinos, que alteran la velocidad y presión en diferentes puntos del tubo por el que circulan. El líquido ya no circula en capas, sino que se mezcla y da lugar a un flujo “turbulento” (Fig. 8.4) La velocidad por encima de la cual el flujo se vuelve turbulento se denomina velocidad crítica.

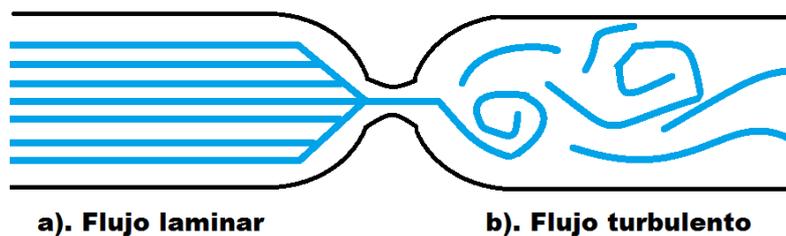


Figura 8.4: Diferentes tipos de flujo que experimentan los vasos. a) Flujo laminar; b) Flujo turbulento

Los factores que determinan si el flujo es laminar o turbulento están relacionados por el número de Reynolds ( $Re$ ), el cual es un número adimensional y matemáticamente se expresa como:

$$Re = \frac{\delta \cdot vel \cdot d}{\eta}$$

Donde  $\delta$  = densidad del fluido,  $vel$ = velocidad,  $d$ = diámetro del tubo,  $\eta$ = viscosidad dinámica.

Cuando el fluido circula en tubos rígidos y de diámetro uniforme, la transición entre flujo laminar y turbulento ocurre aproximadamente cuando  $Re$  adquiere un valor de **2100**. De esta ecuación deducimos que la probabilidad de que el flujo sea turbulento aumenta a medida que la densidad, la velocidad del fluido y el diámetro del tubo aumentan y a medida que la viscosidad disminuye.

## **Hidrodinámica. Hemodinámica**

La **hidrodinámica** se define como la parte de la Física que estudia la distribución de presiones y velocidades en el interior de una masa líquida en movimiento. Cuando hablamos del caso particular de la sangre en el interior de los vasos sanguíneos, lo definimos como **hemodinámica**. Esta disciplina se encarga de estudiar cómo se mueve la sangre por los vasos de diferente calibre, estos son: arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas, así como también la mecánica del corazón.

## **Lecho circulatorio. Ciclo cardíaco**

El corazón funciona como una especie de bomba muscular que, continuamente envía y recibe sangre como parte del sistema cardiovascular, El lado derecho (aurícula derecha) recibe sangre desoxigenada procedente de todo el cuerpo, siendo luego el ventrículo derecho quien bombea la sangre hacia los pulmones. Allí, la sangre se oxigena retornando por la aurícula izquierda al corazón, pasándola al ventrículo izquierdo que se contrae con mucha fuerza y la impulsa para ir a nutrir al resto del organismo. Por esta razón, el ventrículo izquierdo tiene una pared muscular mucho más gruesa, estando sometido a mayor presión.

El ciclo cardíaco es un proceso durante el cual se producen cambios sucesivos de volumen y presión en el corazón durante la actividad cardíaca (contracción (sístole) y relajación (diástole) del corazón). El miocardio se contrae como respuesta a la actividad eléctrica que se produce dentro del sistema conductor del corazón.

## **Presión sanguínea**

En cada ciclo cardíaco, el corazón ejerce mediante su actividad mecánica (contracción ventricular) presión sobre la sangre que posteriormente es transmitida hacia las arterias y venas. Así, podemos decir que la *presión sanguínea* es la fuerza ejercida por la sangre contra las paredes de los vasos sanguíneos (arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas). La presión sanguínea se mide frecuentemente en mm Hg (milímetros de mercurio).

Considerando que la sangre es un líquido que se encuentra en continuo movimiento, se producirá un descenso de la presión a lo largo del sistema circulatorio que dependerá de la resistencia que el flujo sanguíneo encuentre a su paso. Dicha caída será más importante en aquellas zonas en las cuales la resistencia hemodinámica es mayor. De esta forma, en las grandes arterias y venas del organismo, el descenso de la presión será menor que en aquellos

vasos de menor calibre, siendo en las arteriolas donde se producirá la mayor caída de la presión y consecuentemente, la mayor resistencia.

Entonces, la presión sanguínea dependerá de:

- Gasto cardiaco (GC). Es la cantidad de sangre que bombea el corazón en cada minuto. También llamado Volumen minuto.
- Resistencia periférica total o resistencia sistémica vascular (RSV). Es la resistencia que ofrece el sistema vascular al flujo de sangre.

$$\text{Presión sanguínea} = GC \cdot RSV$$

## **Presión en los diferentes vasos sanguíneos**

### **Arterias**

Las arterias tienen como función principal transportar la sangre a los tejidos. Por ello, están constituidas por paredes fuertes que permiten que la sangre circule en su interior a gran velocidad. De esta manera, la presión sanguínea que se origina en cada contracción ventricular es transmitida por las paredes elásticas de las arterias, lo que habitualmente se percibe como pulso.

La aorta es la principal arteria del organismo y la que presenta mayor diámetro. Toma origen en el ventrículo izquierdo del corazón. En condiciones normales, la presión arterial en la misma oscila aproximadamente entre un valor máximo de 120 mm Hg y un valor mínimo de 80 mm correspondientes a la presión sistólica y diastólica, respectivamente. Desde la aorta, el diámetro de las arterias irá disminuyendo hasta que finalmente las arterias más pequeñas se continuarán con las arteriolas, últimas ramas del sistema arterial.

### **Capilares**

Las arteriolas presentan una pared muscular muy fuerte que les permite controlar, dependiendo de las necesidades, el flujo sanguíneo que llega a cada área tisular. De allí que, las mismas pueden contraerse cerrando por completo su luz o, por el contrario, dilatarse varias veces.

La sangre llega a los capilares desde las arteriolas. Los capilares sanguíneos tienen como principal función el intercambio de nutrientes y productos de deshecho entre los tejidos y la sangre circulante. Esto es posible gracias a que presentan paredes muy delgadas formadas por una sola capa de células endoteliales, a la vez que poseen poros capilares que permiten el

pasaje de agua y otras sustancias. La presión sanguínea es disipada en gran medida cuando llega a los capilares, ya que el área total de los capilares ramificados es mayor que el área del vaso que los origina (arteriolas).

## Venas

Cuando la sangre abandona los capilares ingresa inicialmente a las vénulas. Estas últimas se unen gradualmente hasta formar venas de mayor tamaño. Las venas así formadas son las encargadas de llevar la sangre desde los tejidos de vuelta hacia el corazón. Las venas están constituidas por paredes muy delgadas, ya que la presión que queda dentro de estos vasos sanguíneos es muy pequeña. Sin embargo, el músculo que poseen en su pared es suficiente para poder contraerse, permitiendo que la sangre retorne en la dirección adecuada hacia el corazón. Asimismo, dependiendo de las necesidades de la circulación, las venas pueden dilatarse y cumplir la función de reservorios de sangre.

## Ley de Laplace

La ley de Laplace establece que la tensión en la pared de un vaso sanguíneo ( $T$ ) es directamente proporcional al producto de la presión transmural ( $P$ ) por el radio del vaso ( $r$ ). La  $P$  se origina a partir de la diferencia de presión entre el interior (presión sanguínea) y exterior del vaso (presión de los tejidos) y será, finalmente, la que ejercerán los vasos debido a la tensión de su pared. Es importante comprender que dicha tensión resultante es necesaria para mantener el radio del vaso sanguíneo (Fig. 8.5).

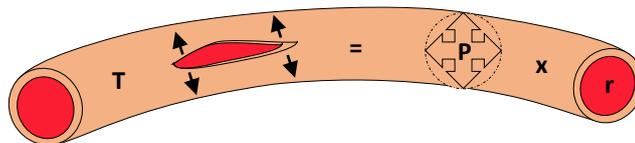


Figura 8.5: Representación de la Ley de Laplace en un vaso sanguíneo aislado.  $T$ , tensión;  $P$ , presión transmural;  $r$ , radio.

Matemáticamente, expresamos esta Ley como:

$$T = Pr \cdot r$$

Dónde:  $T$  = Tensión (Dinas/cm),  $P_r$  = Presión intramural (Dinas/cm<sup>2</sup>) y  $R$  = radio del vaso (cm)

Así, para una diferencia de presión dada, la tensión en la pared de un vaso sanguíneo es proporcional al incremento del radio. Es decir, cuanto mayor sea el radio del vaso, mayor es la tensión de la pared para soportar una determinada presión interna del fluido.

En situaciones en que la presión sanguínea se mantiene constante, la tensión en la pared del vaso es directamente proporcional al radio del mismo (Fig. 8.6).

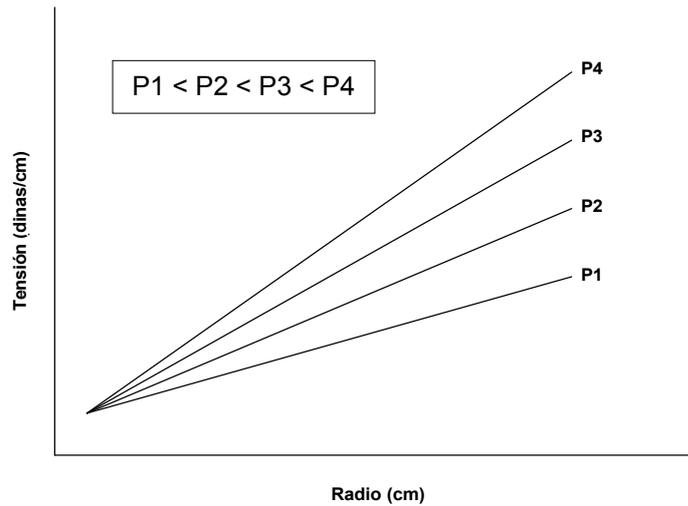


Fig. 8.6: Relación entre la tensión en la pared de un vaso sanguíneo y su radio, cuando la presión permanece constante.

## Referencias

- Cingolani H. (2000). Capítulo 20. Organización general del aparato circulatorio y leyes que rigen el desplazamiento de los líquidos. En H. Cingolani y A. Houssay. *Fisiología Humana de Houssay (7ma edición)*, (pp. 241-243). Argentina: Editorial El Ateneo.
- Cisale H. (2011). Biorreología. En H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria (1era edición)*, (pp. 193-203). Argentina: Editorial Eudeba.
- Fruento A.S (1995). Elementos de hidrodinámica. En A. S. Fruento. *Biofísica (3ra edición)*, (pp. 165-178). Madrid, España: Mosby-Doyma Libros.
- Fruento A.S (1995). Mecánica Circulatoria. En A. S. Fruento. *Biofísica (3ra edición)*, (pp. 179-183). Madrid, España: Mosby-Doyma Libros.
- Parisi M (2001). *Biofísica cardíaca y respiratoria, de la atmósfera y del mar*. En M. Parisi. *Temas de biofísica* (pp. 178-186). Santiago, Chile: McGraw-Hill Interamericana de Chile LTDA.