

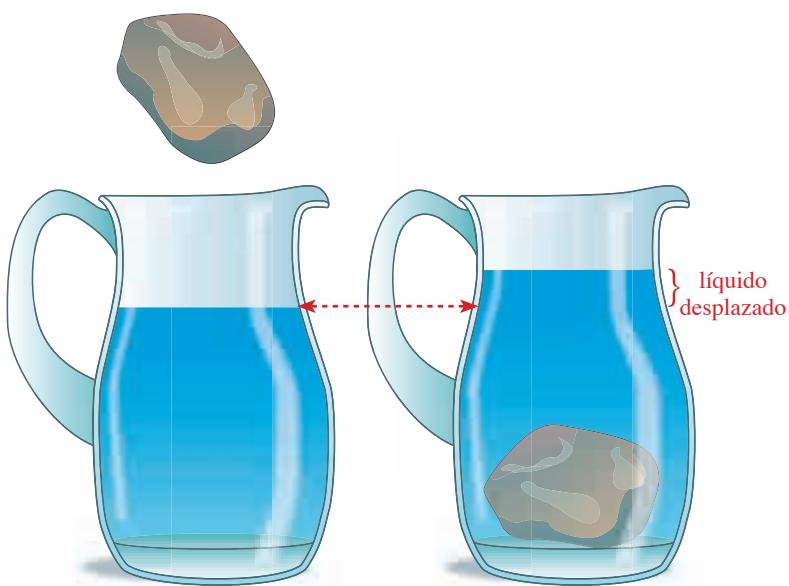
sección  
6**El principio de Arquímedes**

Arquímedes de Siracusa vivió entre los años 287 y 212 A.C. Entre sus descubrimientos más notables está el principio de flotabilidad de los cuerpos, conocido hoy como *principio de Arquímedes*.

Arquímedes descubrió que un cuerpo, al ser sumergido parcial o totalmente en el interior de un fluido, experimenta una fuerza hacia arriba, llamada *fuerza de empuje* o, simplemente, *empuje*, cuyo módulo es igual al peso del fluido que desplaza.



**Figura 6.2.** El peso de un objeto flotante es igual al peso del agua que desplaza su parte sumergida. Este es el principio de Arquímedes.



**Figura 6.1.** El aumento del nivel de agua en el jarro es el mismo que se tendría si, en vez de poner la piedra en el jarro, se vertiera en él un volumen de agua igual al volumen de la piedra.

En términos de módulos, el empuje se define, entonces, del siguiente modo:

$$E = P_{fd} \quad (6.1)$$

Donde  $E$  es la fuerza de empuje y  $P_{fd}$  corresponde al peso del fluido desplazado.

Es importante no confundir el peso del fluido desplazado con el peso del objeto sumergido. El primero depende de la masa del fluido desplazado ( $m_{fd}$ ):

$$P_{fd} = m_{fd} \cdot g \quad (6.2)$$

Como sabemos, el peso del objeto, en cambio, es:

$$P = m \cdot g \quad (6.3)$$

**Ya que el fluido desplazado es el líquido que sube en el contenedor cuando se introduce parcial o totalmente un objeto, ¿cómo podrías determinar el peso del fluido desplazado?**

### Ejemplo 5

Una bolita de acero se introduce en un vaso de precipitado que contiene agua pura. Una vez que la bolita está dentro del líquido se saca con una pipeta exactamente la cantidad de agua desplazada por el objeto, es decir, el recipiente vuelve a tener el nivel de líquido inicial. Al medir la masa del agua extraída, se obtienen 10 g.

- a) ¿Cuál es el peso del agua desplazada?
- b) ¿Cuál es el módulo del empuje que experimenta la bolita de acero?
- a: Para encontrar el peso del agua desplazada solo necesitamos conocer su masa. De acuerdo a la ecuación (6.2), tenemos:

$$P_{fd} = m_{fd} \cdot g$$

$$P_{fd} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_{fd} = 0,1 \text{ N}$$

- b: De acuerdo al principio de Arquímedes, expresado en la ecuación (6.1), obtenemos:

$$E = P_{fd}$$

$$E = 0,1 \text{ N}$$

En ocasiones, se conocen las densidades del fluido y del objeto, así como el volumen de este cuerpo. Por eso, el principio de Arquímedes también se puede aplicar considerando el concepto de densidad.

En general, la densidad del fluido ( $\rho$ ) es diferente de la densidad del objeto ( $\rho_0$ ). Veremos a continuación que la relación entre estas cantidades determina la flotación del cuerpo.



**Figura 6.3.** El principio de Arquímedes se aplica al comportamiento de los fluidos en general. Así, un globo aerostático asciende cuando su peso es menor que el peso del aire atmosférico que desplaza.



**Figura 6.5.** En muchos peces, la vejiga natatoria permite controlar la flotabilidad mediante un complejo sistema de intercambio gaseoso con la sangre. El mecanismo permite al pez ascender o descender en el agua, cambiando la densidad relativa del pez sin necesidad de utilizar la musculatura.

## ¿Por qué un objeto se hunde o flota?

La flotación de un objeto depende de la relación entre su densidad y la densidad del fluido en el que se encuentra. Analizaremos los tres casos posibles.

### El objeto es más denso que el fluido

En este caso, el objeto se va hacia el fondo del líquido en el que es sumergido, debido a que el peso del objeto es mayor que el peso del fluido desplazado y, por lo tanto, mayor que el empuje:

$$P > E \quad (6.4)$$

La piedra sumergida completamente en la Figura 6.1 es un buen ejemplo de esta situación.

### El objeto tiene la misma densidad que el fluido

En este caso, no podemos decir que el objeto se hunda o flote, aunque se trata de un caso particular en el que el peso del objeto es igual al peso del fluido desplazado y, por lo tanto, igual al empuje. Sin embargo, el objeto podría encontrarse igualmente en el límite de la superficie del fluido o en el fondo.

$$P = E \quad (6.5)$$

Un ejemplo de esta condición sería la situación de un globo lleno de agua en el interior de otro recipiente con agua.



**Figura 6.4.** Un globo lleno de agua sumergido en una piscina se encuentra en una situación en la que su peso está completamente equilibrado por el empuje, y por esta razón no flota, pero tampoco se hunde hasta el fondo.

### El objeto tiene menor densidad que el fluido

En este caso el objeto permanece parcialmente sumergido, es decir, flota. Esto se debe a que si el cuerpo se sumerge completamente, su peso es menor que el peso del fluido que desplaza, de manera que asciende hasta la superficie.

En estas condiciones, el objeto flotante desplaza un volumen de agua que es una fracción del volumen total del objeto, lo que permite equilibrar su peso y el empuje.

Por supuesto, los ejemplos de esta situación son numerosos. Tal vez, el más espectacular sea el de un iceberg en el mar, cuya versión doméstica podemos observar con cubos de hielo en un vaso de agua.



**Figura 6.6.** Un objeto cuya densidad neta es menor que la del agua desplaza un volumen de agua que es una fracción del volumen total del objeto.

**¿Qué le ocurre a un fluido como el aceite si se introduce en agua? ¿Sube a la superficie del agua o baja a lo más profundo? ¿Por qué?**

En suma, el principio de Arquímedes se puede expresar en función de la densidad del fluido del siguiente modo:

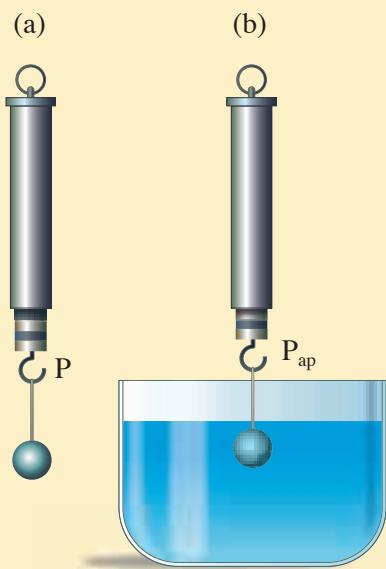
$$\begin{aligned} E &= P_{fd} \\ E &= m_{fd} \cdot g \\ E &= \rho \cdot V_{fd} \cdot g \end{aligned} \quad (6.6)$$



**Figura 6.7.** El hielo flota porque su densidad es menor que la densidad del agua líquida.



**Figura 6.8.** Un submarino utiliza el principio de Arquímedes para navegar bajo el agua o en la superficie. Para controlar su peso, los submarinos están equipados con tanques de lastre. Para sumergirse oemerger, usan los tanques de proa y popa, llamados tanques principales, que se abren y se llenan completamente de agua para sumergirse o se llenan de aire a presión paraemerger.



**Figura 6.9.** En (a), el dinamómetro mide el peso del objeto. En (b), cuando se sumerge el objeto en un fluido, el dinamómetro mide un peso menor, que se conoce como peso aparente. En este caso, el dinamómetro marca menos debido a que al peso del objeto se le resta la fuerza de empuje ejercida por el agua. Este es un método directo para medir el empuje.

Así, para un objeto flotante, la condición de equilibrio en función de su densidad ( $\rho_0$ ) y la densidad de fluido ( $\rho$ ) es:

$$\begin{aligned} P &= E \\ m \cdot g &= \rho \cdot V_{fd} \cdot g \\ \rho_0 \cdot V &= \rho \cdot V_{fd} \end{aligned} \quad (6.7)$$

### Ejemplo 6

Un iceberg, como el de la Figura 6.6, tiene una densidad de  $920 \text{ kg/m}^3$  y flota en la superficie del agua de mar, cuya densidad es de  $1\,030 \text{ kg/m}^3$ .

- a) ¿Qué fracción del iceberg se encuentra sobre la superficie del mar?
- a: Un objeto flotante experimenta un empuje igual a su peso, ya que está en equilibrio en la superficie; por lo tanto, de acuerdo al desarrollo de las ecuaciones (6.7), tenemos:

$$\begin{aligned} P &= E \\ m \cdot g &= \rho \cdot V_{fd} \cdot g \\ \rho_0 \cdot V &= \rho \cdot V_{fd} \\ \frac{\rho_0}{\rho} \cdot V &= V_{fd} \\ \frac{920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot V &= V_{fd} \\ 0,89 \cdot V &= V_{fd} \end{aligned}$$

El equilibrio de fuerzas consiste en que el peso del iceberg es igual al peso del agua desplazada, lo que se logra cuando una gran parte del iceberg está sumergida. Esta porción tiene un volumen igual al volumen del agua desplazada.

Por lo tanto, solo el 11% del volumen del iceberg es visible sobre la superficie.

**¿Qué fuerzas actúan sobre un objeto sumergido, cuya densidad es mayor que la del fluido en el que se encuentra? Realiza un diagrama de cuerpo libre para ilustrarlas.**

## Tensión superficial y capilaridad

**¿Qué tienen en común las burbujas de jabón con las gotas de rocío en una tela de araña?**



**Figura 6.10.** Burbujas de jabón y gotas de rocío en una tela de araña, ¿qué tienen en común?

Las gotas de rocío y las burbujas de jabón son líquidos que adoptan una forma particular. ¿Por qué en ambos casos el líquido adopta una forma esférica? ¿En qué otros casos observamos estas características?

A continuación, estudiaremos la propiedad que explica estos fenómenos y qué hace que la superficie de un líquido tienda a comportarse como si fuera una delgada película elástica. Se trata de la **tensión superficial**. Gracias a ella, algunos insectos pueden desplazarse por la superficie del agua sin hundirse.

En combinación con las fuerzas que se dan entre los líquidos y las superficies sólidas, la tensión superficial produce otro fenómeno muy importante: la **capilaridad**, que, entre otras cosas, es esencial para el crecimiento de las plantas.

### TENSIÓN SUPERFICIAL

La tensión superficial es la propiedad que hace que la superficie de los líquidos tienda a contraerse, comportándose como si fuera una membrana elástica.

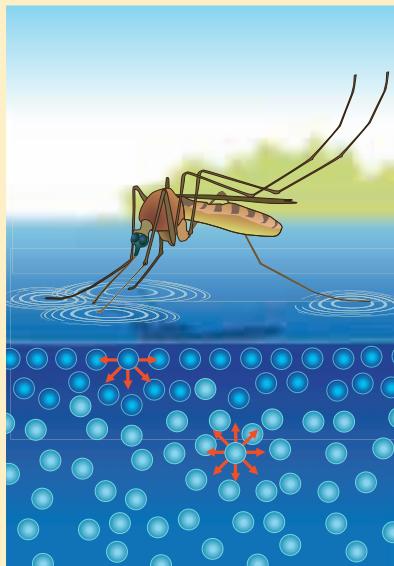
De esta manera se explica la forma esférica de las gotas de los líquidos.



**Figura 6.11.** Este insecto es un “zapatero de agua” o *Gerris lacustris*. ¿Cómo logra mantenerse sobre la superficie del agua sin hundirse?



**Figura 6.12.** ¿Cómo se puede formar esta superficie elástica y tan delgada a partir de una solución jabonosa?



**Figura 6.13.** Una molécula bajo la superficie es atraída por igual en todas direcciones por las otras moléculas que la rodean. En cambio, una molécula en la superficie solo es atraída hacia los lados y hacia abajo. Esto proporciona la tensión superficial suficiente para soportar el peso del mosquito.



**Figura 6.14.** ¿Qué forma adopta el agua en los contornos del objeto? ¿El agua moja o no moja al clip? ¿Cómo se relaciona este ejemplo con el uso de detergentes para el lavado de ropa?

Las gotas de agua o de aceite son esféricas porque sus superficies tienden a contraerse y a hacer que cada gota adopte una forma de superficie mínima. Esa forma es la esfera, que es el cuerpo geométrico que ocupa la menor superficie para un determinado volumen.

Técnicamente, la tensión superficial es una **fuerza por unidad de longitud** o, equivalentemente, el **trabajo por unidad de área** necesario para aumentar la superficie del líquido. En otras palabras, la forma esférica de las gotas de los líquidos es la forma que minimiza su energía.

Esta fuerza tiene una explicación a nivel microscópico molecular. Como se muestra en la Figura 6.13, las moléculas en el interior de un líquido experimentan la fuerza de atracción de las otras moléculas. Esta fuerza es de origen electromagnético y se conoce como **fuerza de cohesión**.

Para cada molécula bajo la superficie del líquido, las fuerzas de atracción actúan en todas direcciones y, como resultado, no hay una fuerza neta sobre cada molécula, es decir, las fuerzas se encuentran equilibradas entre sí.

En cambio, sobre las moléculas en la superficie del líquido, las fuerzas laterales están equilibradas, pero las fuerzas verticales están desequilibradas, ya que no hay otras moléculas de líquido por encima de ellas.

Es la acción de este desequilibrio de fuerzas sobre las moléculas superficiales la que provoca la tensión superficial de un líquido. En conjunto, las moléculas superficiales se comportan como una pequeña película o pantalla de protección del líquido, impidiendo que, dentro de ciertos límites, este se rompa por tirones externos o compresiones.

Consideremos la situación que se muestra en la Figura 6.14. Si sobre la superficie del agua se deposita una aguja o un clip de acero, secos, quedan suspendidos en la superficie del líquido. ¿Cómo es posible si la densidad del acero es casi ocho veces la densidad del agua?

Son las fuerzas moleculares a nivel microscópico las que equilibran el pequeño peso de la aguja acostada en el agua o del clip, actuando desde un punto de vista macroscópico como una superficie elástica.

**¿Se puede cambiar la tensión superficial de un líquido?**

Para medir la tensión superficial, podemos usar un procedimiento sencillo, conocido como método de *Du Noüy*, por el bioquímico y matemático francés que lo inventó. Consiste en aplicar una fuerza hacia arriba sobre una argolla de alambre amarrado con un hilo, el cual se levanta suavemente desde la superficie del líquido. En estas condiciones, la tensión superficial impide que el anillo se levante inmediatamente.

Como la tensión superficial ( $\gamma$ ) se define como la fuerza por unidad de longitud, podemos obtenerla midiendo la longitud del anillo de alambre ( $L$ ) y la fuerza ( $F$ ) aplicada para separarlo del agua, lo cual requiere un instrumento de precisión. De este modo:

$$\gamma = \frac{F}{2L} \quad (6.8)$$

Según esto, en el S.I. la tensión superficial se expresa en  $\frac{N}{m}$ .



**Figura 6.15.** Tensiómetro de Du Noüy. Una argolla de alambre se levanta en una solución para medir su tensión superficial.

**¿Por qué se require un instrumento de precisión para medir la fuerza aplicada por el anillo de Du Noüy?**

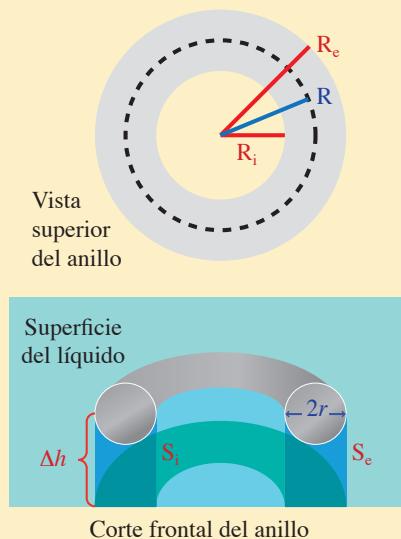
### Ejemplo 7

Un anillo de 10 cm de diámetro ejerce una fuerza de 0,045 N hacia arriba sobre la superficie del agua en un recipiente.

- a) ¿Cuál es la tensión superficial del fluido?

Líquido	Temp. (°C)	$\gamma$ $\left[ \frac{N}{m} \right]$
Acetona	20	$23,7 \cdot 10^{-3}$
Eter etílico	20	$17 \cdot 10^{-3}$
Etanol	20	$22,27 \cdot 10^{-3}$
Glicerol	20	$63 \cdot 10^{-3}$
Mercurio	15	$487 \cdot 10^{-3}$
Agua	0	$75,64 \cdot 10^{-3}$
Aqua	25	$71,97 \cdot 10^{-3}$
Aqua	50	$67,91 \cdot 10^{-3}$
Aqua	100	$58,85 \cdot 10^{-3}$

**Tabla 6.1.** Tensión superficial de algunos líquidos. En general, la tensión superficial depende de la temperatura del líquido. Todos los valores están medidas en relación a la superficie entre el líquido y el aire.



**Figura 6.16.** Anillo de Du Noüy. Se puede observar que hay dos superficies del líquido adheridas al alambre, una superficie cilíndrica interna ( $S_i$ ) y una superficie cilíndrica externa ( $S_e$ ).  $R_i$  y  $R_e$  son los radios interno y externo del anillo, respectivamente.  $r$  es el radio del alambre.

La Figura 6.16 explica por qué en la ecuación (6.8) usamos el denominador  $2L$ . La razón es que el líquido se adhiere al alambre por su cara interna y por su cara externa, de modo que la longitud en contacto con la superficie es aproximadamente el doble del perímetro del anillo.

Un análisis más riguroso de la Figura 6.16, en términos del trabajo por unidad de área realizado al elevar el anillo una distancia  $\Delta h$ , conduce al mismo resultado:

$$\gamma = \frac{F}{4 \cdot \pi \cdot R} \quad (6.9)$$

Donde  $R$  es el radio medio del anillo.

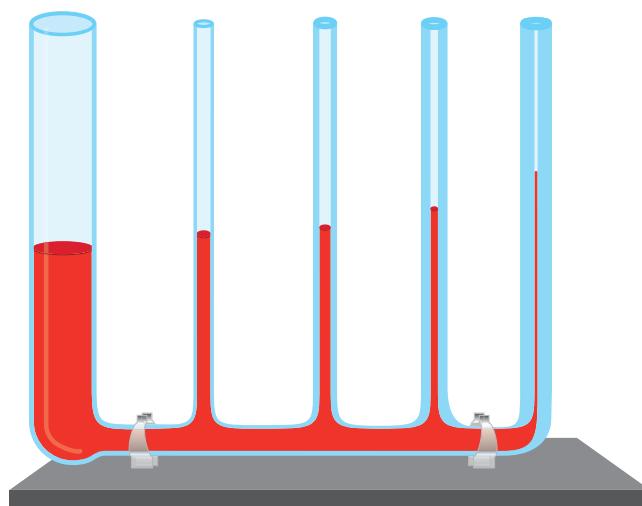
- **a:** Como la superficie ejerce una tensión sobre el radio interno y el radio externo del anillo, la fuerza por unidad de longitud se expresa, de acuerdo a la ecuación (6.8), del siguiente modo:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{F}{2L} \\ \gamma &= \frac{F}{2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot R)} \\ \gamma &= \frac{0,045N}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,05m} \\ \gamma &= 0,071 \frac{N}{m}\end{aligned}$$

Es decir, la superficie ejerce una tensión de 0,071 N por cada metro de longitud.

## CAPILARIDAD

Cuando se sumerge en agua el extremo de un tubo de vidrio, cuyo diámetro interno es pequeño, el agua es capaz de ascender por él espontáneamente. En un tubo de 0,5 mm de diámetro, por ejemplo, el agua asciende alrededor de 5 cm por el interior del tubo. Este ascenso del agua por un tubo fino y hueco se conoce como **capilaridad**, ya que a ese tipo de elemento se le llama capilar (palabra que deriva del latín y significa **cabello**).

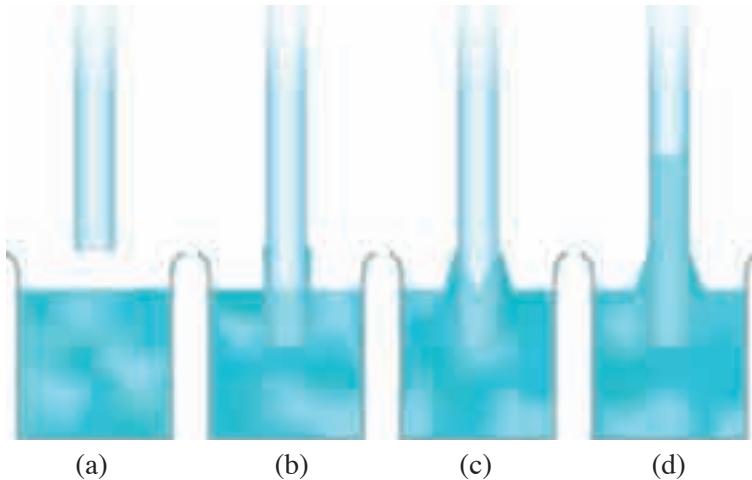


**Figura 6.17.** Como todos los tubos están abiertos en el extremo superior, por el principio de Pascal el nivel del líquido en todos ellos debería ser el mismo. Sin embargo, se observa el efecto de la capilaridad, el cual es mayor cuando el diámetro del tubo es menor.

La capilaridad ocurre porque, como vimos en el apartado anterior, en cierto modo las moléculas del líquido son “pegajosas”.

La atracción entre moléculas de la misma sustancia es llamada **cohesión**. La atracción entre moléculas de sustancias diferentes se conoce como **adhesión**.

Observemos la secuencia de la Figura 6.18:



**Figura 6.18.** Un tubo capilar de vidrio se introduce en un líquido. En la secuencia, (b) se observa como el líquido inicialmente se adhiere al vidrio por la superficie interna y externa del capilar, (c) luego, la tensión superficial hace que la película adherida se contraiga, redondeando sus contornos y (d) la película de la superficie interior se contrae más, elevando el líquido hasta que su peso queda equilibrado con la fuerza de adhesión.

Al introducir el capilar de vidrio en el líquido, la fuerza de adhesión hace que el fluido suba por las paredes del tubo, mientras la tensión superficial tiende a contraer la película de líquido, redondeando los contornos dentro y fuera del capilar. La superficie del líquido en el interior se contrae más y esto eleva al líquido por el tubo, hasta que su peso es equilibrado por la fuerza de adhesión. Así, el agua que asciende por un tubo más delgado tiene un peso menor, por lo que alcanza más altura.

La relación entre la fuerza de cohesión de un líquido y la fuerza de adhesión que presenta ante un sólido, determina si el líquido se esparce o no por la superficie del sólido; es decir, si lo moja o no.

Si la fuerza de cohesión de una gota de líquido es menor que la fuerza de adhesión entre sus moléculas y las de la superficie del sólido, entonces la gota se esparce por el sólido, mojándolo.



**Figura 6.19.** Es algo sabido que las plantas consiguen el agua y los nutrientes del suelo por medio de las raíces, luego transportan este material (savia bruta) a través del tallo hasta las hojas, donde realizan la fotosíntesis gracias a la clorofila y la luz solar, y que por último distribuyen la glucosa, azúcares y aminoácidos obtenidos (savia elaborada) por toda su estructura. Pero, ¿cómo hacen para transportar el agua con las sustancias disueltas? ¿Se contraen? ¿Hay alguna especie de mecanismo de bombeo?

La ley de Jurin define la altura máxima que alcanza una columna de fluido que asciende por capilaridad. La altura  $h$  de la columna, en metros, está dada por la ecuación:

$$h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (6.10)$$

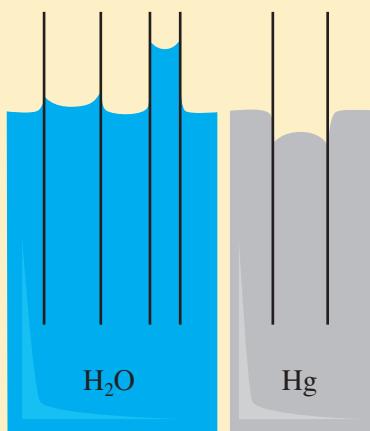
Donde  $\gamma$  es la tensión superficial,  $\theta$  es el ángulo de contacto,  $\rho$  es la densidad del líquido,  $g$  es la aceleración de gravedad y  $r$  es el radio del tubo capilar.



**Figura 6.21.** El mercurio líquido no moja la superficie de contacto porque la fuerza de cohesión entre sus moléculas es mayor que la fuerza de adhesión con la madera.

Es importante señalar que el mercurio que encontramos en termómetros, ampolletas de bajo consumo y otros, es altamente tóxico por contacto, inhalación o ingestión. Cuando se rompe alguno ellos, es indispensable tomar precauciones:

Ventilar la zona al menos por 15 minutos. Utilizar guantes desechables y poner los trozos grandes en bolsas plásticas. Con toallas de papel húmedas recoger los residuos más pequeños. No utilizar aspiradora ni escoba, ya que esparrirá material peligroso en el aire. No eliminar por el desagüe. Poner los elementos utilizados en una segunda bolsa gruesa, sellarla y rotularla como "Sustancia peligrosa: contiene mercurio y vidrio". Idealmente llevarlo a un depósito de sustancias peligrosas o eliminarlo en un basurero de forma segura. Lavar cuidadosamente las manos.

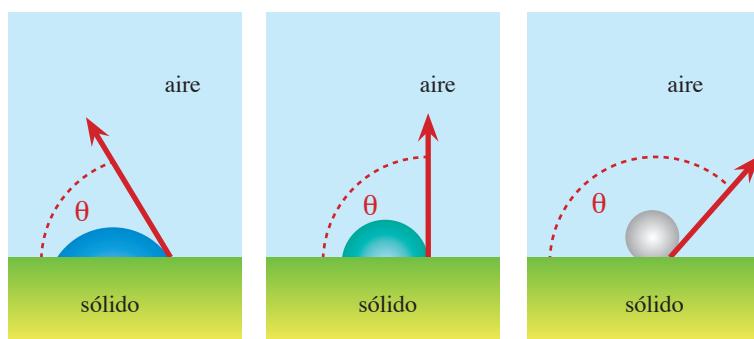


**Figura 6.22.** ¿Cómo se puede explicar la diferencia de curvatura entre el agua y el mercurio al interior de un capilar?

Por el contrario, si la fuerza de cohesión es mayor, el sólido no se moja.

Una gota de mercurio líquido, por ejemplo, no se esparce en la superficie limpia de un vidrio. Lo mismo ocurre con una gota de lluvia que cae sobre un automóvil recién encerado: la gota no moja al auto, más bien resbala debido a la nula **adherencia**.

La capacidad de adhesión de una gota con una superficie sólida versus la capacidad de cohesión de las moléculas del líquido se puede cuantificar a través de un ángulo fácilmente medible denominado **ángulo de contacto**. En la Figura 6.20, se muestran las diferentes formas de contacto de una gota de líquido con un sólido.



**Figura 6.20.** Ángulo de contacto de tres líquidos diferentes sobre la superficie de un sólido.

En la Figura 6.20, se puede observar que si el ángulo de contacto es  $\theta < 90^\circ$ , entonces la gota se esparce y moja al sólido. Si el ángulo de contacto es  $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ , el líquido no se esparce y, por lo tanto, no moja al sólido. Cuando la gota de agua moja la superficie sólida, se debe a que la fuerza de adhesión es más grande que la fuerza de cohesión, y viceversa.

De acuerdo a lo anterior, un líquido podría no mojar el interior de un capilar. En el caso en que el líquido logra mojar las paredes del tubo, porque la fuerza de adhesión es mayor que la de cohesión, se produce una concavidad hacia arriba en el fluido o **menisco cóncavo**. Como se muestra en la Figura 6.22 para el caso del agua, el líquido asciende por el tubo, en el efecto que llamamos capilaridad.

Si el líquido no moja a las paredes del tubo, se produce una concavidad hacia abajo o **menisco convexo**. En este caso, no hay capilaridad, sino, al contrario, el líquido descende por el tubo, como se muestra en la Figura 6.22, para el caso del mercurio.

## LA CAPILARIDAD OCURRE EN TODAS PARTES

La capilaridad es un fenómeno fundamental en muchas situaciones naturales y artificiales.

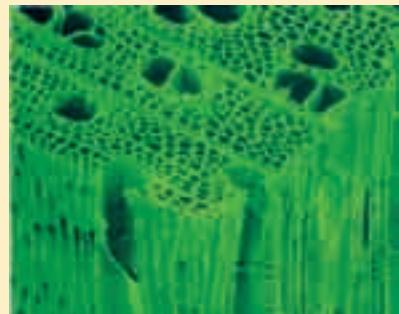
Antes de alcanzar las raíces de las plantas, gracias a la capilaridad el agua que cae sobre la tierra se distribuye por los microespacios de aire que quedan entre las partículas del suelo. Después, el transporte de agua y otras sustancias desde las raíces hasta las hojas en las plantas es un problema de la fisiología vegetal en el cual la capilaridad juega un rol crucial.

El agua que se introduce por las raíces, a través de los pelos radiculares, penetra en un sistema de células interconectadas que forman el tejido de la planta y que se extienden desde las mismas raíces hasta las hojas, a través del tronco o tallo. Este tejido leñoso, llamado xilema, está formado por varios tipos de células. El ascenso de savia bruta se ve favorecido por el reducido tamaño de los vasos leñosos a los que se adhieren las moléculas de agua, pues el ascenso es más eficaz cuanto menor es el diámetro del vaso, es decir, por capilaridad.

Sin embargo, la capilaridad no es suficiente para elevar el agua hasta todos los lugares de la planta. Varios procesos adicionales se requieren para que esto suceda, entre los cuales el más importante es la evaporación de las moléculas del agua a través de las hojas. Como las moléculas de agua tienden a unirse unas con otras gracias a su fuerza de cohesión, cuando una molécula se evapora a través del poro de una hoja, se ejerce un pequeño empuje a las moléculas adyacentes, lo que reduce la presión en las células leñosas y atrae agua de las células contiguas. Este efecto de llamada se extiende por todo el trayecto hasta las raíces y se suma al efecto de la capilaridad.

En el sistema circulatorio de nuestros cuerpos también ocurre el fenómeno capilar. Unos diez mil millones de capilares se entrelazan por todos los tejidos del cuerpo, suministrando sangre a todas las células. Son los vasos sanguíneos más pequeños, de tamaño microscópico, y contienen menos del cinco por ciento del volumen total de la sangre que circula.

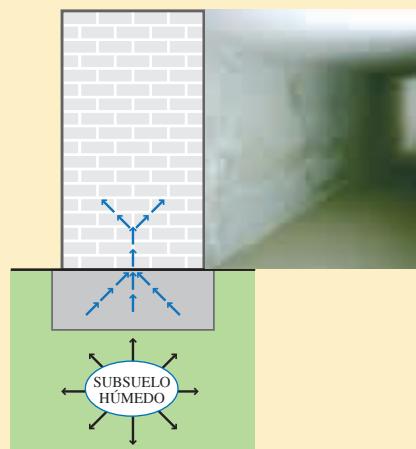
En objetos tecnológicos encontramos capilaridad en muchos casos: esponjas, toallas de papel, telas, mecheros de alcohol, plumones de tinta, bolígrafos, etc. Incluso los muros de una construcción se humedecen y deterioran porque el agua asciende por su interior debido al mismo fenómeno.



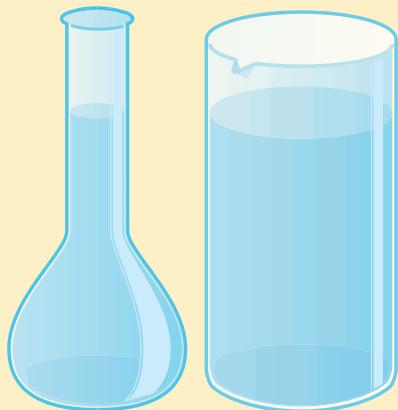
**Figura 6.23.** Tejido xilemático. Estos orificios poseen en su interior una membrana conformada por una red de micro fibras elásticas que actúan como una válvula capilar.



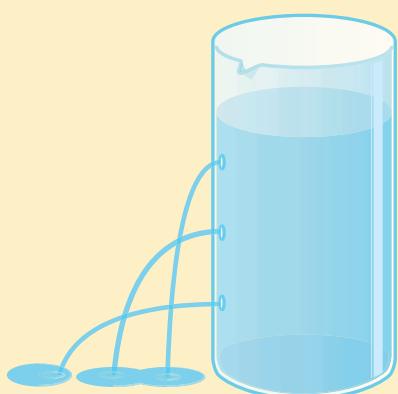
**Figura 6.24.** La mecha funciona como un elemento absorbente del alcohol, debido al efecto de capilaridad.



**Figura 6.25.** En un muro, la capilaridad provoca que el agua ascienda internamente.



**Figura 5.17.** ¿En cuál de los recipientes la presión del líquido en el fondo es mayor?



**Figura 5.18.** Debido a que la presión es perpendicular a las paredes del recipiente, los chorros de agua salen inicialmente en esa dirección y luego se curvan por efecto de la fuerza de gravedad. Los tres orificios tienen el mismo diámetro.

► Antes de reemplazar los datos del enunciado, tenemos que considerar las unidades apropiadas. En particular, para el área de cada tímpano, tenemos:

$$1\text{ cm}^2 = 1(10^{-2}\text{ m})^2$$

$$1\text{ cm}^2 = 10^{-4}\text{ m}^2$$

Entonces,

$$F = P \cdot A$$

$$F = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = 13\text{ N}$$

Este resultado muestra que, a 3 m de profundidad, el tímpano resiste una fuerza relativamente grande.

**En la Figura 5.18, todos los agujeros laterales del recipiente tienen el mismo diámetro. ¿A qué se debe que el chorro de agua tenga mayor o menor alcance horizontal al salir del recipiente?**

## Principio de Pascal

En 1648, Blaise Pascal descubrió, realizando experimentos con fluidos, lo siguiente:

**«El incremento de presión aplicado a la superficie de un fluido incompresible, contenido en un recipiente indeformable, se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo»**

Este enunciado se conoce como **principio de Pascal**.

El montaje que se muestra en la Figura 5.13 también es una demostración del principio de Pascal, ya que la variación de presión ejercida por la jeringa se propaga de manera constante a cualquier lugar en el interior del líquido, lo que queda en evidencia porque se observa que el agua sale por todos los agujeros mostrando que el cambio de presión se transmite a todos ellos.

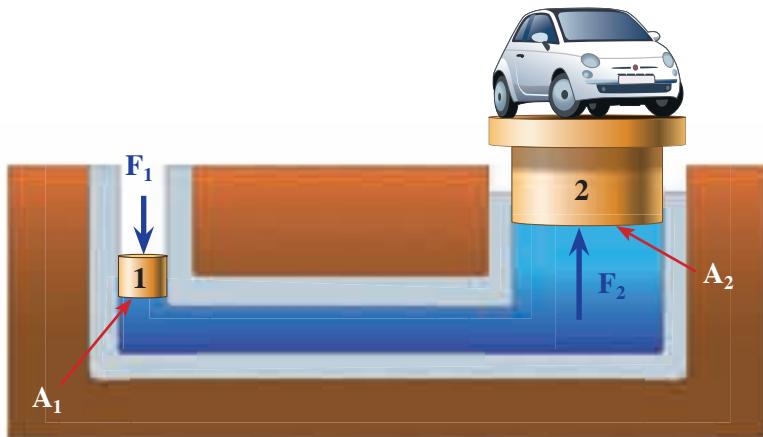
El principio de Pascal es utilizado en muchos objetos tecnológicos que trabajan con líquidos. Por esta razón, estas máquinas se llaman **hidráulicas**, ya que usan los fluidos para aplicar y aumentar las fuerzas.

**Piensa, por ejemplo, en los componentes de un vehículo: ¿qué características tienen en común la dirección hidráulica, los frenos hidráulicos y la gata hidráulica?**

A continuación, analizaremos el interesante caso de la **gata hidráulica**, que consiste en un dispositivo capaz de levantar un gran peso a partir de la aplicación de una fuerza relativamente pequeña.

Como se muestra en la Figura 5.19, el mecanismo de la gata hidráulica está compuesto por dos émbolos de distinto diámetro conectados por un fluido encerrado en una cavidad, cuyo diámetro varía de un émbolo al otro.

Al mecanismo se aplica fuerza de entrada ( $F_1$ ) sobre una pequeña superficie de área  $A_1$ . Esto genera una presión en el fluido que se transmite de manera constante en todo su interior y, en particular, hasta la superficie  $A_2$ , cuya área es mayor que  $A_1$ . Por lo tanto, sobre  $A_2$  el fluido aplica una fuerza de salida ( $F_2$ ) que es mayor que la fuerza de entrada.



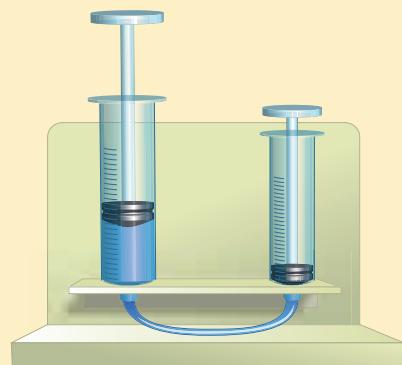
**Figura 5.19.** Por el principio de Pascal, la fuerza aplicada sobre el émbolo 1 es amplificada gracias a que la presión ejercida en el fluido es constante.

La fuerza aplicada sobre el émbolo 1 provoca una presión ( $P_1$ ) extra sobre el fluido, que se transmite en todo su interior; en particular, hasta el émbolo 2. Por lo tanto, por el principio de Pascal:

$$P_1 = P_2 \quad (5.10)$$

Donde  $P_2$  es la presión extra sobre el émbolo 2.

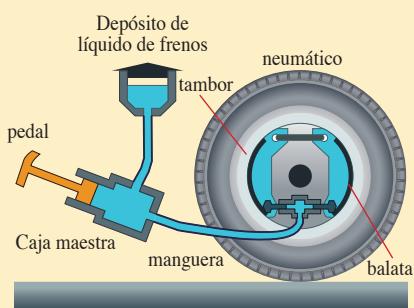
A continuación, haciendo uso de la ecuación (5.2), podemos escribir las presiones en términos de fuerza y área.



**Figura 5.20.** Con un par de jeringas de distintos diámetros, una pequeña manguera y un líquido, se puede demostrar fácilmente el principio de Pascal.



**Figura 5.21.** Típica gata hidráulica para levantar un automóvil mediano. ¿Dónde está el émbolo de entrada y el émbolo de salida?



**Figura 5.22.** El sistema de frenos de un vehículo también utiliza el principio de Pascal, ya que mediante un fluido se transmite la presión ejercida por la fuerza en el pedal hasta la balata, que con una fuerza mayor presiona el tambor del neumático para frenarlo.

Es decir:

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{A_1} &= \frac{F_2}{A_2} \\ \frac{F_1}{A_1} \cdot A_2 &= F_2 \quad (5.11) \\ F_1 \cdot \frac{A_2}{A_1} &= F_2 \end{aligned}$$

Este resultado muestra claramente que el factor de aumento del área en el émbolo 2 determina un aumento proporcional de la fuerza de salida. Es decir, cuando mayor es el área de salida, en comparación con el área de entrada, mayor es la fuerza útil o de carga de la máquina hidráulica.

#### Ejemplo 4

Consideremos el mecanismo de una gata hidráulica en la cual la fuerza de entrada es de 100 N y se aplica sobre un área de 100 cm<sup>2</sup>. El área de la superficie de salida es de 10 000 cm<sup>2</sup>.

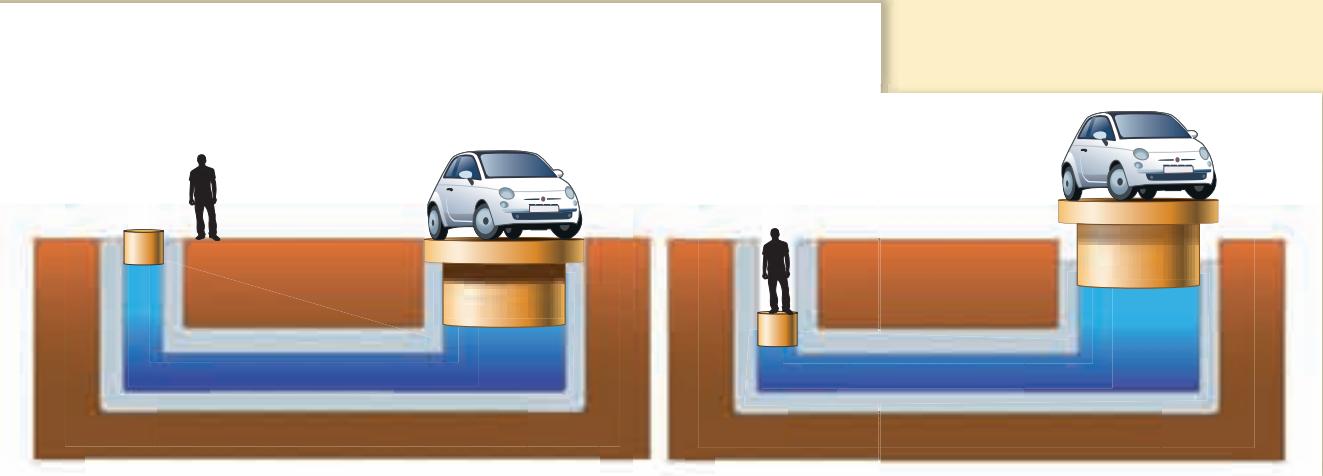
- a) ¿Cuál es la fuerza de salida en este caso?
- b) ¿Es suficiente la fuerza de salida para levantar un automóvil de 1 500 kg?
- a: Por el principio de Pascal, la presión ejercida por la fuerza de entrada es la misma que se ejerce sobre la superficie de salida. De acuerdo a la última de las ecuaciones (5.11), tenemos:

$$\begin{aligned} F_1 \cdot \frac{A_2}{A_1} &= F_2 \\ 100\text{ N} \cdot \frac{10\,000\text{ cm}^2}{100\text{ cm}^2} &= F_2 \\ 10\,000\text{ N} &= F_2 \end{aligned}$$

Es decir, la fuerza aumentó 100 veces en relación a la fuerza aplicada.

- b: Como el peso de un automóvil de 1 500 kg es aproximadamente 15 000 N, la fuerza de salida de la gata hidráulica del ejemplo no es suficiente para levantarla.

**Hay varias formas de modificar el funcionamiento de la gata para lograr que levante el vehículo, ¿cuáles son?**



**Figura 5.23.** En una gata hidráulica, aprovechando su peso, un hombre de 75 kg logra levantar un auto de 850 kg. Es interesante observar que lo que se desplaza el émbolo hacia abajo es considerablemente mayor que lo que se desplaza el automóvil hacia arriba.

**Analizando la situación representada en la Figura 5.23, ¿cómo se relaciona el principio de Pascal con el trabajo y la energía mecánica?**

## Presión atmosférica

Ya hemos mostrado que los gases, a diferencia de los líquidos, pueden ser comprimidos. Nuestra atmósfera es un fluido gaseoso en el que la densidad disminuye gradualmente con la altitud.

Entre las capas atmosféricas, la que se encuentra más próxima a la superficie del planeta es llamada **troposfera**, y tiene la mayor densidad, porque está más comprimida por el peso de las capas superiores.

De esta manera, en la medida que nos alejamos de la superficie de la Tierra la densidad disminuye.

De acuerdo a esto, la atmósfera puede ser modelada como un fluido estático formado por capas de distinta densidad. Si en este modelo se considera, además, que la temperatura y la intensidad del campo gravitatorio son constantes, entonces la densidad atmosférica es directamente proporcional a la presión.

Al formalizar matemáticamente estas condiciones, la presión atmosférica muestra una relación exponencial con la altitud. Es decir, la presión atmosférica disminuye rápidamente al alejarse de la superficie terrestre.

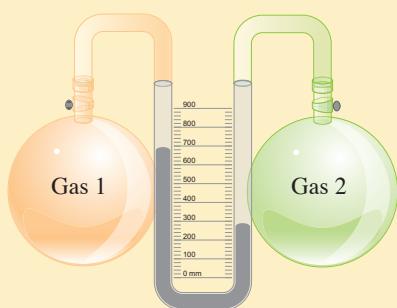


**Figura 5.24.** El 19 de septiembre de 1648, un año después de recibir una carta desde París de parte de Blaise Pascal, su cuñado, Florin Périer junto a un grupo de amigos, siguiendo las instrucciones indicadas en esa carta, realizaron el experimento de Torricelli en la cima del Puy de Dôme, en la región central de Francia. Tal como había comprendido Pascal que sucedería, la altura de la columna de mercurio en el barómetro fue 85 mm menor que en la base de la montaña, aproximadamente 1 000 m más abajo.

La función exponencial es una función matemática muy importante en innumerables procesos naturales y se puede escribir como:

$$f(x) = e^x \quad (5.13)$$

Donde el número  $e$  corresponde a un irracional, cuyas primeras cifras decimales son 2,7182818284. Algunos procesos gobernados por la función exponencial son: el número de células de un feto mientras se desarrolla en el útero materno, el número de bacterias que se reproducen por mitosis o el número de contagiados en una epidemia de gripe, entre otros.



**Figura 5.26.** Manómetro de tubo de vidrio, que indica la diferencia de presión entre dos fluidos gaseosos. Para medir la diferencia, basta determinar la diferencia de altura de la columna de mercurio entre los dos tubos paralelos. Si cada rama del manómetro se conecta a distintas fuentes de presión, el nivel del líquido aumenta en la rama a menor presión y disminuye en la otra.

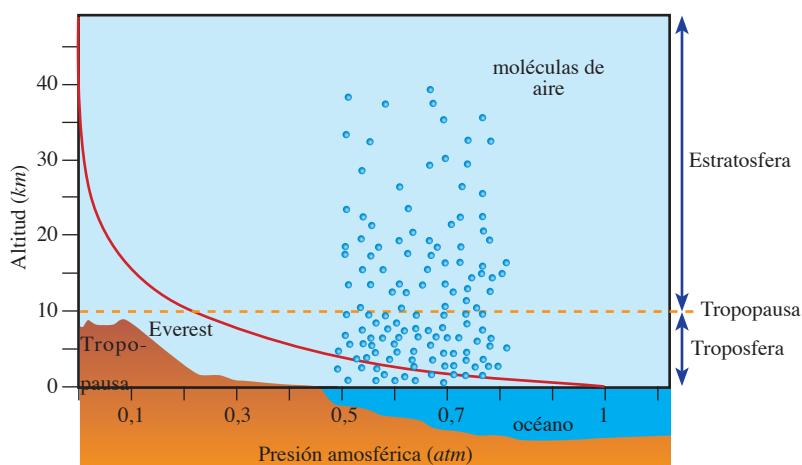
Para medir la presión absoluta ( $P_{abs}$ ) de un gas, a la presión manométrica ( $P_{man}$ ) se debe sumar la presión atmosférica ( $P_0$ ). La presión manométrica típica de un neumático de bicicleta, por ejemplo, es de 300 a 450 kPa:

$$P_{abs} = P_{man} + P_0 \quad (5.14)$$

Se puede demostrar, dadas las condiciones anteriores, que la presión atmosférica depende de la altura sobre el nivel del mar ( $h$ ) de la siguiente forma:

$$P = P_o \cdot e^{\frac{-h}{8,55\text{ km}}} \quad (5.12)$$

Donde  $P_o$  es la presión atmosférica a nivel del mar. Esta expresión es una buena aproximación para la presión atmosférica a alturas relativamente bajas.



**Figura 5.25.** Modelo para la variación de la presión atmosférica con la altitud sobre el nivel del mar. Se observa que la tropósfera tiene la mayor densidad, porque está más comprimida por el peso de las capas superiores de aire.

A pesar de lo anterior, es evidente que la atmósfera no puede ser considerada realmente como un fluido estático, ya que hay una serie de factores que hacen de ella un sistema dinámico. Por ejemplo:

- Las diferencias de temperatura entre masas de aire polar y masas de aire proveniente de los trópicos, cuya interacción produce los denominados **frentes meteorológicos**.
- La diferencia de temperatura entre el mar y las montañas, que generan **vientos locales**.
- La rotación del planeta, que produce el **efecto Coriolis** sobre las masas de aire que se desplazan siguiendo un meridiano.
- Las diferencias de temperatura entre masas de aire a diferentes altitudes, que producen zonas de ascenso y descenso de aire, los llamados **ciclones** y **anticiclones**.