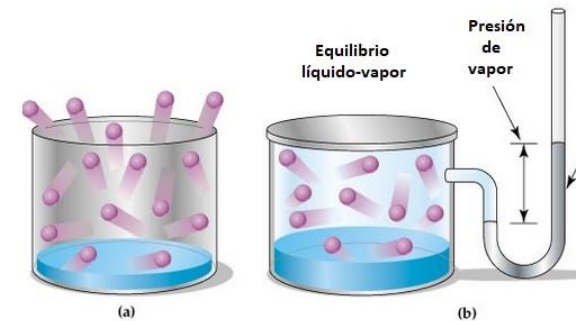


# Contenidos de la clase

## Unidad 2: Equilibrio de fases

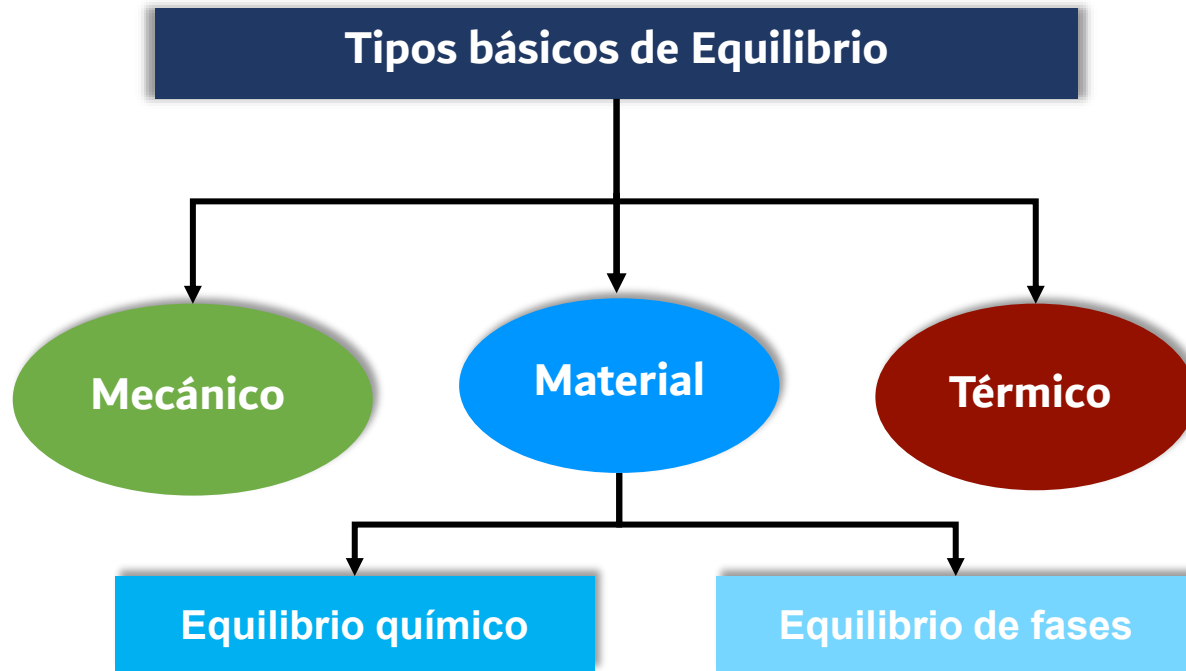
- Tipos de equilibrios.
- Equilibrio material
- Cambios de energía de acompañan a los cambios de fase
- Equilibrio líquido-vapor
- Ecuación de Clausius Clapeyron, punto de ebullición.



# Tipos de equilibrio



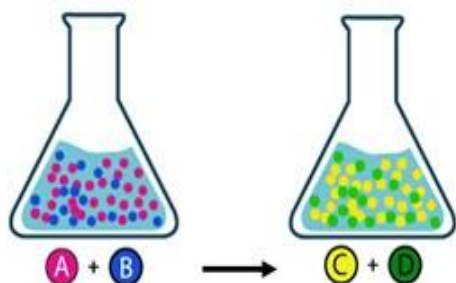
# Tipos de equilibrio



El *equilibrio material* se alcanza cuando un sistema se encuentra en equilibrio químico y en equilibrio de fases. No hay cambio global en la composición del sistema ni transferencia neta de materia.

# Equilibrio material

El *equilibrio material* se alcanza cuando en cada fase de un sistema cerrado, el número de moles de cada sustancia presente no varía a lo largo del tiempo.



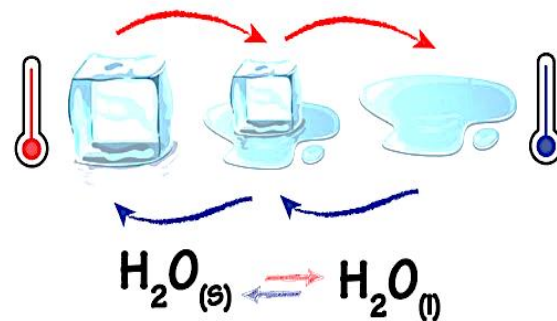
**Equilibrio material**

## Equilibrio de Fases

Es el equilibrio con respecto al transporte de materia entre las fases del sistema sin conversión de una especie en otra.

## Equilibrio Químico

Corresponde al equilibrio con respecto a la conversión de una o más de especies químicas en otras.



# Cambio de fases

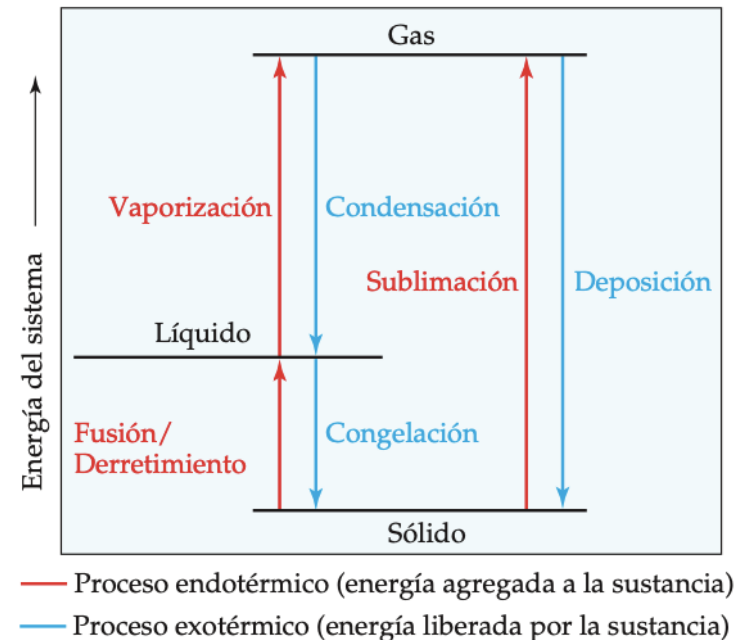
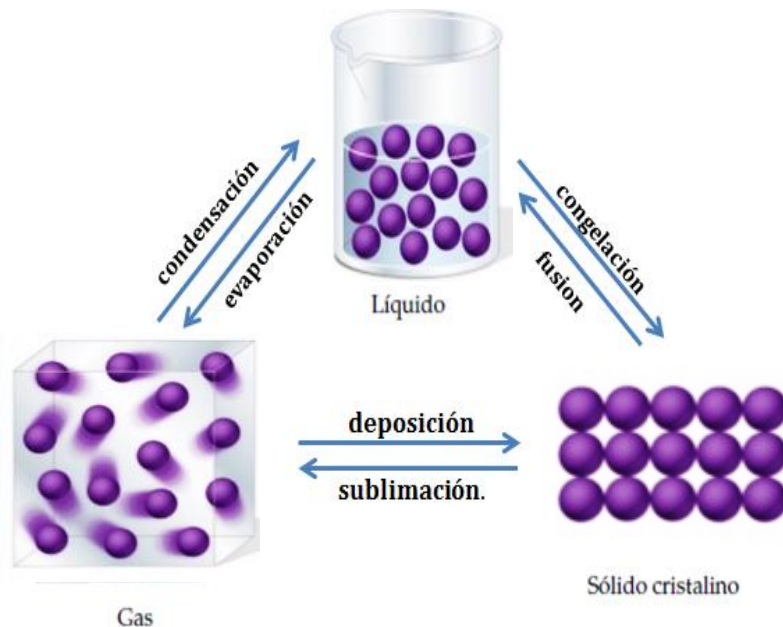
En muchas ocasiones, suelen coexistir más de un estado de agregación en equilibrio, separados por fases. *Una **fase** es una parte homogénea de un sistema, y aunque está en contacto con otras partes del mismo, está separada de esas partes por un límite bien definido.*



Cuando una fase se convierte en otra, ocurre un *cambio de fase...*

# Cambio de fases

Los *cambios de fase*, o las *transformaciones de una fase a otra*, se presentan cuando se agrega o se elimina energía (casi siempre en forma de calor).

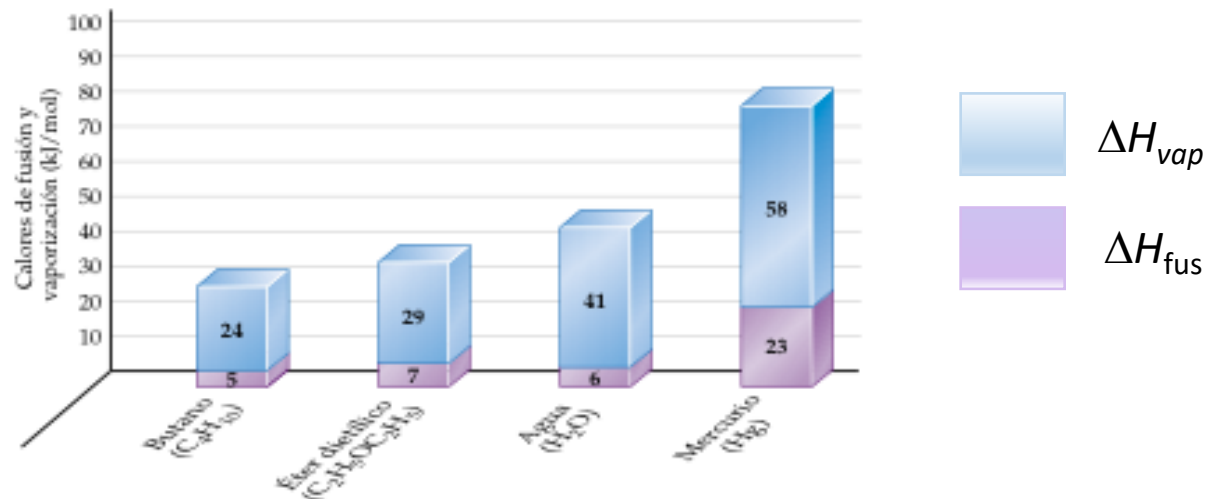


Los cambios de fase son cambios físicos que se distinguen porque cambia el orden molecular, en la **fase sólida** las moléculas alcanzan el máximo ordenamiento, y en la **fase gaseosa** tienen el mayor desorden.

# Cambios de energía que acompañan a los cambios de fase

*Todo cambio de fase va acompañado por un cambio en la energía del sistema.*

- **Fusión:** *estado sólido* → *estado líquido* ⇒ Calor de fusión ( $\Delta H_{\text{fus}}$ )
- **Congelación:** *estado líquido* → *estado sólido* ⇒ Calor de congelación ( $\Delta H_{\text{cong}}$ )
- **Vaporización:** *estado líquido* → *estado gaseoso* ⇒ Calor de vaporización ( $\Delta H_{\text{vap}}$ )
- **Condensación:** *estado gaseoso* → *estado líquido* ⇒ Calor de condensación ( $\Delta H_{\text{cond}}$ )
- **Sublimación:** *estado sólido* → *estado gaseoso* ⇒ Calor de sublimación ( $\Delta H_{\text{sub}}$ )
- **Deposición:** *estado gaseoso* → *estado sólido* ⇒ Calor de deposición ( $\Delta H_{\text{dep}}$ )



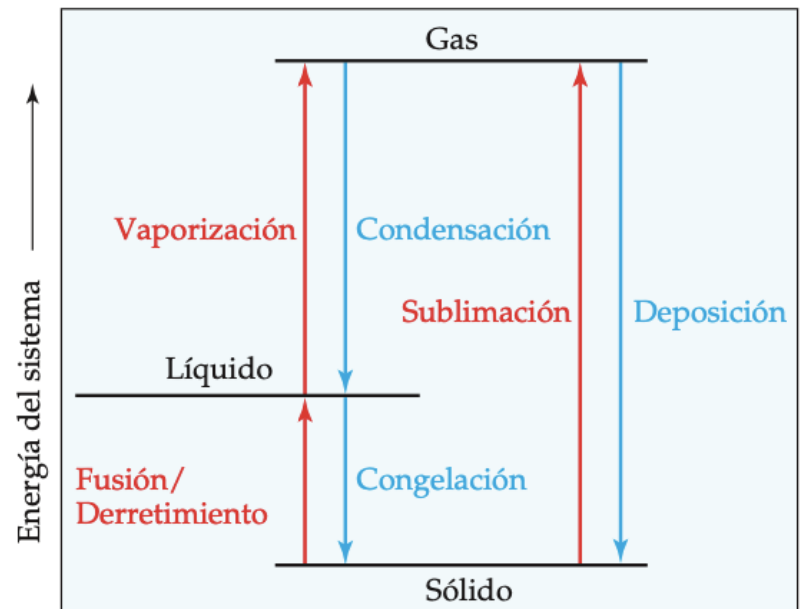
# Cambios de energía que acompañan a los cambios de fase

*Los cambios de energía asociados a un cambio de fase entre dos estados de la materia tienen la misma magnitud con signo opuesto.*

$$\Delta H_{fus} = -\Delta H_{cong}$$

$$\Delta H_{vap} = -\Delta H_{cond}$$

$$\Delta H_{sub} = -\Delta H_{dep}$$



- Proceso endotérmico (energía agregada a la sustancia)
- Proceso exotérmico (energía liberada por la sustancia)

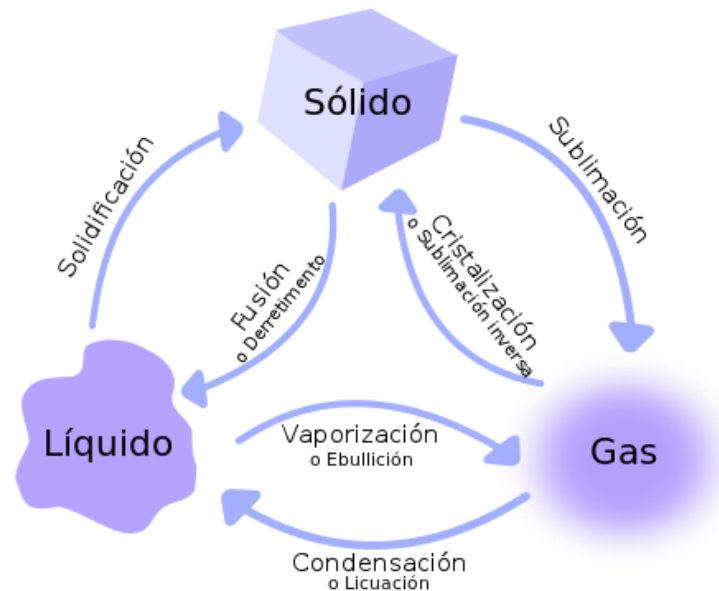
*Los cambios de fase desde un estado de mayor orden molecular a uno de menor orden molecular absorben energía (endotérmicos).*



# Cambios de fase

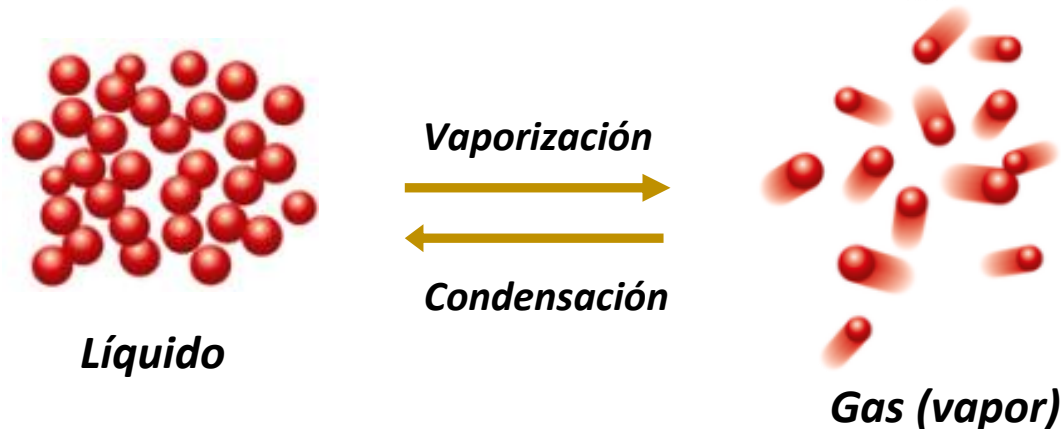
## Tipos de equilibrio de fases:

- Equilibrio líquido-vapor
- Equilibrio líquido-sólido
- Equilibrio sólido-vapor



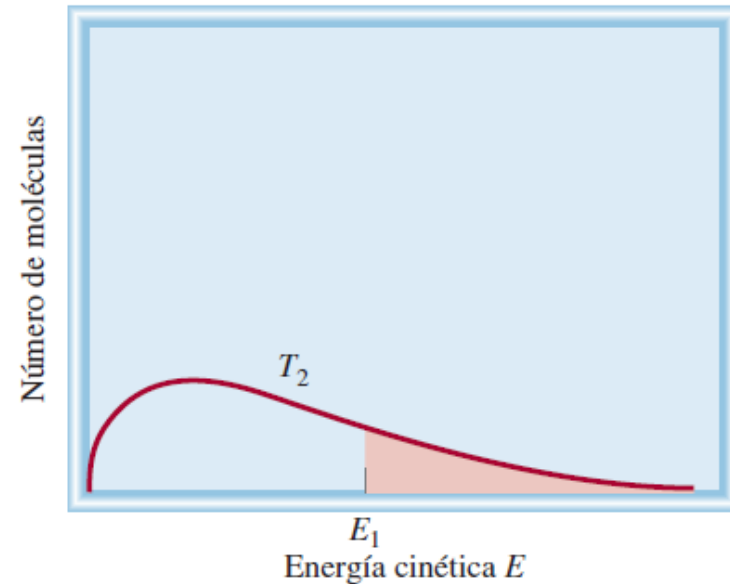
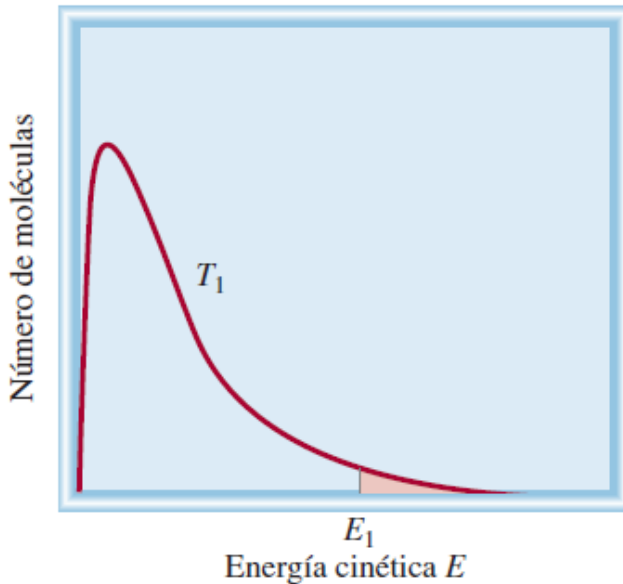
# Equilibrio líquido-vapor

- Si se calienta un líquido, sus moléculas aumentan su energía cinética ( $E_c$ ).
- Si la  $E_c$  es lo suficientemente grande, las moléculas comenzarán a escapar de la fase líquida (desde la superficie del líquido), y pasaran a la fase vapor.



# Equilibrio líquido-vapor

Cuando las moléculas de un líquido tienen suficiente energía para escapar de la superficie, sucede un cambio de fase. *La evaporación* o vaporización es el proceso en el cual un *líquido se transforma en gas*.

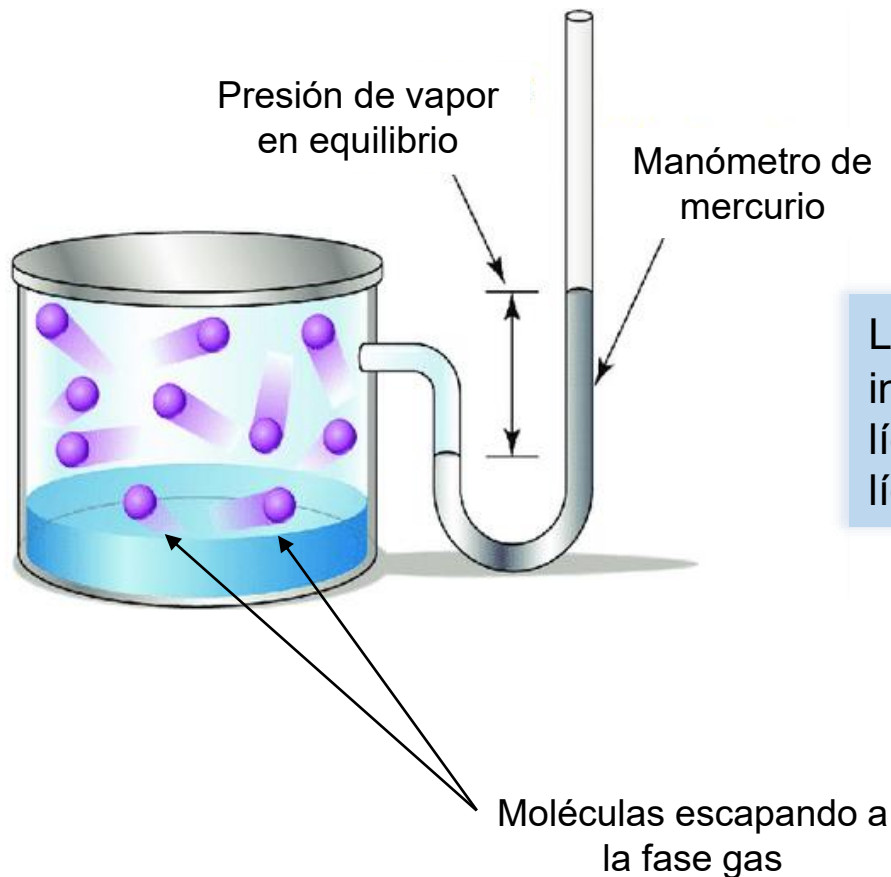


*Cuanto mayor es la temperatura ( $T_2 > T_1$ ), mayor es la energía cinética y, por tanto, más moléculas (parte sombreada) dejan la fase líquida.*

# Equilibrio líquido-vapor

## Presión de vapor en equilibrio...

Es la presión ejercida por las partículas de vapor en equilibrio con la fase líquida a una temperatura determinada.



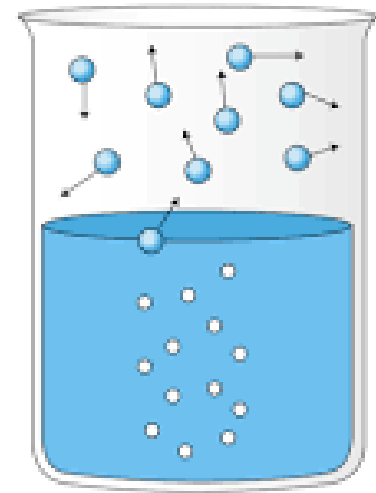
La ***presión de vapor en equilibrio*** es independiente de la cantidad de líquido. La presión de vapor de un líquido aumenta con la temperatura.

# Equilibrio líquido-vapor

## Punto de ebullición...

*Es la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido se iguala a la presión atmosférica externa.*

En este punto, se forman burbujas de vapor dentro del líquido. La temperatura a la que hierve un líquido dado aumenta cuando se incrementa la presión externa.

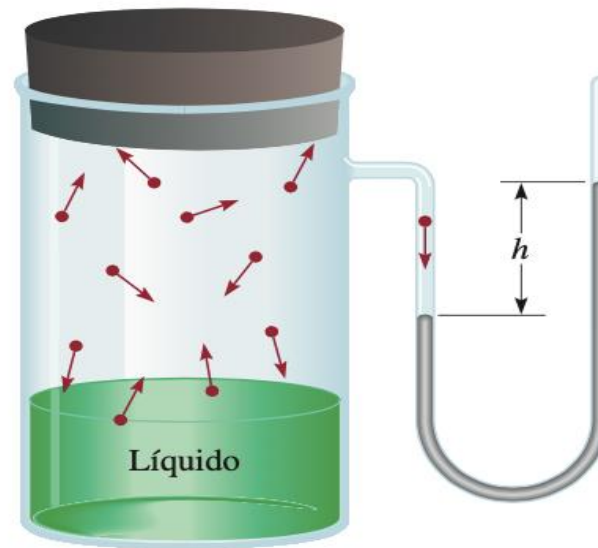


*La presión atmosférica es más baja a mayor altitud, por lo que el agua ebulle a una temperatura más baja ( $H_2O$  a 5000 msnm ebulle a  $80^{\circ}C$ ).*

# Equilibrio líquido-vapor

## Calor molar de vaporización ( $\Delta H_{vap}$ )

El *calor molar de vaporización* ( $\Delta H_{vap}$ ), se define como *la energía* (por lo general en kilojoules) *necesaria para evaporar un mol de un líquido*. Esta propiedad es una medida de la intensidad de las fuerzas intermoleculares que se ejercen en un líquido.



El  $\Delta H_{vap}$  está relacionado directamente con la magnitud de las fuerzas intermoleculares que hay en el líquido. En general: *A mayor intensidad de las fuerzas intermoleculares, el líquido tendrá una menor presión de vapor ( $P_v$ ) y un elevado  $\Delta H_{vap}$ .*

# Equilibrio líquido-vapor

## Calor molar de vaporización ( $\Delta H_{\text{vap}}$ )

El punto de ebullición y el  $\Delta H_{\text{vap}}$  están determinados por la magnitud de las fuerzas intermoleculares.

**Tabla 11.6** Calores molares de vaporización de una selección de líquidos

Sustancia	Punto de ebullición* (°C)	$\Delta H_{\text{vap}}$ (kJ/mol)
Agua (H <sub>2</sub> O)	100	40.79
Argón (Ar)	−186	6.3
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	80.1	31.0
Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	78.3	39.3
Éter dietílico (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	34.6	26.0
Mercurio (Hg)	357	59.0
Metano (CH <sub>4</sub> )	−164	9.2

Las sustancias con puntos de ebullición bajos, presentan fuerzas intermoleculares débiles y por lo tanto  $\Delta H_{\text{vap}}$  pequeños.

# Equilibrio líquido-vapor

## La ecuación de Clausius-Clapeyron

La relación cuantitativa entre la presión de vapor  $P$  de un líquido y la temperatura absoluta  $T$  está dada por la ecuación de *Clausius-Clapeyron*

$$\ln P = -\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT} + C$$

Ec. de Clausius-Clapeyron

$T$  = temperatura absoluta

$R$  = constante de los gases (8.314 J/mol. K)

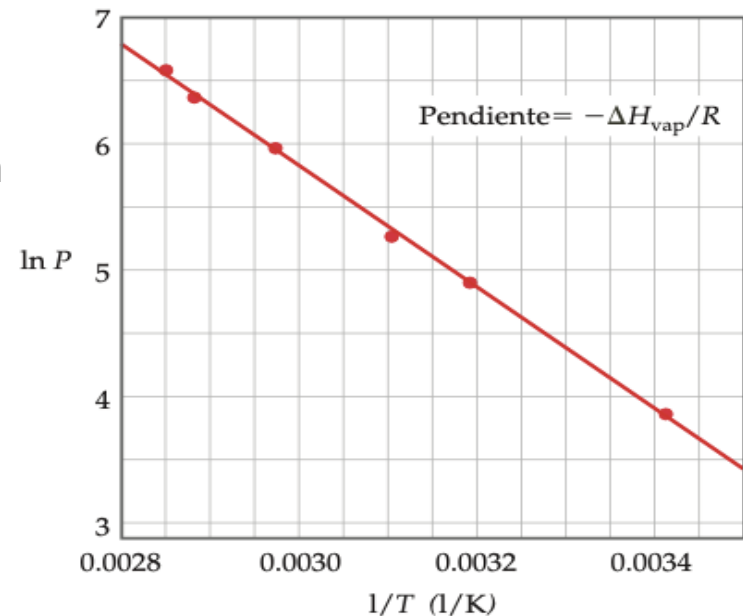
$\Delta H_{\text{vap}}$  = Entalpía molar de vaporización

$C$  = valor constante

La ecuación tiene la forma de la ecuación de la recta:

$$\ln P = \left( -\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \right) \left( \frac{1}{T} \right) + C$$

$\updownarrow \qquad \qquad \updownarrow \qquad \qquad \updownarrow \qquad \qquad \updownarrow$   
 $y = m \quad x + b$






# Equilibrio líquido-vapor

## La ecuación de Clausius-Clapeyron

Si conocemos los valores de  $\Delta H_{\text{vap}}$  y  $P$  de un líquido a una temperatura dada, es posible utilizar la ecuación de *Clausius-Clapeyron* para calcular la presión de vapor del líquido a otra temperatura .

Condición 1  $\ln P_1 = -\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT_1} + C$

Condición 2  $\ln P_2 = -\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT_2} + C$


$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right)$$

# Ejemplo

La presión de vapor del etanol es de 100 mmHg a 34.9 °C. ¿Cuál es su presión de vapor a 63.5 °C? (El  $\Delta H_{\text{vap}}$  del etanol es de 39.3 kJ/mol).

$$R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad 1 \text{ KJ} = 1000 \text{ J}$$

Datos:

$$P_1 = 100 \text{ mmHg}$$

$$T_1 = 34.9 \text{ }^\circ\text{C} = 308.1 \text{ K}$$

$$P_2 = ?$$

$$T_2 = 63.5 \text{ }^\circ\text{C} = 336.7 \text{ K}$$

$$\Delta H_{\text{vap}} = 39.3 \text{ kJ/mol}$$

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}$$

R: 366 mm Hg

# Ejercicio

El tolueno,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ , es un líquido que se usa en la preparación de dinamita (TNT). Su punto de ebullición normal es de  $111.0^\circ\text{C}$  y su calor molar de vaporización es de  $35.9\text{ kJ/mol}$ . ¿Cuál es la presión de vapor (en torr) del tolueno a  $85.00^\circ\text{C}$ ?

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{\Delta H_{vap}}{R} \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}$$

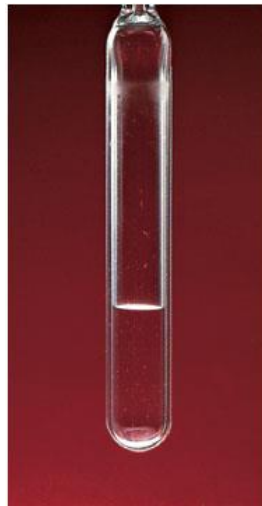
**R: 336.3 torr**

# Temperatura y presión crítica



# Temperatura y presión crítica

- La **temperatura crítica** ( $T_c$ ) es la temperatura por encima de la cual la fase gaseosa no puede licuarse, independientemente de la presión aplicada. Es también *la temperatura más alta a la cual una sustancia puede existir en forma líquida*.
- La **presión crítica** ( $P_c$ ) es la presión mínima que debe aplicarse para producir la licuefacción de una sustancia a la temperatura crítica.



$T < T_c$   
Líquido



$T > T_c$   
El líquido  
desaparece



$T \sim T_c$   
Coexisten  
las fases



$T < T_c$   
Reaparece el estado  
líquido

*El  $\text{SF}_6$  se calienta por arriba de su temperatura crítica ( $45.5^\circ\text{C}$ ) y luego se enfría por debajo de  $45.5^\circ\text{C}$ .*

# Temperatura y presión crítica

Temperatura y presión crítica de algunas sustancias comunes

<b>Tabla 11.7</b> <b>Temperaturas críticas y presiones críticas de una selección de sustancias</b>		
<b>Sustancia</b>	<b><math>T_c</math> (°C)</b>	<b><math>P_c</math> (atm)</b>
Agua (H <sub>2</sub> O)	374.4	219.5
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	132.4	111.5
Argón (Ar)	−186	6.3
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	288.9	47.9
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	31.0	73.0
Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	243	63.0
Éter dietílico (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	192.6	35.6
Hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> )	45.5	37.6
Hidrógeno molecular (H <sub>2</sub> )	−239.9	12.8
Mercurio (Hg)	1 462	1 036
Metano (CH <sub>4</sub> )	−83.0	45.6
Nitrógeno molecular (N <sub>2</sub> )	−147.1	33.5
Oxígeno molecular (O <sub>2</sub> )	−118.8	49.7

# Pregunta

En cual de las siguientes situaciones se encuentra el  $\text{SF}_6$

- A)  $T < T_c$
- B)  $T < T_c$
- C)  $T = T_c$



**FIN DE LA CLASE 😊**

**Prof. Myleidi Vera**  
**[mylevera@udec.cl](mailto:mylevera@udec.cl)**