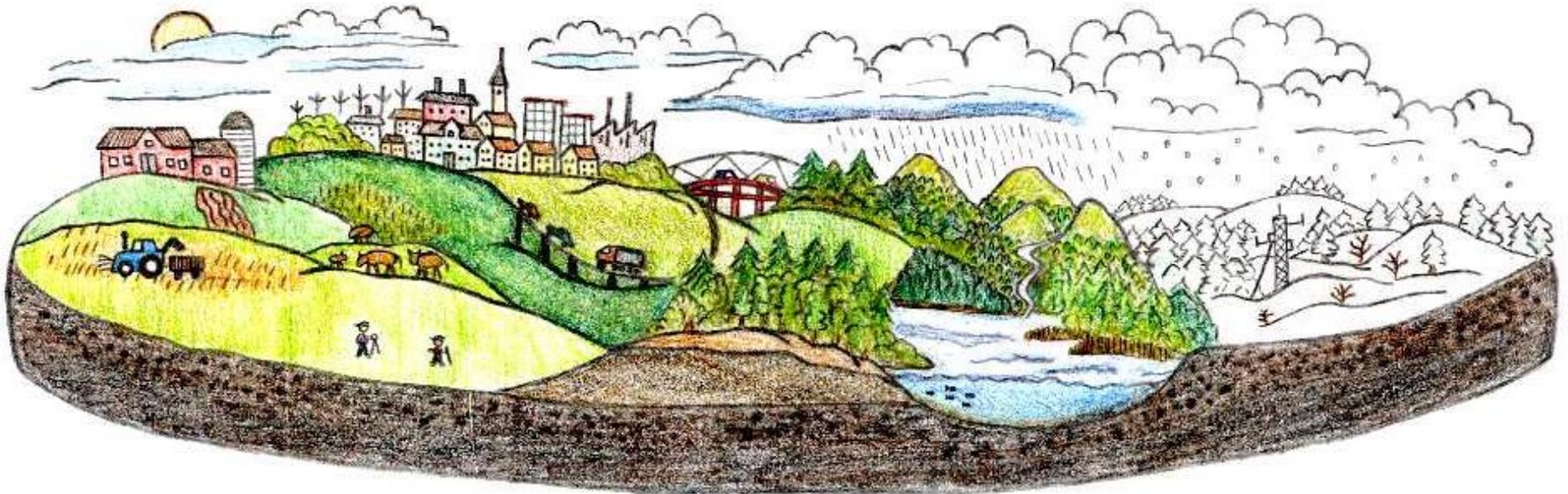


Bases Físicas del Medio Ambiente

Fenómenos de Superficie



Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.(2h)**
- Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial. Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos. Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.



Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.(2h)**
- **Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial.** Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos. Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.



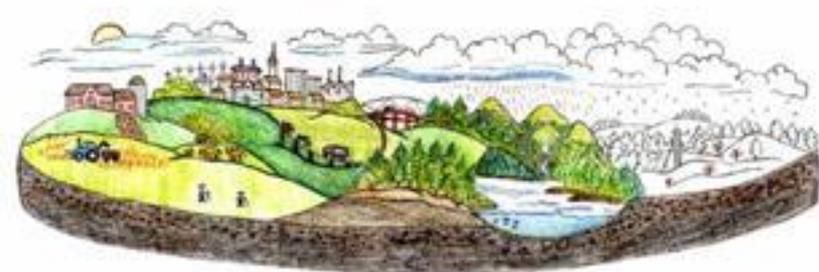
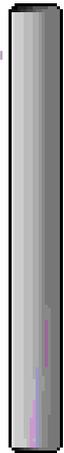
Siguiendo con los fluidos

- En concreto, el comportamiento de los líquidos en contacto con otro medio
- Dos fenómenos de interés particular
 - Tensión Superficial
 - Capilaridad
- Para empezar, conviene recordar unas propiedades de los líquidos



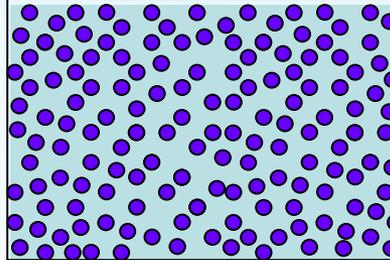
Capillary Action

Straw
lowered into
water



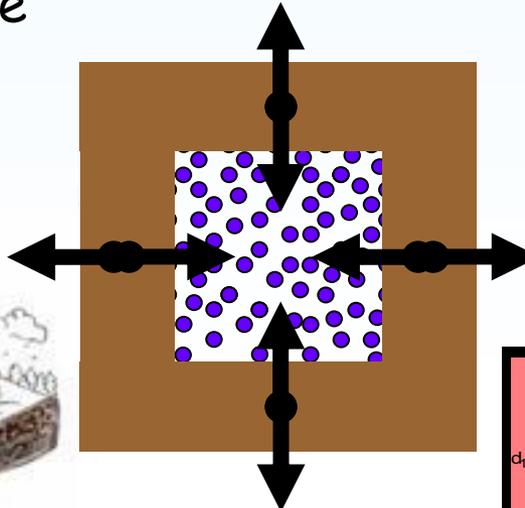
Fuerzas intermoleculares en los líquidos

- Un líquido se adapta a la forma de su recipiente

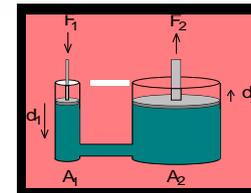


- Las moléculas pueden moverse en el seno del líquido

- Un líquido es prácticamente incompresible
- Las moléculas tienden a mantenerse unidas

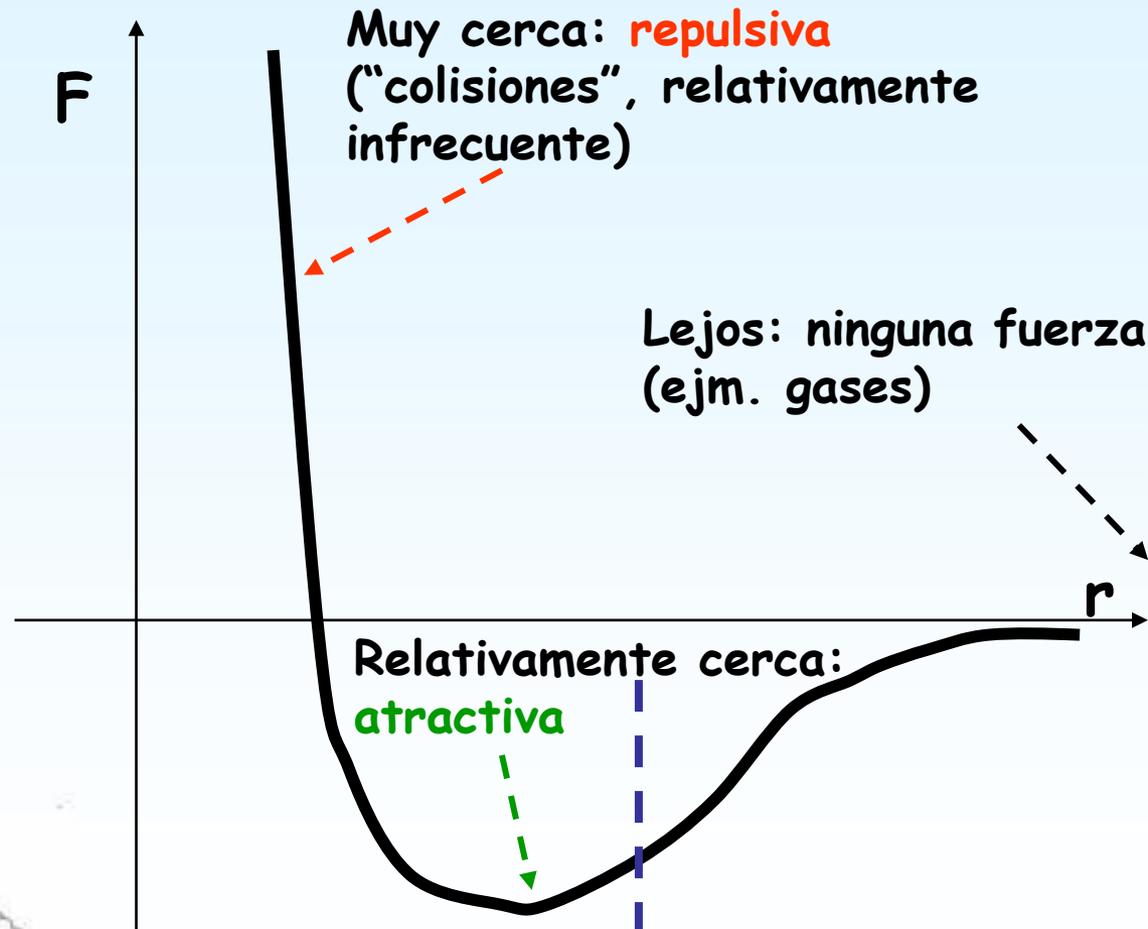


- Fuerza repulsiva al acercarse las moléculas
- Fuerza atractiva al alejarse las moléculas

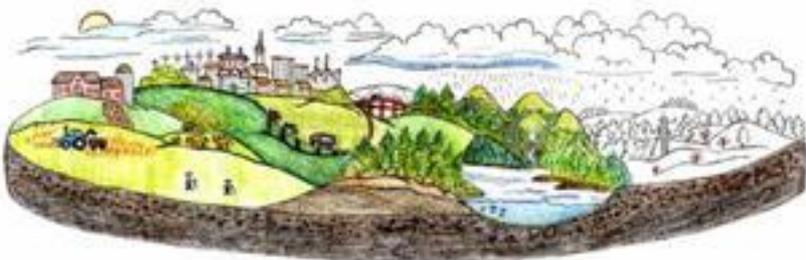


Fuerzas intermoleculares

- Estas fuerzas (F) son de naturaleza electromagnética
- Su magnitud depende de la distancia (r) entre las moléculas



Para entender la tensión superficial y la capilaridad, conviene enfocarse en las fuerzas promedio (atractivas)



Dos casos distintos

- En el seno del líquido, existe un estado de equilibrio en **<promedio temporal>**

- $\langle \Sigma \text{ Fuerzas atractivas} \rangle = 0$

- En condiciones semejantes en la superficie, este equilibrio se descompensaría, causando una fuerza neta hacia el interior (recuerdo: fluido estático)

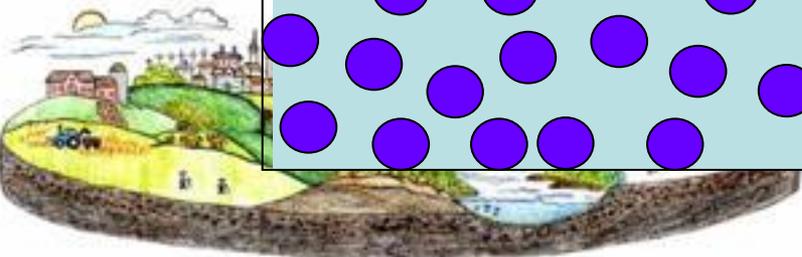
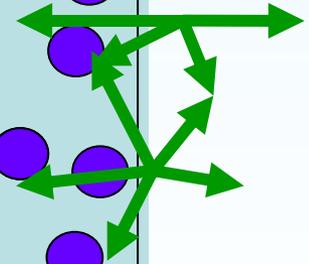
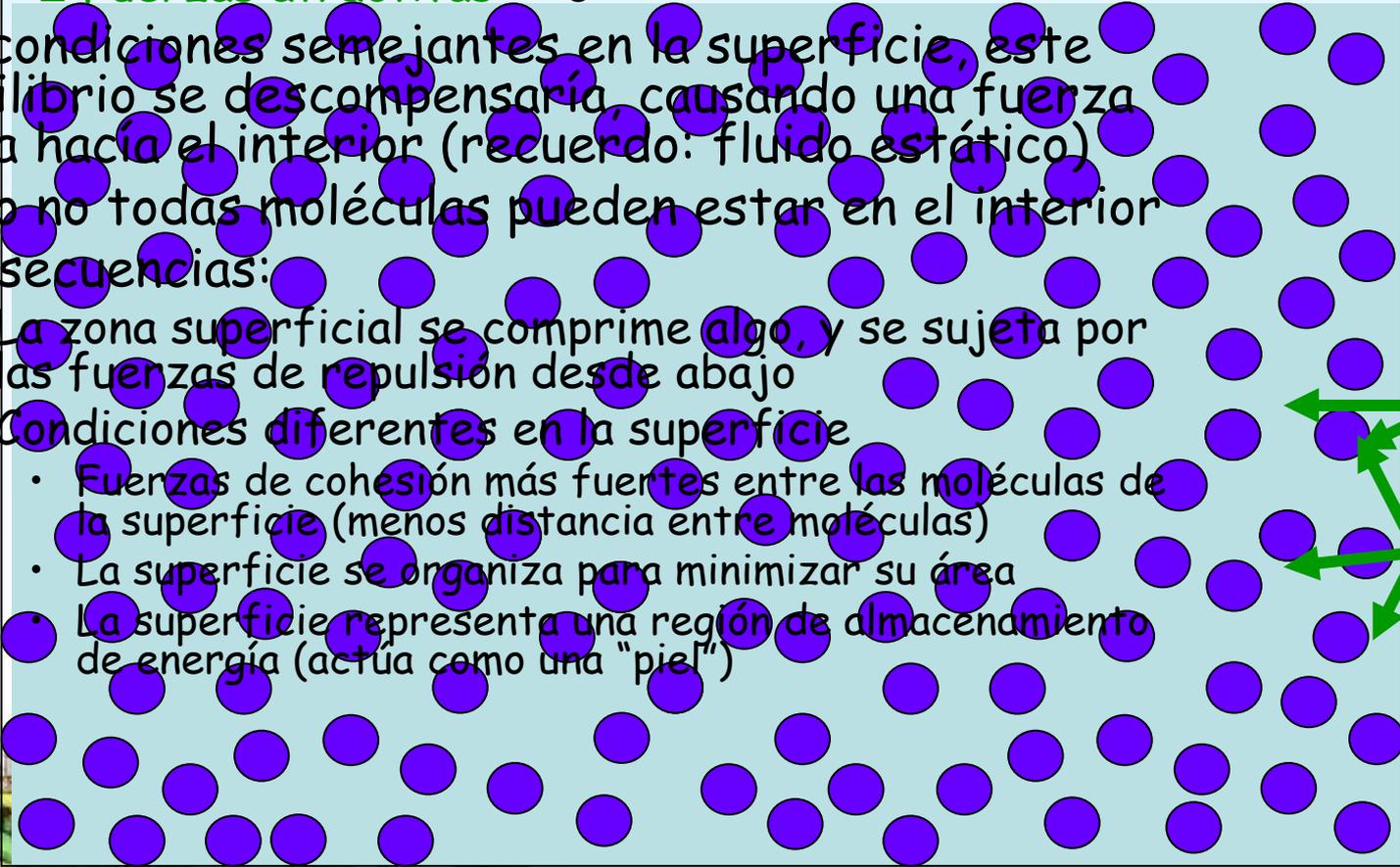
- Pero no todas moléculas pueden estar en el interior

- Consecuencias:

- La zona superficial se comprime algo, y se sujeta por las fuerzas de repulsión desde abajo

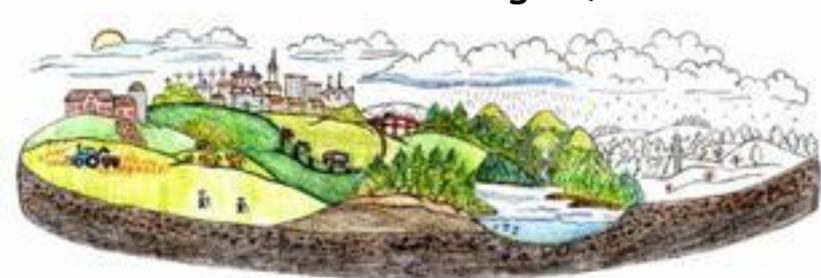
- Condiciones diferentes en la superficie

- Fuerzas de cohesión más fuertes entre las moléculas de la superficie (menos distancia entre moléculas)
 - La superficie se organiza para minimizar su área
 - La superficie representa una región de almacenamiento de energía (actúa como una "piel")



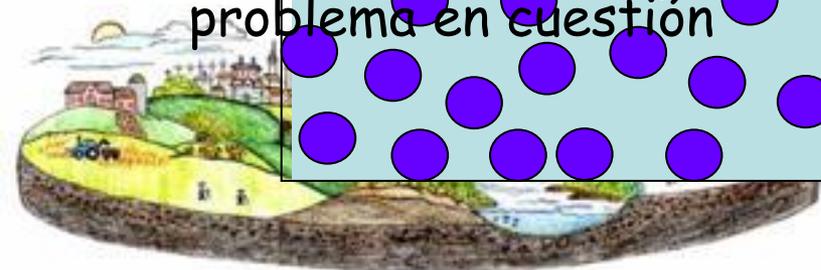
Dos casos distintos

- En el seno del líquido, existe un estado de equilibrio en **<promedio temporal>**
 - **< Σ Fuerzas atractivas > = 0**
- En condiciones semejantes en la superficie, este equilibrio se descompensaría, causando una fuerza neta hacía el interior (recuerdo: fluido estático)
- Pero no todas moléculas pueden estar en el interior
- Consecuencias:
 - La zona superficial se comprime algo, y se sujeta por las fuerzas de repulsión desde abajo
 - Condiciones diferentes en la superficie
 - Fuerzas de cohesión más fuertes entre las moléculas de la superficie (menos distancia entre moléculas)
 - La superficie se organiza para minimizar su área
 - La superficie representa una región de almacenamiento de energía (actúa como una "piel")



Tensión Superficial

- Las moléculas de la superficie tienen mayor energía potencial que las situadas en el interior (energía superficial)
 - Para mover una molécula del interior de un líquido (menos energía) hasta la superficie (alta energía), hay que realizar trabajo
 - Mover una molécula de la superficie hasta el interior libera energía (por eso se va minimizando la superficie)
- Hay diferentes maneras de ver el concepto de tensión superficial (dimensionalmente)
 - Fuerza por unidad de longitud (N m^{-1})
 - Energía por unidad de superficie (J m^{-2})
 - En unidades fundamentales (kg s^{-2})
- Todos son válidos; pueden convenir según el problema en cuestión



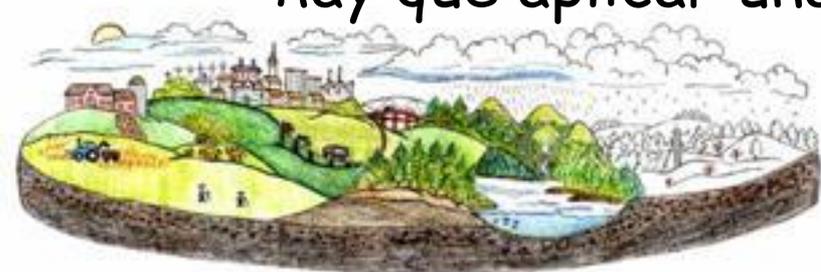
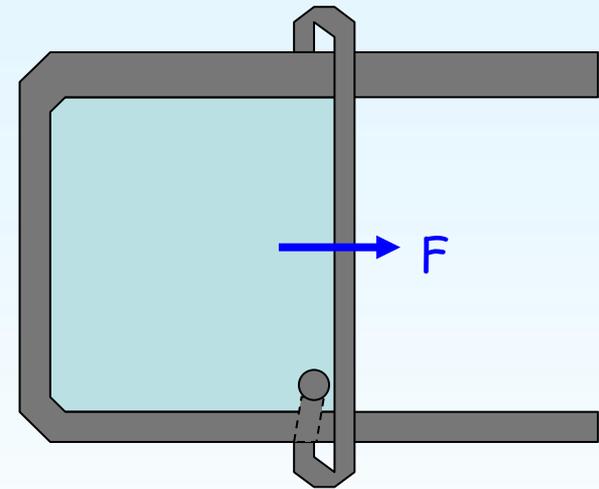
Tensión Superficial

- Las moléculas de la superficie tienen mayor energía potencial que las situadas en el interior (energía superficial)
 - Para mover una molécula del interior de un líquido (menos energía) hasta la superficie (alta energía), hay que realizar trabajo
 - Mover una molécula de la superficie hasta el interior libera energía (por eso se va minimizando la superficie)
- Hay diferentes maneras de ver el concepto de tensión superficial (dimensionalmente)
 - Fuerza por unidad de longitud (N m^{-1})
 - Energía por unidad de superficie (J m^{-2})
 - En unidades fundamentales (kg s^{-2})
- Todos son válidos; pueden convenir según el problema en cuestión



Cómo medir la tensión superficial de un líquido

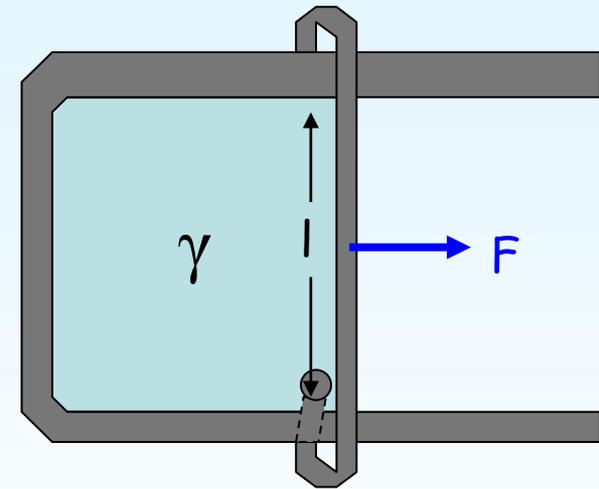
- Consideramos el dispositivo a la derecha; consiste en
 - Alambre en forma de U
 - Alambre deslizante
- Al introducir una película de disolución jabonosa
 - Se contrae inmediatamente
 - Para volver a la posición original, hay que aplicar una fuerza F



Una película tiene dos lados...

- La película es delgada, pero muy ancho comparado con el radio de una molécula
- La consideramos como un fluido compuesto de un interior y **dos superficies** (una por cada lado), ambas en contacto con el aire
- Al tirar la fuerza F , las superficies se amplían (requiere trabajo), incorporando moléculas del interior
- Empíricamente: si el alambre deslizante tiene longitud l , la tensión superficial actúa sobre una longitud $2l$ (l , en ambos lados)
- La tensión superficial es

$$\gamma = \frac{F}{2l}$$



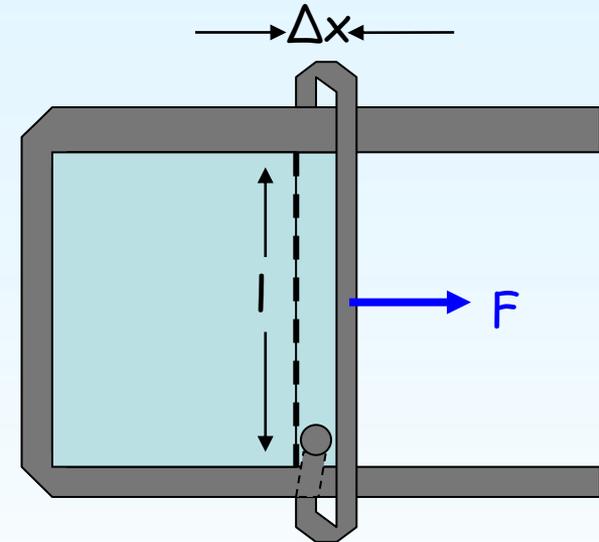
La tensión superficial es una propiedad del líquido

- Se trata de incorporar n moléculas en las superficies, añadiendo $(2 l \Delta x)$ de área
- Si n_a es el número de moléculas adicionales por unidad de superficie, entonces

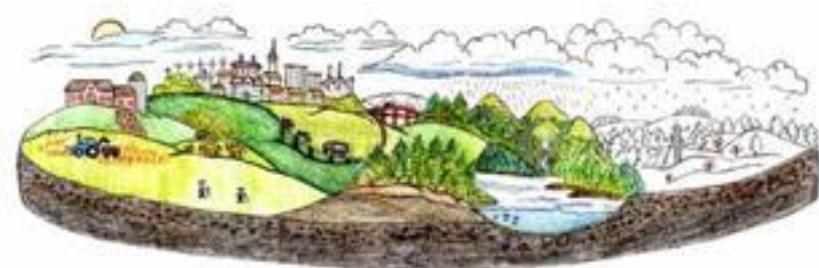
$$n = (2l \Delta x) n_a$$

- Si cada molécula de la superficie tiene w' más energía potencial que una molécula en el seno, entonces el trabajo necesario para ampliar el área es

$$W = n w' \\ = 2n_a l \cancel{\Delta x} w' = F \cancel{\Delta x}$$



$$\gamma = \frac{F}{2l} = n_a w' \quad \gamma = \frac{n}{\Delta A} w' = \frac{W}{\Delta A}$$

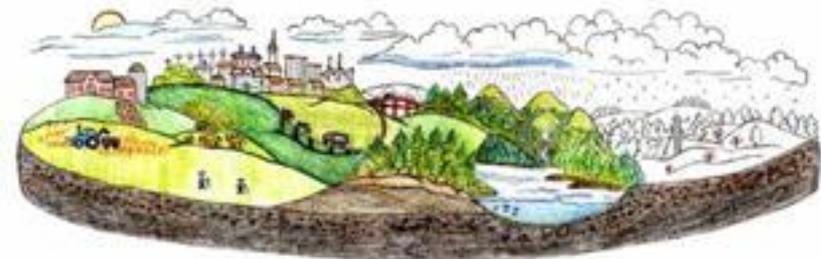
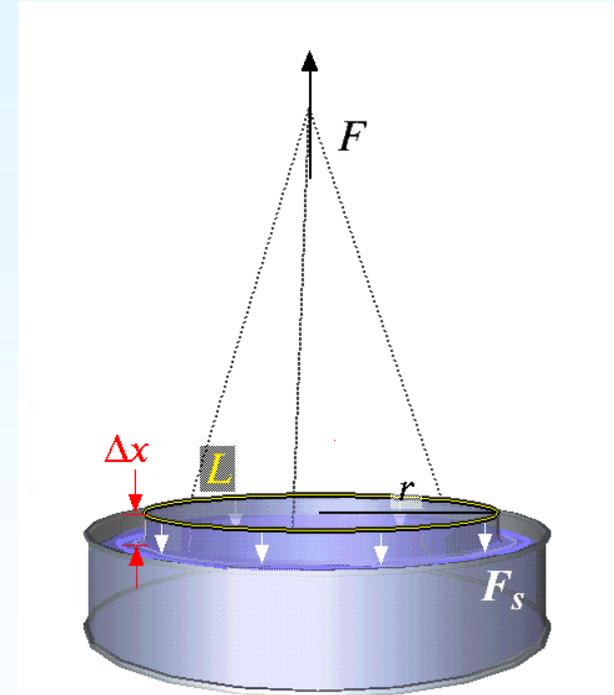


Otro Método para medir la tensión superficial

- Un alambre circular de longitud l ($2\pi r$) se extrae de una masa líquida
- La fuerza adicional F necesaria para equilibrar las fuerzas superficiales (γl), una a cada lado, se mide por la tensión que aparece en un resorte o por la torsión de un hilo

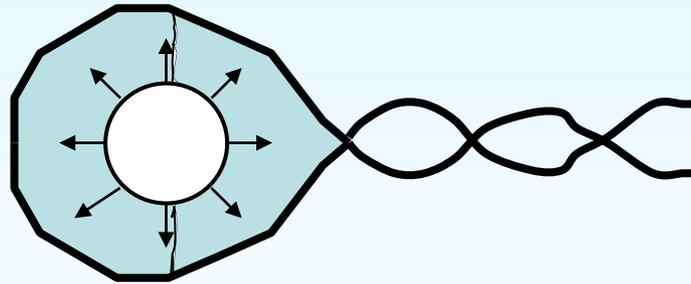
$$\gamma = \frac{F}{2l}$$

- Porqué 2: El hilo tiene un interior y exterior



La fuerza es tangencial a la superficie

- Consideramos el anillo de alambre con un hilo en su interior, dentro de una película de disolución jabonosa



- Si rompemos la burbuja en el interior del hilo
 - La película restante intentará minimizar su área
 - La tensión superficial actúa en la plana de la película
 - Termina en la forma óptima



Programa

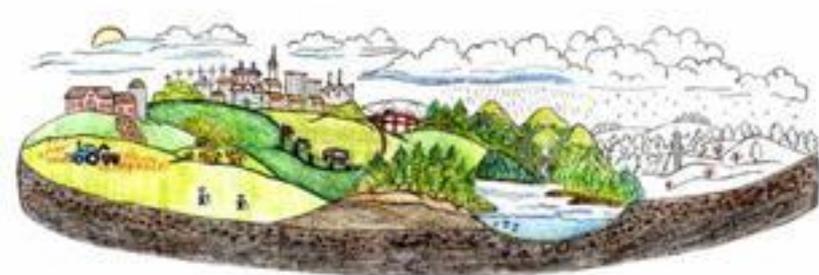
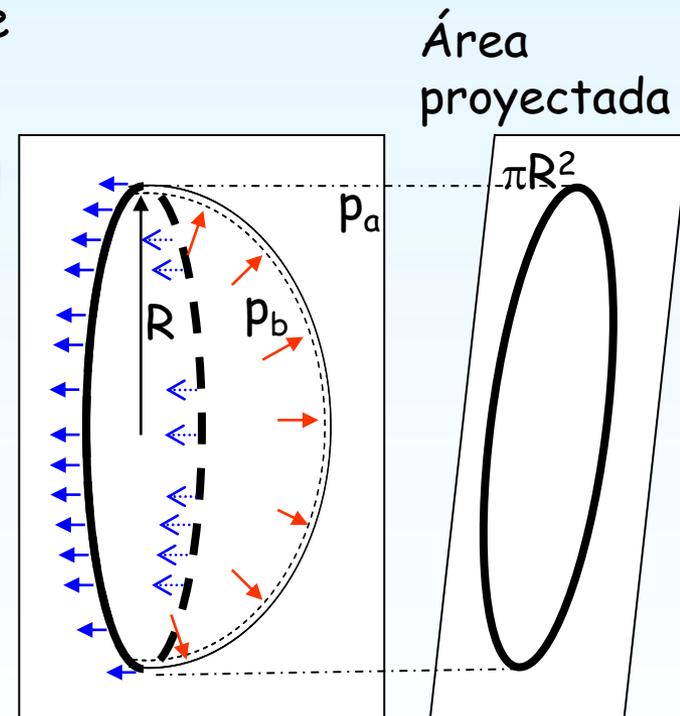
- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.(2h)**
- Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial. **Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos.** Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.



Diferencia de presión entre las dos caras de un burbuja

- Burbuja de jabón - dos superficies esféricas muy próximas con un líquido entre ellas; consideramos el hemisferio de la derecha (y aprovechamos la simetría)
- La γ tiende a reducirlas \rightarrow compresión del aire en el interior (diferencia de presión)
- Balance de fuerzas
 - **Hacia la derecha:** $(p_b - p_a)\pi R^2$
 - **Hacia la izquierda:** $2\gamma(2\pi R)$

$$p_b - p_a = 4\gamma / R \quad (\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2})$$



Diferencia de presión entre las dos caras de una gota líquida

- La misma derivación, pero sólo con una lámina superficial
- Balance de fuerzas
 - **Hacia la derecha:** $(p_b - p_a)\pi R^2$
 - **Hacia la izquierda:** $\gamma (2\pi R)$

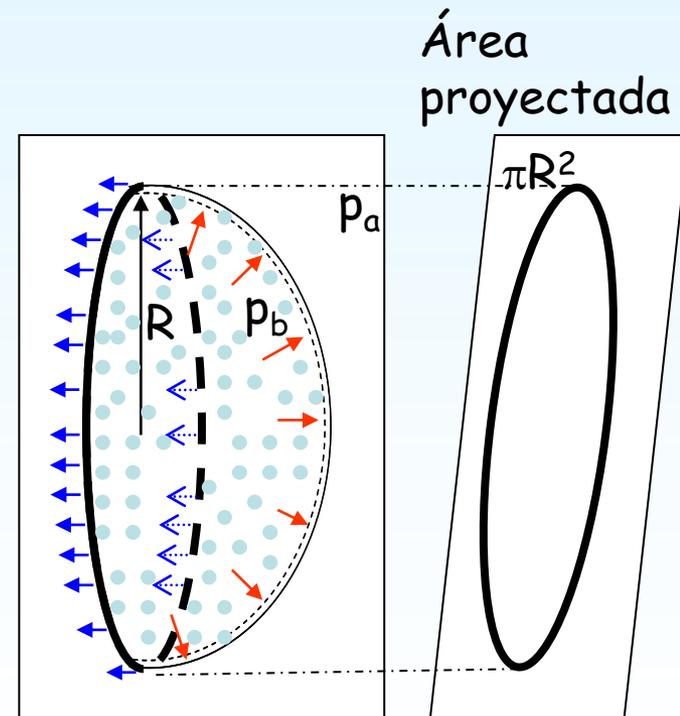
$$p_b - p_a = 2\gamma / R$$

Ecuación Young-Laplace

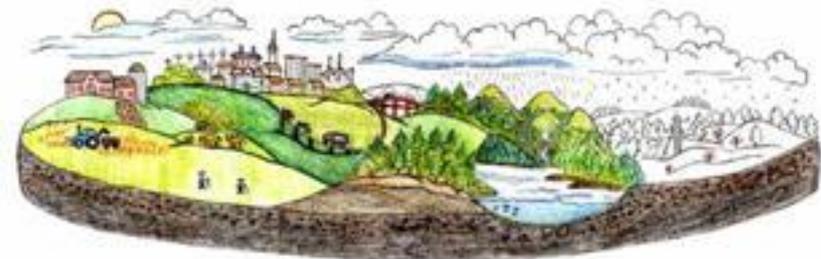
Ejemplos:

Gota, agua de nube

Gota de aceite en vinagre



Válido para el contacto entre dos líquidos



Superficies cilíndricas

- En particular, capilares (plantas, venas, etc.)

- Fuerza debida a la **sobrepresión**

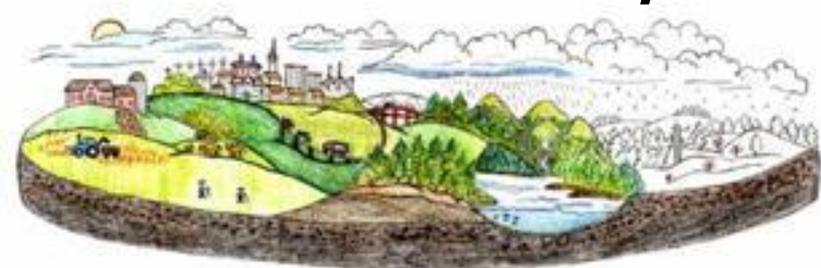
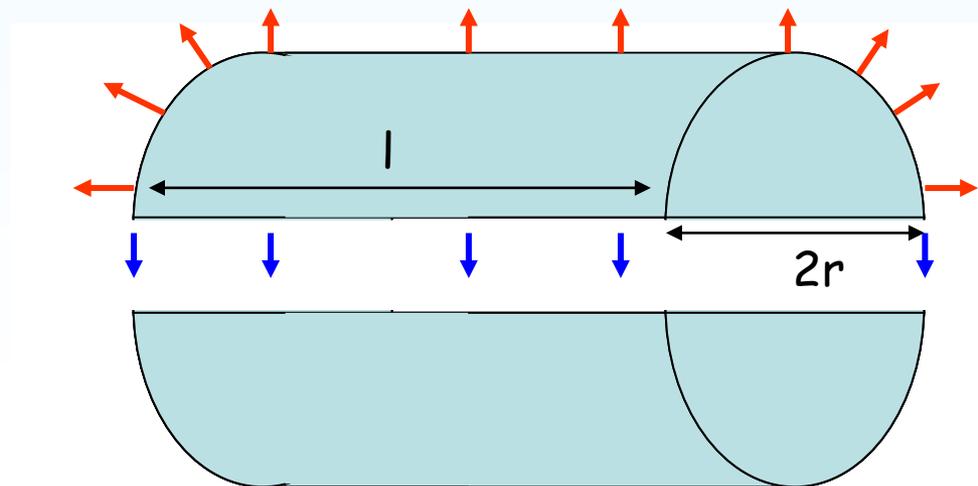
$$F_p = (p_i - p_0) 2r l$$

- Fuerza debida a la **tensión superficial**

$$F_\gamma = 2l \gamma$$

- En equilibrio

$$p_i - p_0 = \frac{\gamma}{r}$$



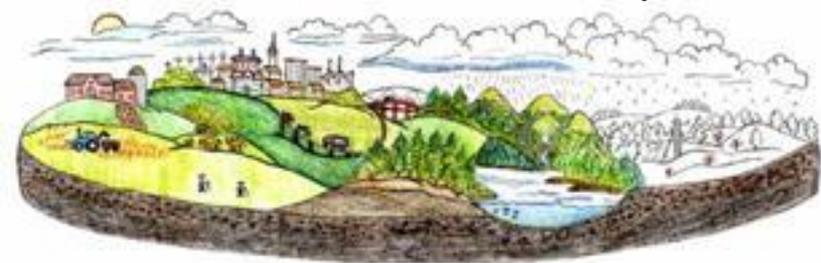
Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.(2h)**
- Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial. Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos. **Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.**



La tensión superficial no es una propiedad del líquido

- ¿El profesor se contradice?
- Ningún líquido puede existir en un vacío
- Entonces, la superficie representa un límite entre dos medios
- Cuando se habla de γ como propiedad de algún líquido, se supone que el otro medio es el aire (que tiene poca influencia)



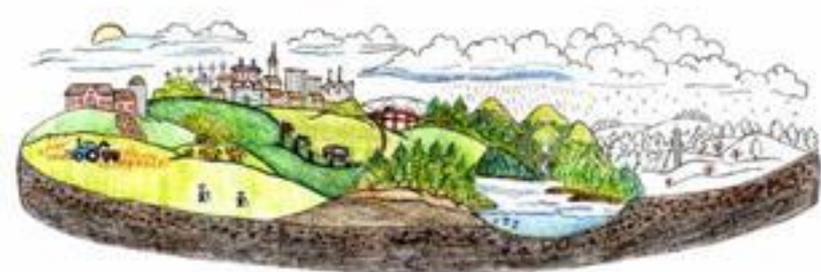
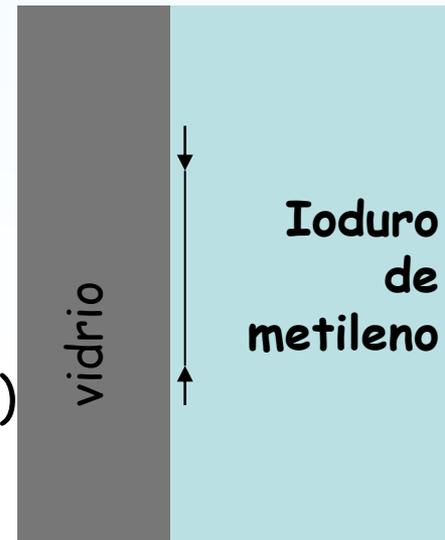
La tensión superficial ¿Puede ser negativo?

- Superficie agua-aire: la γ se debe a la *cohesión* entre las moléculas de agua



- Para una superficie entre vidrio y Ioduro de Metileno, resulta más importante la *adhesión* del líquido al vidrio que la *cohesión* entre moléculas de líquido

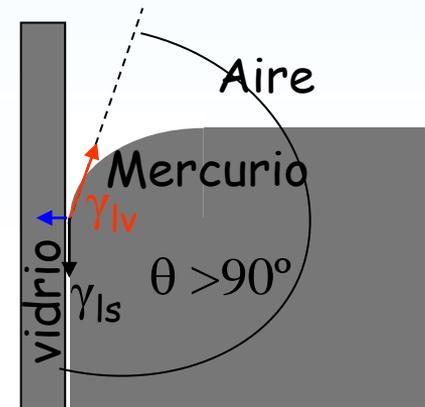
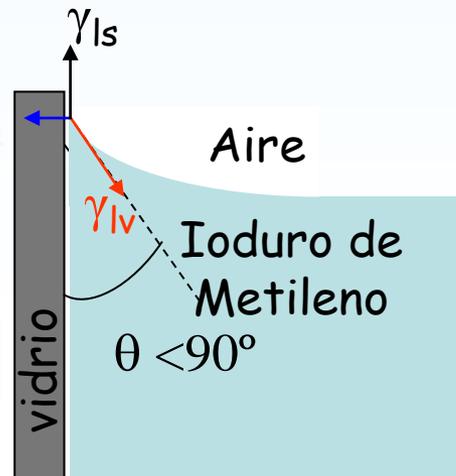
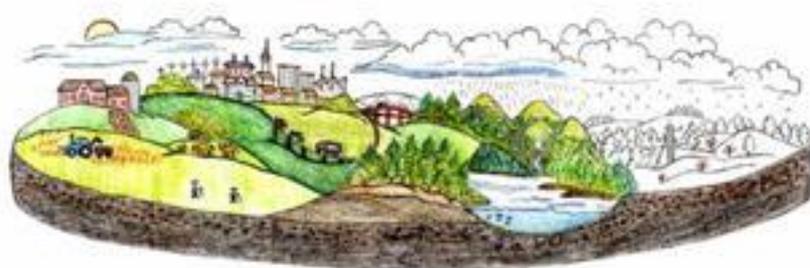
Consecuencias:
El líquido se adhiere ("moja") al vidrio
La superficie (del líquido) está en compresión



Contacto sólido-líquido-vapor

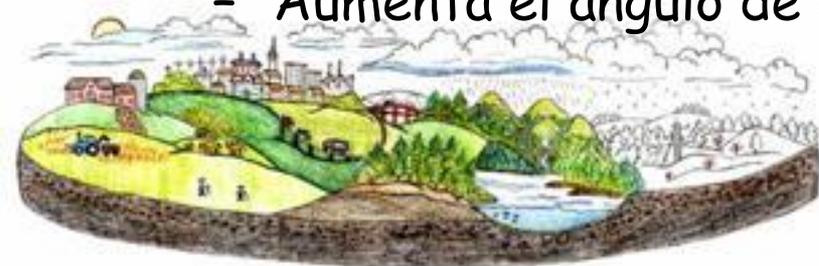
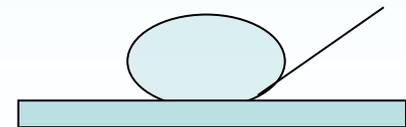
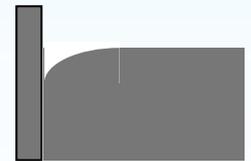
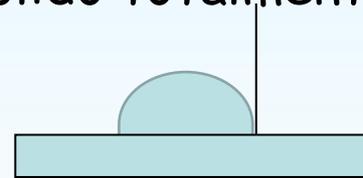
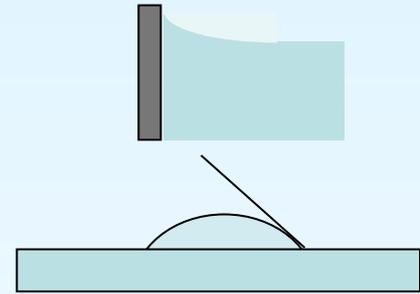
Ángulo de contacto

- Curvatura de una superficie líquida cerca de una pared
- Forma de la curvatura depende de las fuerzas de atracción entre las distintas fases (análisis de vectores en el "punto de contacto"):
 - **Fuerzas de cohesión** entre las moléculas del líquido en superficie/contacto con la fase vapor
 - Debidas a γ_{lv} , dependen sólo de la naturaleza del líquido (con aire).
 - **Fuerzas de adhesión**: atractivas entre líquido y sólido
 - Fuerzas de repulsión/atracción entre las moléculas del líquido en superficie/contacto con la fase sólido (tensión/compresión superficial)
 - Fuerzas de repulsión (compresión), debidas a γ_{ls} (<0); pared "mojada"
 - Fuerzas de atracción (tensión), debidas a γ_{ls} (>0); pared "seca"
 - Dependen de la naturaleza de ambos



Resumen - Ángulo de Contacto

- El líquido moja al sólido
 - Adhesión (pared) > Cohesión (líquido)
 - El límite tiende a aumentar (concavidad)
 - El líquido se extiende por la pared
 - Reduce el ángulo de contacto ($0 < \theta < 90^\circ$)
 - Nota: $\theta = 0^\circ \rightarrow$ el líquido moja el sólido totalmente
 - $\cos(\theta=0) = 100\%$
- Indiferencia ($\theta = 90^\circ$)
 - Cohesión (líquido) = Adhesión (pared)
- El líquido no moja al sólido
 - Cohesión (líquido) > Adhesión (pared)
 - Reducción de la superficie (convexidad)
 - Aumenta el ángulo de contacto ($\theta > 90^\circ$)



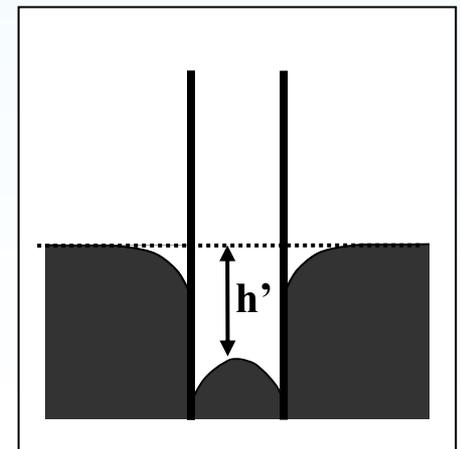
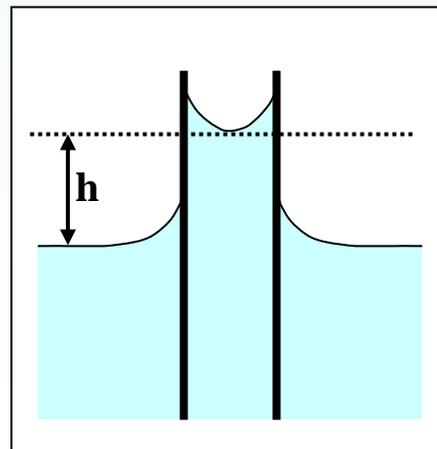
Capilaridad

Ley de Jurin

- En tubos estrechos (capilares), se nota un comportamiento particular de los líquidos
- Depende si el líquido moja la pared

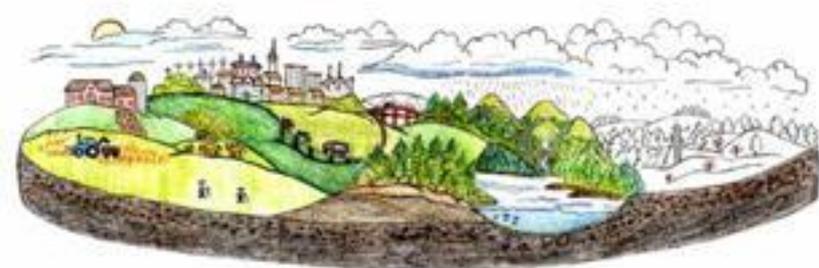
líquido que moja

líquido que no moja



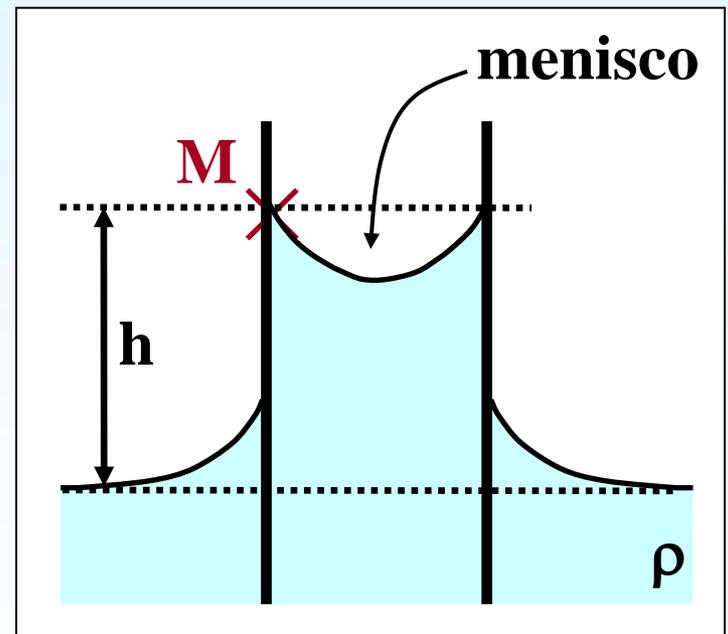
Ascenso por h

Descenso por h'



Analizamos el menisco

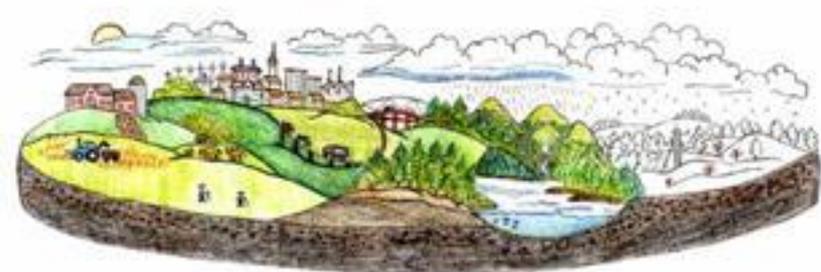
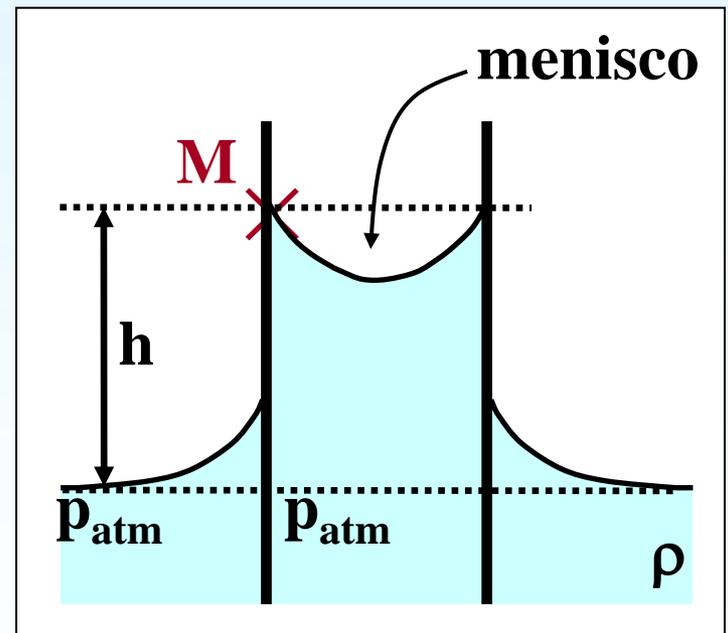
- Lo entendemos aplicando principios ya presentados
- ¿Qué presión hay en el punto M en el líquido justamente por debajo del punto de contacto?
- Examinamos el menisco por dos puntos de vista:
 - Por la ecuación hidrostática
 - Por la ecuación de Laplace



Analizamos el menisco

- ¿Qué presión hay en el punto M en el líquido justamente por debajo del punto de contacto?
 - En la superficie libre hay p_{atm}
 - Pascal: a la misma altura, hay p_{atm}
 - Por la ecuación hidrostática:

$$p_M = p_{atm} - \rho g h$$



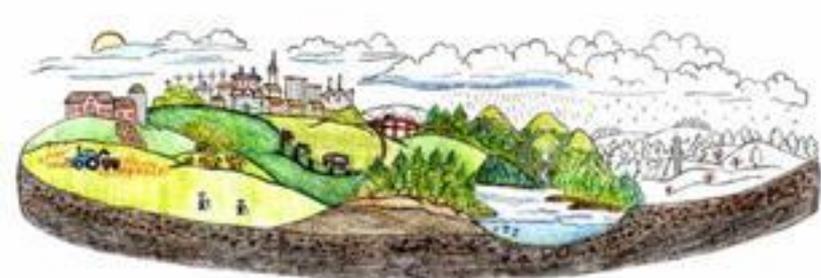
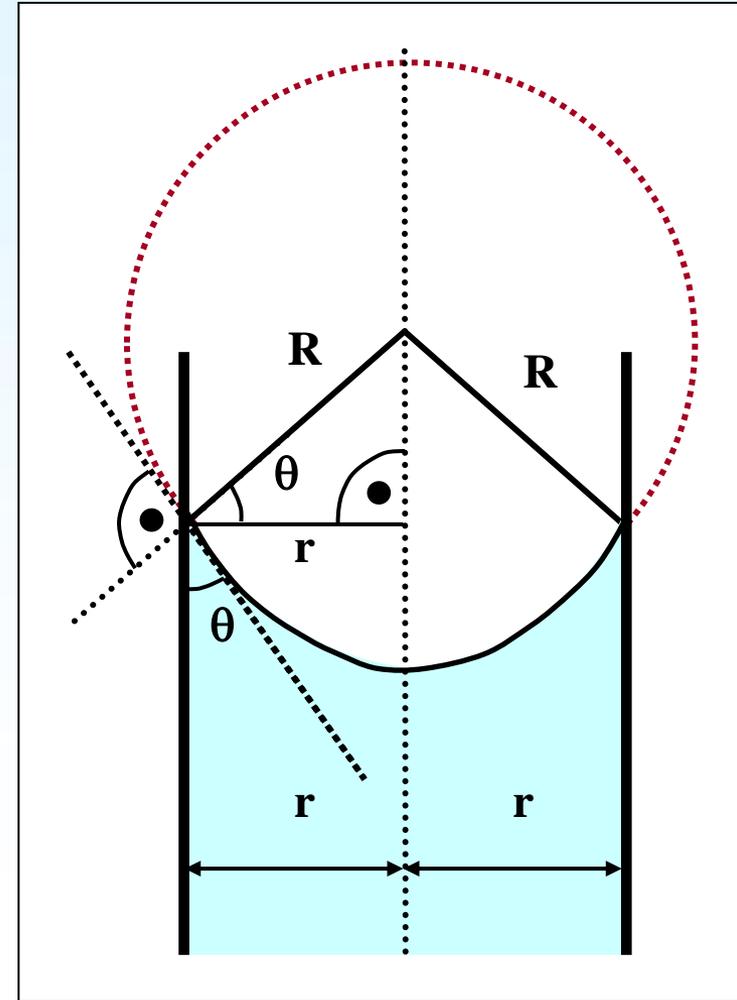
Analizamos el menisco

- Truco: consideramos el menisco como parte de una burbuja de radio R
 - Si $\theta > 0^\circ$, entonces $R > r$
- Entonces por la Ley de Laplace

$$p_M = p_{atm} - \frac{2\gamma}{R}$$

- Antes de comparar las dos estimaciones de p_M , nos fijamos en la trigonometría

$$r = R \cos \theta$$



La Ley de Jurin

- Igualando las dos estimaciones de p_M

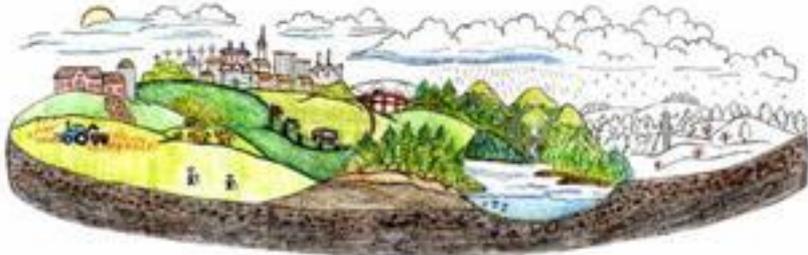
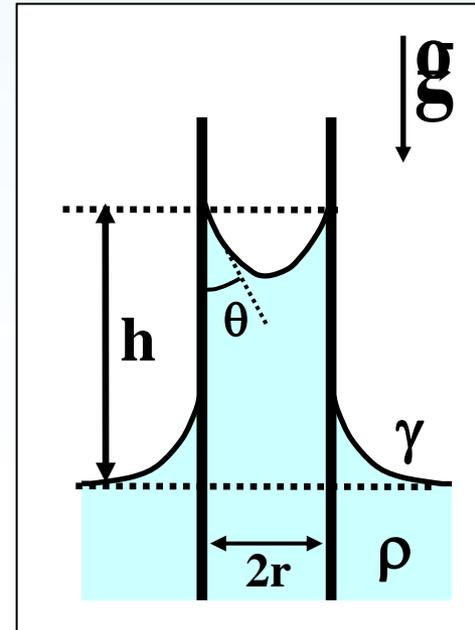
- Hidrostática $p_M = p_{atm} - \rho g h$
- Laplace $p_M = p_{atm} - \frac{2\gamma}{R}$

$$\rho g h = \frac{2\gamma}{R}$$

$$r = R \cos \theta$$

$$\rho g h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r}$$

- Resultado: la altura crece con la inversa del radio del tubo



Anécdota biológica

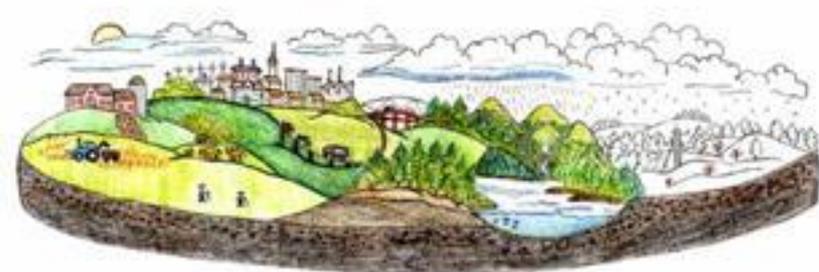
- Cuestión: ¿La capilaridad explica el ascenso de la savia a los árboles?
- Datos típicos:
 - Conductos de xilema, $r \sim 20 \mu\text{m}$
 - $\gamma_{\text{savia}} \sim 0.07 \text{ N/m}$
 - $\rho_{\text{savia}} \sim 1000 \text{ kg/m}^3$
 - savia moja por completo ($\theta \sim 0^\circ$)
- Altura máxima alcanzable por capilaridad:

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r} = \frac{2(0.07 \text{ N/m})}{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 0.7 \text{ m}$$

Contestación: insuficiente



Xilema de un roble



Conceptos/Ecuaciones a Dominar

- Tensión Superficial

$$\gamma = \frac{F}{2l} = n_a w' \quad \gamma = \frac{n}{\Delta A} w' = \frac{W}{\Delta A}$$

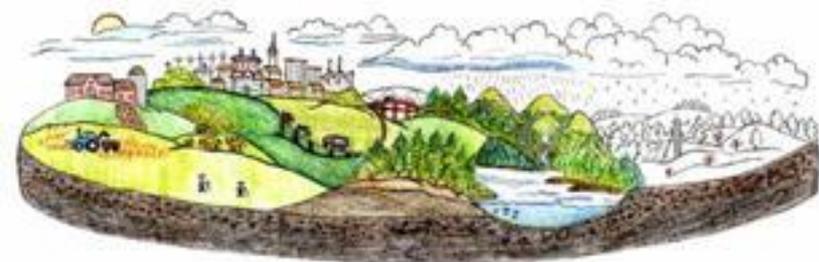
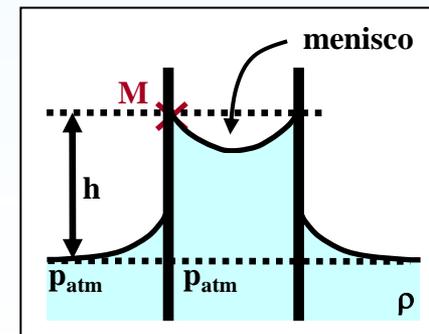
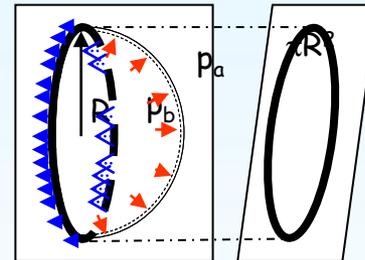
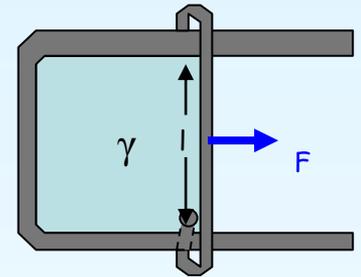
- Junta con presión

Burbujas: $p_b - p_a = 4\gamma / R$

Gotas: $p_b - p_a = 2\gamma / R$

- Angulo de Contacto

- Capilaridad: $\rho g h = \frac{2\gamma \cos\theta}{r}$



Fin

