Edén Sorolla Rosario

DESHIELO DE LOS POLOS

INTRODUCCIÓN

Este documento intenta aclarar, desde un punto de vista teórico, qué hay de verdad tras la afirmación de que el calentamiento global del planeta implicaría un aumento irreversible de la altura del mar a lo largo de toda la costa que forman los continentes del planeta Tierra.

Más allá de razones políticas, económicas o personales, lo que pretendemos es analizar si existen razones objetivas que nos lleven a afirmar o desmentir el supuesto aumento del nivel del mar debido al deshielo de los glaciares e icebergs que existen en los dos polos de la Tierra.

Primero tendremos en cuenta una serie de consideraciones simplificadoras que nos van a servir para acotar el problema, intentando no perder ni un ápice de generalidad. Intentaremos averiguar las consecuencias del cambio climático bajo las condiciones más realistas posibles, pero a la vez más sencillas, en que se nos plantea el problema del deshielo de los polos en la actualidad.

Lo segundo que se va a hacer es describir el teorema de Arquímedes de la manera más gráfica posible, para seguir planteando el problema que tenemos entre manos donde consideraremos un bloque de hielo u otro sólido que flota sobre agua salada cuya densidad y salinidad estimaremos sobre la base de datos bien conocidos y consensuados por la comunidad científica internacional para intentar simular las condiciones del agua de los océanos.

Por último estudiaremos algunos ejemplos que podrán ser llevados a la práctica mediante experimentos caseros, para los cuales daremos ejemplos concretos de volúmenes, etc., con el fin de entender si es posible o no apreciar los efectos del cambio climático a escalas demasiado pequeñas (como es el caso de los experimentos caseros) En caso negativo, intentaremos desvelar las razones que nos impiden apreciar la subida del nivel del agua ante el deshielo del agua pura congelada que anteriormente flotaba sobre el agua salada, en base a la precisión necesaria en las medidas para observar dicho aumento de volumen.

LEY DE ARQUÍMEDES

Para enunciar el principio o ley de Arquímedes necesitamos considerar primeramente un fluido sin rozamiento (esto es, sin viscosidad) Esto desde luego es una simplificación, una acotación del problema que no nos va a restar ninguna generalidad para el problema que queremos resolver sobre el deshielo.

El principio de Arquímedes dice que *un cuerpo sólido flotando sobre un fluido experimenta una fuerza de empuje hacia arriba que es igual al peso de la cantidad de fluido* ***desalojada*** *por el sólido.*

Cuando hablamos de "*la cantidad de fluido* ***desalojada*** *por el sólido"* queremos decir el volumen de líquido igual al volumen sumergido del sólido, porque el sólido sólo desaloja un volumen de fluido igual al volumen sumergido del sólido. Dicho volumen puede ser el volumen total del sólido (si éste es más denso que el líquido y por lo tanto el sólido no flotaría) o puede ser una parte del volumen total del sólido si flota sobre el fluido (si el sólido es menos denso que el líquido, como en el caso del hielo sobre agua, que es el caso que nos ocupa)

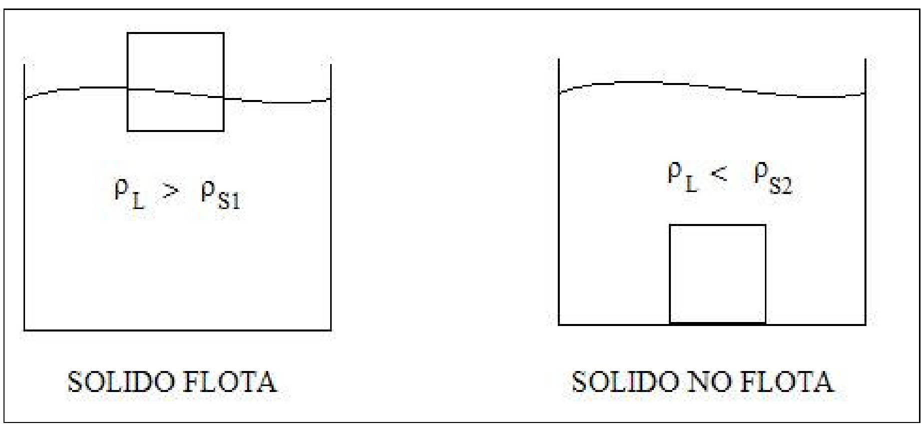

FIGURA 1

A continuación vamos a plantear el problema del deshielo de un bloque de hielo de agua dulce sobre un fluido de densidad cualquiera, de manera que sólo tendremos que resolver un caso general y más adelante podremos sustituir valores concretos de densidades, volúmenes etc., a fin de establecer ejemplos que nos muestren los aumentos del volumen esperados para así poder estudiar experimentos caseros que nos muestren los verdaderos efectos del calentamiento global, si es que los hay, o si es que podemos apreciarlos en nuestra casa.

NOMENCLATURA

Vamos a establecer la nomenclatura, esto es, los nombres que vamos a dar a las variables en juego en nuestro planteamiento del problema. En la siguiente figura podemos ver la situación del problema. Llamamos volumen sumergido del sólido en el fluido como V_{sum}, por otro lado llamamos ρ_S a la densidad del sólido. Cuando el sólido se derrite ocupa por lo general otro volumen ya que su densidad en estado líquido es distinta, llamada ρ_{S-L}. El volumen que ocupa el sólido una vez derretido lo llamamos V_{S-L}. La densidad del fluido la llamamos ρ_L y al volumen total del sólido le llamamos V_S.

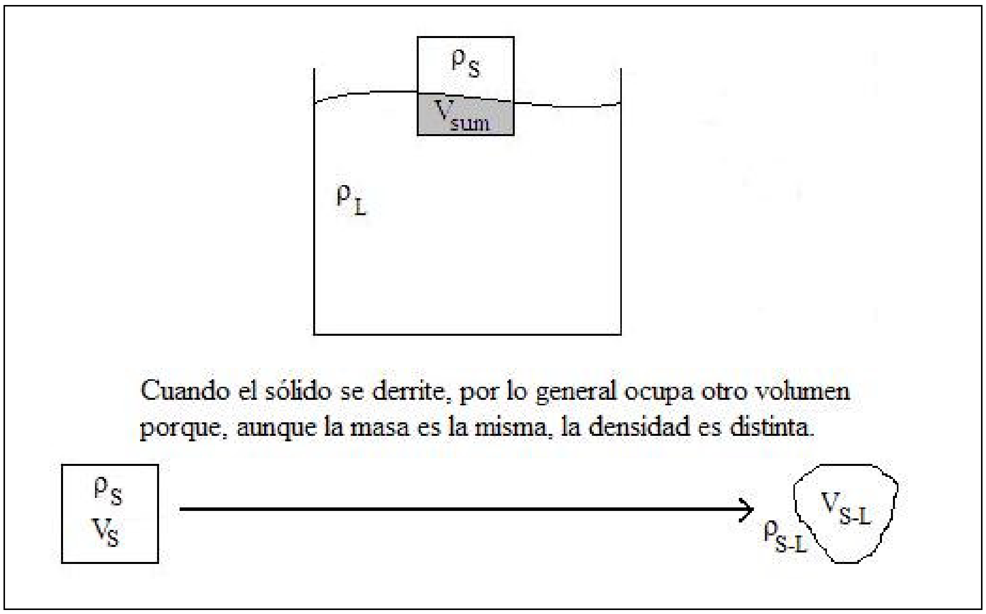

FIGURA 2

Para no usar constantemente un número excesivo de ecuaciones usaremos la expresión $\rho \cdot V$ cuando queramos referirnos a una masa de densidad ρ que ocupa un volumen V. La densidad y el volumen podrán corresponder a cualesquiera de las variables en juego en cada caso. Este tratamiento está basado en la definición de la densidad que se le otorga a cualquier cuerpo: $\rho = m/V \rightarrow m = \rho \cdot V$.

Ahora ya podemos considerar un bloque de hielo flotando en reposo sobre el fluido, de manera que el peso del sólido es igual al empuje que realiza sobre él el fluido, según el principio de Arquímedes.

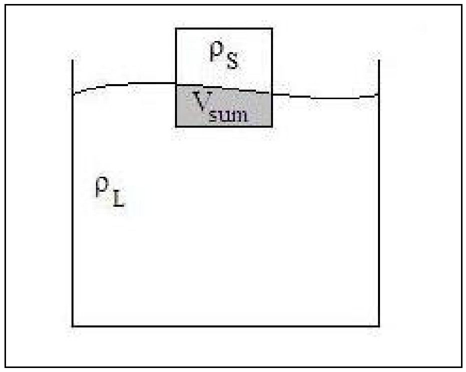

FIGURA 3

$$\rho_S \cdot V_S \cdot g = \rho_L \cdot V_{sum} \cdot g \qquad (1)$$

Fijémonos que hemos igualado la fuerza peso de todo el bloque sólido ($\rho_S \cdot V_S \cdot g$) al empuje que siente el mismo ($\rho_L \cdot V_{sum} \cdot g$), ya que si estas fuerzas no fuesen iguales el bloque no estaría en reposo flotando, ya que la fuerza resultante no sería nula e implicaría que el sólido se estaría acelerando en alguna dirección y por hipótesis el sólido flota en reposo.

Por otro lado fijémonos que hemos escrito el empuje como el peso de una masa igual a ($\rho_L \cdot V_{sum}$). Esta masa es la masa de fluido equivalente al volumen desalojado por el sólido sumergido, ya que el empuje *"es igual al peso de la cantidad de fluido* ***desalojada*** *por el sólido."* Obsérvese que el volumen es justo el volumen sumergido por el sólido en el fluido, pero la densidad es la del fluido. Había un científico muy conocido que, llegado a un punto a lo largo de sus disquisiciones en que no era nada fácil entender lo que escribía, decía a sus lectores: "*No sigas leyendo, querido lector, hasta concederme esto plenamente convencido"*

Sigamos adelante con la ecuación (1) bien presente, a la cual le podemos eliminar la g dividiendo ambos miembros de la igualdad por g. Entonces obtenemos:

$$\rho_S \cdot V_S = \rho_L \cdot V_{sum} \qquad (2)$$

Ahora vamos a escribir la ecuación que nos muestra la conservación de la masa, ya que la masa del sólido y la del sólido en estado líquido una vez se ha derretido, es la misma.

$$\rho_{S-L} \cdot V_{S-L} = \rho_S \cdot V_S \qquad (3)$$

Si usamos esta igualdad para sustituir el miembro de la izquierda de la ecuación (3) por el término de la izquierda de la ecuación (2), tenemos

$$\rho_{S-L} \cdot V_{S-L} = \rho_L \cdot V_{sum} \tag{4}$$

Llamamos $\Delta V = V_{S-L} - V_{sum}$ al incremento de volumen que se producirá cuando el sólido se derrita, ya que el nivel del fluido del vaso aumentará o disminuirá según lo hace el volumen del bloque sólido una vez derretido con respecto al volumen sumergido que desalojaba cuando el bloque flotaba sobre el fluido. Obsérvese que ΔV puede ser incluso negativo, lo que indicaría que el nivel del fluido en el recipiente (vaso o cubeta) ¡puede incluso llegar a disminuir! A continuación vamos a hallar ΔV con las ecuaciones tan sencillas que hemos usado hasta ahora.

Tomamos la ecuación (4) y restamos a ambos lados de la ecuación la cantidad $\rho_{S-L} \cdot Vsum$

$$\rho_{S-L} \cdot V_{S-L} - \rho_{S-L} \cdot V_{sum} = \rho_L \cdot V_{sum} - \rho_{S-L} \cdot V_{sum} \tag{5}$$

Sacamos factor común ρ_{S-L} a la izquierda de la ecuación (5) y V_{sum} a la derecha de la misma, con lo que obtenemos

$$\rho_{S-L} \cdot (V_{S-L} - V_{sum}) = V_{sum} \cdot (\rho_L - \rho_{S-L}) \tag{6}$$

Teniendo en cuenta que a la izquierda de la ecuación (6) tenemos la definición misma de ΔV podemos despejar y obtenemos

$$\boxed{\Delta V = \frac{(\rho_L - \rho_{S-L})}{\rho_{S-L}} \cdot V_{sum}} \tag{7}$$

Esta expresión ya nos está marcando el incremento de volumen que se producirá en un recipiente donde hagamos el experimento de poner a flotar un bloque de hielo sobre un fluido. Sin embargo podemos rescribir la última ecuación de una manera más sencilla todavía, ya que, por lo general, nadie puede medir de manera fácil el volumen sumergido de un sólido en flotación sobre un fluido. Para ello usamos una ecuación bien conocida que nos dice cuál es el volumen del sólido sumergido en un fluido en función de las densidades del líquido y del sólido, y del volumen total del bloque sólido:

$$V_{sum} = \frac{\rho_S}{\rho_L} \cdot V_S \tag{8}$$

Lo cual indica que el volumen sumergido de un sólido en el seno de un fluido es igual al cociente entre la densidad del sólido y el fluido multiplicado por el volumen total del sólido. Esta última expresión es la que se usa para justificar la afirmación de que un iceberg tan sólo asoma por encima del nivel del mar un 10% del volumen total del bloque de hielo gigante que lo forma. El 90% restante del volumen del bloque permanece sumergido, por lo que la expresión de que muchas veces tan sólo vemos la punta del iceberg de un problema está plenamente justificada en base a estos cálculos. Sólo habría que sustituir las densidades del hielo y del agua de mar en la ecuación (8) tomando los datos que aparecen más abajo en la tabla 2.

Si sustituimos la última expresión (8) en la ecuación (7) encontramos una expresión más adecuada para ΔV:

$$\boxed{\Delta V = \frac{(\rho_L - \rho_{S-L})}{\rho_{S-L}} \cdot \frac{\rho_S}{\rho_L} \cdot V_S} \qquad (9)$$

Tomemos unos cuantos valores reales para la expresión (9) y observemos qué pasa según diversos casos que presentamos en las tablas siguientes.

Estudiemos el caso en que tenemos un cubito de hielo de volumen V_S cualquiera, formado por la congelación de agua pura (agua destilada) flotando sobre agua pura líquida. Vemos que como ρ_L y ρ_{S-L} son iguales, no importa cuán grande sea el volumen del sólido flotando sobre el agua, ya que el numerador de la expresión (9) siempre será nulo.

ρ_S (Hielo puro)	ρ_{S-L} (Agua pura)	ρ_L (Agua pura)	V_S	ΔV
$0{,}92 \cdot 10^3$ kg/m^3	$1{,}00 \cdot 10^3$ kg/m^3	$1{,}00 \cdot 10^3$ kg/m^3	Cualquiera	0

TABLA 1

En este caso, efectivamente, nunca veríamos un incremento del nivel del fluido sobre el recipiente donde estuviera contenido, sin embargo estudiemos ahora el caso en que tenemos un bloque de hielo formado por agua pura congelada flotando sobre agua salada. Sabemos que la densidad del agua salada es mayor que la del agua dulce, por ello en el mar flotamos mejor que en el río o en una piscina. La concentración media de sales en los océanos es de unos 35 gramos por litro de agua. Sin embargo la densidad depende bastante de la temperatura. Poniéndonos en el peor de los casos, supongamos[1] que la densidad del mar en su superficie es de unos 1.027 kg/m^3 en lugar de suponer que es de 1.035 kg/m^3. Con este dato podemos estudiar la siguiente tabla en la que incluimos diversos valores del volumen del cubito de hielo que podríamos considerar:

ρ_S (Hielo puro)	ρ_{S-L}(Agua pura)	ρ_L(Agua salada)	V_S	ΔV
$0{,}920 \cdot 10^3$kg/m^3	$1{,}000 \cdot 10^3$kg/m^3	$1{,}027 \cdot 10^3$ kg/m^3	1 m^3	0,024 m^3
			0,001m^3 = 1 dm^3	$24 \cdot 10^{-6}$ m^3=24 cm^3
			10^{-6} m^3 = 1 cm^3	$24 \cdot 10^{-9}$ m^3=24 mm^3

TABLA 2

Observemos que para un bloque de hielo de 1 m^3 (equivalente a unos 1000 litros de agua congelada) se produce un aumento del nivel del mar de 0,024 m^3 = 24 dm^3 ≡ 24 Litros. **¡Ojo con el paso de las unidades de volumen al comprobar los resultados!**

Para el caso de un cubito de hielo de 0,001 m^3 = 1 dm^3 = 1L flotando en una cubeta de agua salada, observaríamos tan sólo un aumento en el volumen del nivel de las aguas de unos **24 cm^3**, lo que equivale a **24 mL (mililitros)**.

[1] Información extraída del URL: http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Water/density.sp.html

Para el último caso hemos supuesto un bloque de hielo de un centímetro cúbico (un poco más pequeño que un cubito normal de los que usamos para los vasos, pero no mucho menor) encontramos un aumento en el volumen de unos 24 mm^3, lo que equivale a ***¡¡0,024 mililitros en el aumento del volumen de un vaso de agua típico de casa!!***

Seguramente nadie en su casa podrá apreciar un aumento tan pequeño del volumen para bloques de hielo tan pequeños como los que podemos construir en nuestras casas. Tengamos en cuenta que el volumen de hielo que flota en los océanos no es de 1 m^3, ni de unos miles de m^3, sino de millones y millones de hectómetros cúbicos de agua dulce congelada en los polos del planeta.

Sin embargo a mucha gente se le suele escapar el hecho de que lo peor sobre el cambio climático no son los millones de hectómetros cúbicos de hielo que representan los icebergs de los polos y que pueden derretirse, sino los glaciares que descansan sobre tierra firme o la capa de hielo que existe sobre la Antártida. Ese hielo no está flotando actualmente sobre el océano, sino que está sustentado por la capa continental, luego representaría un volumen añadido sobre el océano si llegara a fundirse. La capa de hielo que existe en la Antártida puede llegar a más de un kilómetro de anchura en algunas partes de la misma. Sería un buen ejercicio calcular todo el volumen de hielo que podría llegar a derretirse y contribuir a elevar el nivel de los océanos para calcular la subida del nivel del mar en todo el planeta. Tal vez obtendríamos los datos que algunos científicos ya han calculado y creeríamos de verdad en una sola de las causas que hacen urgente la lucha contra el cambio climático... . O quizá ya sea hora de irse a vivir a la montaña, a 1000 metros de altitud, a ver cómo se van formando nuevas playas.

No quisiera terminar sin dar mi palabra de que este trabajo no está realizado con ninguna finalidad económica o lucrativa ni bajo ninguna coacción de ningún grupo social ni asociación, ni está sufragado en parte o totalmente con capital público o privado, sino más bien ha sido creado con la finalidad de crear una sana actitud crítica en el lector que quiera averiguar lo que hay de verdad ante un tema tan conocido pero tan poco entendido por la mayor parte de la población como es el del cambio climático.

Todas las sugerencias, críticas, contribuciones, dudas, correcciones y/o apoyos serán bienvenidos:

fransoro@alumni.uv.es