

**INSTITUTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y
AMBIENTAL**

**CÁTEDRA DE POSGRADO “HIDRÁULICA APLICADA A LA INGENIERÍA
SANITARIA”**

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

CÁTEDRA DE GRADO “HIDRÁULICA GENERAL”

**LAS PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL AGUA
MÁS RELEVANTES Y REFLEXIONES SOBRE LA
VARIACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA EN
FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**

**AUTOR: ING. LUIS PÉREZ FARRÁS
REVISIÓN Y SUGERENCIAS: ING. JUAN MIGUEL MARCET**

LAS PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL AGUA MÁS RELEVANTES Y REFLEXIONES SOBRE LA VARIACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Nota preliminar: El autor agradece la revisión del artículo y las sugerencias y consejos para su perfeccionamiento, por parte del Profesor Ing. Juan M. Marcet, Secretario del Departamento de Hidráulica de la FI UBA.

1.- GENERALIDADES Y OBJETIVOS

El objetivo central del artículo es el de destacar las **propiedades del agua** y sobre todo aquella que tiene que ver con su **masa específica o densidad**, que la convierte en una sustancia **tan especial** a los efectos de sostener la vida tal como la conocemos en el planeta.

Entiendo es interesante, antes de llegar al objetivo enunciado realizar una síntesis de las propiedades físicas de los líquidos, encaradas desde el punto de vista netamente ingenieril. La síntesis de referencia constituye el marco adecuado de conceptos relacionados con el objetivo central.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS

La clasificación está relacionada con la estructura molecular de la sustancia y más precisamente con la relatividad de la mayor ó menor cercanía de las moléculas. En termodinámica cada estado homogéneo de la materia se entiende por fase. Los estados sólido, líquido y gaseoso de una sustancia pura representan otras tantas fases.

Sin pretender entrar en detalles científicos, se puede decir que en el estado sólido las moléculas están colocadas bajo una forma compacta, en un orden determinado (formando cristales). Para el estado líquido, aunque las moléculas se mueven desordenadamente hay entre ellas relaciones de las cuales depende su posición, mientras que en el estado gaseoso el movimiento es caótico y la interdependencia molecular es sumamente débil.

El estudio de los estados de la materia es abarcado en numerosas especialidades. En especial para muchas aplicaciones de la Ingeniería el interés básico es relacionar las sollicitaciones con las deformaciones, es decir vincular **las sollicitaciones a la tracción y compresión, con las deformaciones que tienen lugar por la acción de las mismas.**

Existen dos leyes básicas de la atracción y repulsión de moléculas, que sin analizar con profundidad científica tomamos como verdades en la que apoyamos nuestras conclusiones como Ingenieros.

En apretada síntesis decimos que cuando un sólido es sometido a un esfuerzo de tracción, las fuerzas de atracción molecular en los cristales que forman al sólido, tienden a oponerse fuertemente a la separación de las moléculas, por ello se requieren grandes esfuerzos de tracción, para producir pequeñas deformaciones.

Cuando el esfuerzo es de compresión aparecen grandes fuerzas de repulsión que se oponen fuertemente al acercamiento de las moléculas. En apretada síntesis podemos decir que las sustancias sólidas poseen características de rigidez, tanto a las sollicitaciones Normales como Tangenciales, tienen consecuentemente una forma, límites y volúmenes definidos y sus deformaciones son muy pequeñas frente a los grandes esfuerzos en ambos sentidos.

Resulta difícil producir movimiento relativo entre moléculas de un sólido, y la resistencia de materiales indica que en el denominado período “*elástico*” existe una relación entre tensiones y deformaciones (ley de Hooke). Si se lo altera dentro de esos límites por acción de una fuerza exterior tiende a volver a su forma y tamaño original.

En cambio las Sustancias Líquidas difieren de las sólidas por su falta de rigidez, pero la existencia de cierta cohesión molecular en el sentido de los esfuerzos normales de compresión le permite adoptar la forma del recipiente que lo contiene y además formar una superficie libre. **En reposo**, pueden resistir esfuerzos de compresión en forma **cualitativamente** similar a como lo hace el sólido, en cambio, no ofrecen resistencia a los esfuerzos tangenciales o de corte.

Las Sustancias gaseosas carecen de rigidez y volumen definidos. Una cantidad dada de gas, cualquiera sea el peso ó numero de moléculas presentes, toma exactamente la forma y el volumen del recipiente que lo contiene. Siempre lo llena completo, cualquiera sea el mismo. En resumen presentan escasa resistencia a los esfuerzos normales y tangenciales.

Estas tres formas, estados o fases son funciones de la temperatura. **Toda sustancia sólida está congelada**, si se eleva la temperatura hasta un determinado punto (distinto para cada sustancia), esta se funde convirtiéndose en líquido. Si la temperatura del líquido sigue aumentando, entrará en ebullición y más allá de ese punto se encontrará en estado gaseoso.

Además la temperatura a la cual se produce la transición depende directamente de la presión aplicada a la sustancia, a mayor temperatura mayor. Sin embargo, cuanto mayor es la presión menor es el calor necesario para el cambio de fase, aunque el efecto de la presión es mucho más grande sobre el punto de ebullición-condensación que sobre el de fusión-solidificación.

3. CONCEPTOS Y DEFINICIONES DE INTERÉS PARA EL OBJETIVO DEL ARTÍCULO

3.1.- PARTÍCULA FLUIDA Y MEDIO CONTINUO

En las aplicaciones comunes de la ingeniería se considera al fluido, no como un conglomerado de moléculas, sino como un “*continuo*” esto es una distribución de materia sin espacios vacíos. Es una interpretación macroscópica de cómo percibimos a la sustancia, pues es conocido que en realidad la materia, al nivel atómico, es más espacio

que masa. Esta concepción práctica es de gran utilidad para las aplicaciones tecnológicas.

Se define “*partícula fluida*” a aquella porción de fluido que es lo suficientemente grande para que se manifiesten las propiedades físicas de la sustancia sin que se pierda su identidad, pero lo suficientemente pequeña como para que se pueda aplicar en ella el análisis matemático.

Con este concepto se define en forma más precisa a un “*medio continuo*” como... “ la sucesión de partículas en contacto mutuo, sin choque entre ellas que conservan las propiedades del fluido y que siguen las leyes del movimiento del conjunto, las que resultan de las acciones que ejercen las moléculas que las constituyen...”. **Obviamente el reposo es un caso particular en las que las partículas no se mueven entre si y todo el continuo constituye una masa homogénea e isotrópica.**

3.2.- MASA ESPECÍFICA O DENSIDAD

Como la propiedad distintiva del agua a ser más destacada en el presente artículo es la masa específica o densidad (según los distintos autores), se definirá a continuación a la misma con cierta precisión.

Si se considera un volumen $\Delta\tau$ de un medio continuo, ocupado por una masa ΔM , la masa específica o densidad ρ se define:

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow d^3} \frac{\Delta M}{\Delta\tau} = \frac{dM}{d\tau}$$

Se debe notar que en la anterior se considera en realidad un concepto físico de derivada, ya que matemáticamente el límite debería tender a cero, pero atendiendo a nuestra definición de partícula esto no es posible.

El valor “*d*” **representa la distancia mínima que asegura el mantenimiento de la identidad de la sustancia.** Es un argumento sutil para conciliar la realidad con el concepto matemático de derivada. Obviamente los valores de “*d*” pueden considerarse prácticamente cercanos a 0 desde el punto de vista matemático, pero por otra parte lo suficientemente grande desde el punto de vista físico (más espacio que materia) para no entrar al nivel atómico y mantenernos dentro del concepto de conjunto de moléculas que mantienen la identidad de la sustancia. .

Si la misma es homogénea, isotrópica, uniforme e incompresible, entonces $\rho = cte$, por consiguiente:

$$M = \int_{\tau} \rho \Delta\tau = \rho\tau$$

Finalmente

$$\rho = \frac{M}{\tau}$$

La anterior implica que la densidad es la masa de la unidad de volumen. La Masa específica o densidad, varía con la temperatura y en menor medida con la presión

Nota: En el sistema técnico, la masa específica del agua es aproximadamente

$$\rho = 102 \frac{K_{gf} s^2}{m^4}$$

3.3.- PESO ESPECÍFICO

Dada la íntima relación entre la masa específica y el peso específico, concepto mucho más difundido y conocido que el primero, se desarrolla el mismo a continuación.

Si se adopta un volumen $\Delta\tau$ del medio continuo y considerando el peso de ese volumen ΔG , se tiene el peso específico γ a través de la siguiente relación:

$$\gamma = \lim_{\Delta\tau \rightarrow d^3} \frac{\Delta G}{\Delta\tau}$$

Obviamente “d” cumple las mismas condiciones anteriores. Si ahora se supone un fluido homogéneo, isótropo e incompresible entonces $\gamma = cte.$, consecuentemente:

$$G = \int_{\tau} \gamma \Delta\tau = \gamma\tau$$

Por lo que

$$\gamma = \frac{G}{\tau}$$

y cómo

$$G = Mg$$

Resulta

$$\gamma = \frac{M}{\tau} g = \rho g$$

En la práctica de las aplicaciones tecnológicas como las que nos ocupan, se adopta:

$$g = 9,81m/seg^2$$

Si se consideran los valores usuales de ρ y g , se obtiene para el **peso específico**

del agua la conocida dimensión del sistema técnico:

$$\gamma = 102 \frac{\text{Kg}_f \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cong 1000 \frac{\text{Kg}_f}{\text{m}^3}$$

3.4.- MASA ESPECÍFICA O DENSIDAD RELATIVA

La Masa específica relativa o densidad relativa (δ) de un líquido o de un sólido es gran utilidad en la industria y por resultar del cociente entre las propiedades desarrolladas previamente se la trata a continuación.

Es por definición la relación entre el peso específico de la sustancia y el peso específico del agua destilada (a 4 °C y a nivel del mar) o también entre la masa específica de la sustancia y la del agua destilada en las mismas condiciones, lo que se deduce claramente de considerar el cociente entre ambas en la que “g” es simplificada. En efecto:

$$\delta = \frac{\rho_s}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{\text{agua}}} = \frac{\rho_s \text{ g}}{\rho_{\text{agua}} \text{ g}}$$

Evidentemente por la propia definición, se deduce que es una magnitud adimensional y se la conoce simplemente con un número.

4.- PROPIEDADES GENERALES MÁS COMUNES DE LOS FLUIDOS

- 1-Movilidad: no tienen forma propia, la misma depende de la gravedad y del recipiente que lo contiene.
- 2-Isotropía: las propiedades se manifiestan en cualquier dirección en forma idéntica.
- 3-Los líquidos oponen gran resistencia a los esfuerzos de compresión, no siendo así para los esfuerzos tangenciales. Es decir que presentan una muy elevada resistencia a los esfuerzos que tiendan a disminuir su volumen, pero a su vez, es muy baja su resistencia a los cambios de forma.
- 4-Los gases ofrecen poca resistencia tanto al cambio de volumen como de forma.

5.- CONCEPTOS Y PROPIEDADES DEL AGUA MÁS COMUNES Y TRASCENDENTES Y EL AGUA DULCE EN LA NATURALEZA

5.1.- CONCEPTOS GENERALES

Hasta el siglo XVIII se consideraba que el agua era un elemento. El químico inglés Cavendish sintetizó agua a partir de una combustión del oxígeno e hidrógeno del aire. Años más tarde, Lavoisier propuso que el agua no era un elemento sino un compuesto

formado por oxígeno y por hidrógeno, siendo su fórmula química la archiconocida H_2O .

El agua es el único elemento en abundancia sobre la tierra que se puede presentar en los tres estados, siendo esta propiedad relevante y fundamento de la existencia de la vida en el planeta, puesto que da lugar al “ciclo hidrológico del agua en la naturaleza”.

Es el componente más abundante en la superficie terrestre dado que ocupa nada menos que un 70 % de la misma.

El agua dulce se renueva gracias a la atmósfera que dispone de un volumen equivalente a unos 12.900 km³ de agua en forma de vapor, nubes, nieblas, etc. Es un volumen cambiante constantemente, pues se incrementa en las formas antedichas y disminuye en forma de precipitaciones en un equilibrio dinámico del denominado ciclo hidrológico del agua en la naturaleza, tan particular de nuestro planeta.

Se estima que el volumen anual en forma de agua de lluvia y parte en nieve es de unos 120.000 km³ en el mundo e implican la renovación constante y vital de los recursos de agua dulce. El 68,7% de la misma en el mundo está en los glaciares y mantos de hielo. Y no se los consideran como recursos hídricos por ser inaccesibles. Son los hielos de la Antártida el Ártico y Groenlandia. Por otra parte los glaciares continentales son fundamentales para los recursos hídricos renovables de muchos países.

Las aguas superficiales engloban los lagos, embalses, ríos y humedales y constituyen solamente el 0,3% del agua dulce del planeta. Su importancia tan trascendente se debe al hecho de que representan nada menos que el 80% de las aguas dulces renovables anualmente.

El agua subterránea dulce almacenada en los acuíferos subterráneos constituye el 96% del agua dulce al estado líquido de todo el planeta, Su importancia radica en que se estima que las captaciones de aguas subterráneas para el abastecimiento de poblaciones suponen entre un 25 y un 40% del agua potable total para el consumo humano. La mitad de las grandes ciudades del mundo dependen de ellas. Es una forma de abastecimiento de agua naturalmente de buena calidad en general y de bajo costo.

5.2.- PROPIEDADES DEL AGUA:

5.2.1.- Físicas

El agua es un líquido inodoro e insípido. Tiene un cierto color azul cuando se concentra en grandes masas. A la presión atmosférica (760 mm de mercurio), el punto de fusión del agua pura es de 0°C y el punto de ebullición es de 100°C, cristaliza en el sistema hexagonal, llamándose nieve o hielo según se presente de forma esponjosa o compacta.

Se expande al congelarse, es decir aumenta de volumen, de ahí que la densidad del hielo sea menor que la del agua y por ello el hielo flota en el agua líquida. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4°C, que es de 1g/cc. Las consecuencias de ésta última propiedad física tan distintiva serán tratadas más adelante.

Su capacidad calorífica es superior a la de cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 1 cal/g, esto significa que una masa de agua puede absorber o desprender grandes cantidades de calor, sin experimentar cambios sensibles de temperatura. Ésta propiedad tiene gran influencia en el clima puesto que las grandes masas de agua de los océanos tardan más tiempo en calentarse y enfriarse que el suelo terrestre. Sus calores latentes de vaporización (595 cal/g) y de fusión (79,5 cal/g), ambos a presión normal son también excepcionalmente elevados.

Vale un ejemplo para evidenciar la magnitud de estas energías. En efecto, como 1 Kcal equivale a 427 kgrm, resulta que al calentar 1 kg de agua de 0°C a 100°C le estamos suministrando igual energía a la necesaria para elevar esa masa a una altura de 42.700 m, es decir aumentar su energía potencial en 42.700 kgrm .

5.2.2.-Químicas

El agua es el compuesto químico más familiar para nosotros, el más abundante y el de mayor significación para nuestra vida. Su excepcional importancia, desde el punto de vista químico, reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza y no solo en organismos vivos, así como los que se llevan a cabo en el laboratorio y en la industria, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua. Normalmente se dice que el agua es el disolvente universal, puesto que todas las sustancias son en mayor o menor grado solubles en ella.

No posee propiedades ácidas ni básicas, combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas.

La atracción entre las moléculas de agua tiene el poder suficiente para producir un agrupamiento de moléculas. La fuerza de atracción entre el hidrógeno de una molécula con el oxígeno de otra es de tal magnitud que se puede incluir en los denominados enlaces de *punte de Hidrógeno*. Estos enlaces *punte de Hidrógeno* son los que dan lugar al aumento de volumen del agua sólida.

6.- DILATACIÓN DEL AGUA AL ENFRIARSE

El agua pasa del estado líquido al sólido, y por tanto se convierte en hielo, Al enfriarse desde los casi 4°C hasta el punto de congelamiento. Esto permite que los océanos, los lagos y los ríos se congelen empezando por la superficie, y la capa de hielo que se forma proteja a los seres vivos que habitan dichas aguas. El agua del fondo queda resguardada del frío exterior, presentando temperaturas de entre 4 y 5° C, lo que permite la supervivencia de ciertas, especies, esto lo saben también los esquimales y se aprovechan de ello para construir sus Iglúes.

La capacidad del agua para actuar como disolvente universal es la responsable de dos importantes funciones del agua en los seres vivos:

- a) Es el medio donde se producen las reacciones del metabolismo celular
- b) Constituye la base de los dos sistemas de transporte de nutrientes y de productos de desecho más extendidos entre los seres vivos: la sangre en animales y la savia

en las plantas superiores

El agua hierve a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la presión atmosférica y a nivel del mar, pero lo hace a temperaturas inferiores a medida que la presión disminuye. **El agua es una de las pocas sustancias que flota al transformarse en sólido.**

Ésta última propiedad es decididamente excepcional dado que por regla general toda sustancia, sea líquida, gaseosa o sólida se contrae ó disminuye su volumen al enfriarse. El agua no constituye excepción a esta regla dentro de un amplio rango de temperatura. Partiendo de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto en el cual se condensa el vapor, hasta llegar a los $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ el volumen disminuye en forma continua. **Al llegar a ese punto el proceso se invierte comenzando a dilatarse desde los casi $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en forma gradual.**

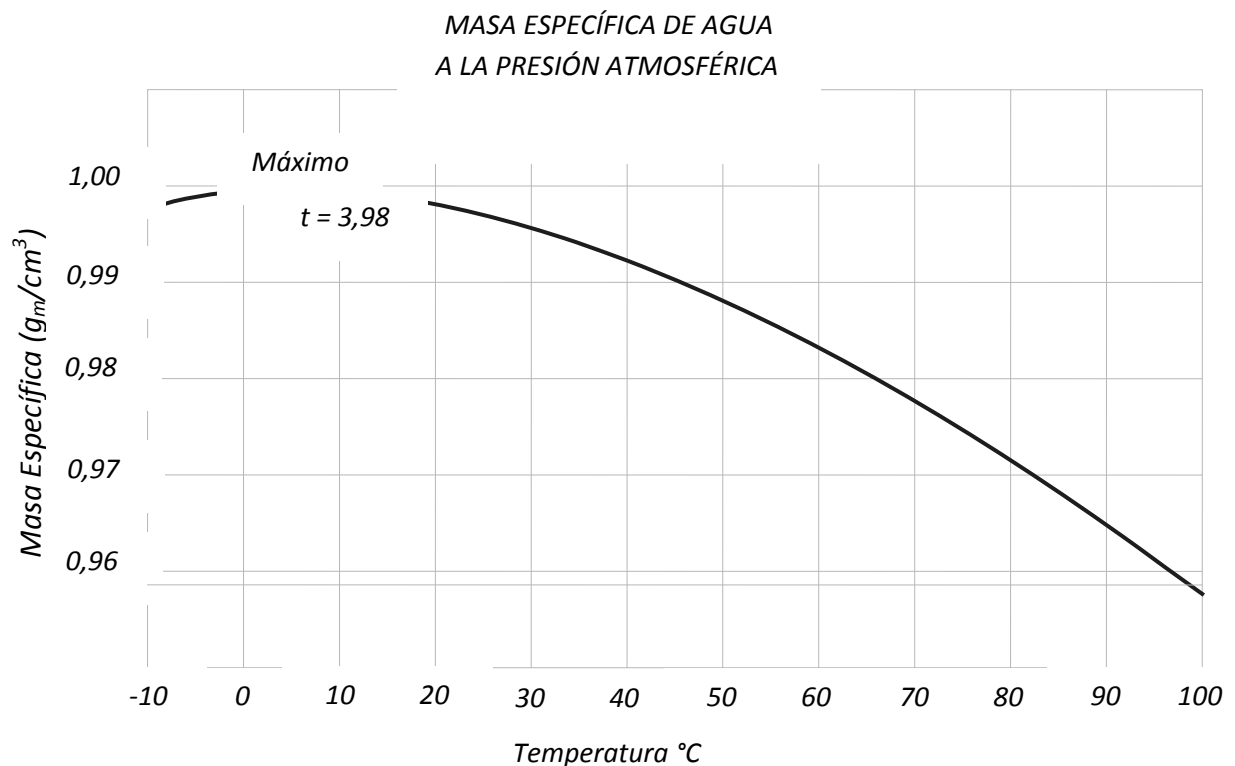


Figura
Masa Específica del agua en función de la temperatura

En la figura previa se puede apreciar gráficamente el concepto de referencia, pues claramente se observa que la masa específica o densidad del agua, disminuye, por lo tanto se dilata, entre los casi 4 grados y el punto de congelamiento.

Como se ha señalado ésta es una propiedad distintiva del agua la que disminuye su masa específica cuando se calienta por sobre los aproximadamente $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y también

lo hace cuando se enfría entre esa temperatura y casi el punto de congelamiento.

Luego de los 0°C hasta el punto de congelación la dilatación es abrupta y drástica. Al congelarse para formar hielo, el agua aumenta su volumen en una onceava parte.

Sin entrar en detalles científicos, digamos que los enlaces “*punto de Hidrógeno*” son los que dan lugar al aumento de volumen del agua sólida y a las estructuras hexagonales de que se habló más arriba al referirnos sucintamente a las propiedades químicas del agua. Éste hecho tan distintivo permite que los océanos, los lagos y los ríos se congelen empezando por la superficie.

Ésta propiedad es determinante para la vida sobre la tierra al menos en la forma que la conocemos, pues la capa de hielo que se forma protege a los seres vivos que habitan dichas aguas. El agua del fondo queda resguardada del frío exterior, presentando temperaturas de entre 4 y 5°C, lo que permite la supervivencia de ciertas especies, esto lo saben también los esquimales y se aprovechan de ello para construir sus Iglúes.

Imaginemos... ¿Qué sucedería si el hielo fuese más pesado que el agua líquida a medida que su temperatura descendiera por debajo de los 0 °C?.....

Lagos, ríos y mares se congelarían desde el fondo hacia la superficie y la parte principal de estas no llegarían a fundirse durante los meses de verano en los climas templados **y la configuración del clima y del tiempo, tal como la conocemos, sería imposible.**

La evaporación del agua sería mucho menor y por consiguiente serían menores las precipitaciones pluviales, el clima glacial sería mucho más abundante en la superficie del planeta y además disminuiría el efecto moderador del agua líquida y del vapor sobre el clima y el tiempo.

En resumen la existencia superabundante de agua en estado líquido en el planeta, con una parte menor en sus formas de hielo o vapor, es decir coexistiendo en los tres estados, es de vital importancia para la existencia de la vida tal como la conocemos.

Para considerar las excepcionales circunstancias que posibilitan la vida es de destacar que la Tierra está situada en el sistema solar en condiciones sutilmente adecuadas, puesto que si estuviésemos un poco más cerca del Sol , sólo en el orden de un 5%, ya sería prácticamente imposible la **coexistencia** de los tres estados del agua conocidos.

Ello es debido a que la masa de la Tierra genera una fuerza de gravedad que impide que los gases de la atmósfera se dispersen. En efecto el vapor de agua y el dióxido de carbono se combinan, causando lo que se ha dado en llamarse el **efecto invernadero**, responsable de la estabilidad de las temperaturas, actuando como una capa protectora de la vida en el planeta.

Si la Tierra estuviere en la posición actual con respecto al sol, pero fuese más pequeña, la menor gravedad ejercida sobre la atmósfera haría que ésta fuese más delgada, lo que redundaría en temperaturas extremas, evitando la acumulación de agua excepto en los casquetes polares (tal como ocurre en Marte). Si el planeta fuera bastante más grande, el agua que existiría sobre él permanecería en estado sólido incluso a altas temperaturas, dada la elevada presión causada por la gravedad.

Bibliografía

- Enciclopedia digital WILKIPEDIA
- Propiedades Físicas de los Fluidos- Pérez Farrás- Dante Dalmati- CEI (1988) y Páginas Web actuales; del Instituto de Postgrado de Ingeniería Sanitaria y de la Cátedra de Grado de Hidráulica General, ambas instituciones de la FIUBA