

Densidad del Agua

En diferentes aplicaciones metrológicas, el agua es usada ampliamente como patrón de referencia de densidad para las determinaciones de densidad y volumen. En este boletín de La Guía MetAs se presenta, como la densidad del agua puede ser calculada usando la fórmula descrita en el trabajo de Tanaka et al (2001).



AGUA (H_2O)

El agua es una sustancia que químicamente se formula como H_2O ; es decir, que una molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno enlazados covalentemente a un átomo de oxígeno.

Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El agua cubre el 71 % de la superficie de la corteza terrestre. El agua es un elemento común del sistema solar, hecho confirmado en descubrimientos recientes.

El agua es insípida e inodora en condiciones normales de temperatura y presión.

Apasionados por la Metrología

La Guía MetAs, es el boletín electrónico de difusión periódica de MetAs & Metrólogos Asociados.

En *La Guía MetAs* se presentan: noticias de la metrología, artículos e información técnica; seleccionada por nuestros colaboradores, que deseamos compartir con Usted, colegas, usuarios, clientes, estudiantes, amigos y en fin, con todos aquellos interesados o relacionados con la metrología técnica e industrial.

Calle: Jalisco # 313. Colonia: Centro
49 000, Cd. Guzmán, Zapotlán El Grande, Jalisco, México
Teléfono & Fax: 01 (341) 4 13 61 23 multi-línea
E-mail: laguiametas@metas.mx. Web: www.metas.mx

Servicios Metrológicos:

Laboratorio de Calibración:

Presión, Alto Vacío, Temperatura, Humedad, Eléctrica, Vibraciones, Masa, Densidad, Volumen, Óptica y Dimensional

Ingeniería:

Selección de Equipos, Desarrollo de Sistemas de Medición y Software, Reparación y Mantenimiento

Gestión Metrológica:

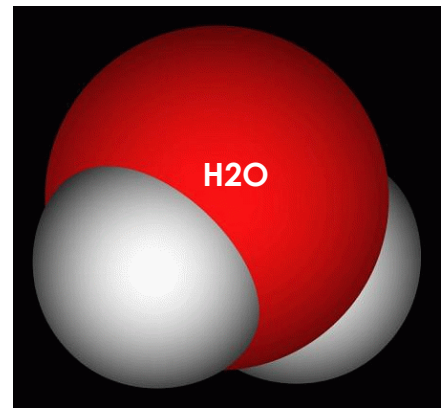
Subcontratación de Servicios, Outsourcing, Selección de Proveedores, Confirmación Metrológica

Consultoría:

Capacitación, Entrenamiento, Asesoría, Auditorías, Ensayos de Aptitud, Sistemas de Calidad

DENSIDAD DEL AGUA

La densidad del agua líquida es muy estable y varía poco con los cambios de temperatura y presión. A la presión normalizada de 101 325 Pa (1 atmósfera), el agua líquida tiene una densidad máxima 999,974 9 kg·m⁻³ a los 3,983 035 °C. Al subir la temperatura, disminuye la densidad (por ejemplo, a 20 °C tiene 998,206 7 kg·m⁻³ y a 40 °C alcanza una densidad de 992,215 2 kg·m⁻³. La temperatura de 3,983 035 °C representa un punto de inflexión y es cuando alcanza su máxima densidad (a la presión mencionada). A partir de ese punto, al bajar la temperatura, la densidad comienza a disminuir, aunque muy lentamente (casi nada en la práctica), hasta que a los 0 °C disminuye hasta 999,842 8 kg·m⁻³.



FÓRMULA M. TANAKA

FÓRMULA DE LA DENSIDAD DEL AGUA (M. TANAKA)

La densidad del agua de VSMOW desaireado a una presión atmosférica de 101 325 Pa y a una temperatura t expresado en términos de la ITS-90 es dada como:

$$p = a_5 \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 (t + a_2)}{a_3 (t + a_4)} \right] \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_1/^\circ\text{C} &= -3,983\,035 \pm 0,000\,67 \\ a_2/^\circ\text{C} &= 301,797 \\ a_3/^\circ\text{C} &= 522\,528,9 \\ a_4/^\circ\text{C} &= 69,348\,81 \\ a_5/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}) &= 999,974\,950 \pm 0,000\,84 \end{aligned}$$

La incertidumbre relativa de esta fórmula es de $1\cdot 10^{-6}$.

VIENNA STANDARD MEAN OCEAN WATER (VSMOW)

El agua natural se compone principalmente de isótopos de ¹H (hidrógeno-1) y ¹⁶O (oxígeno-16), pero hay también una pequeña cantidad de isótopos más pesados como ²H (hidrógeno-2, Deuterio). La cantidad de óxidos de deuterio del agua pesada es también muy reducida, pero afecta enormemente a las propiedades del agua.

El agua de ríos y lagos suele tener menos deuterio que el agua del mar. Por ello, se definió un patrón del agua según su contenido en deuterio: El VSMOW, o *Estándar de Viena del Agua del Océano Promedio*.



VSMOW, o Estándar de Viena del Agua del Océano Promedio, es un patrón del agua que define la composición isotópica del agua definido en 1968 por la Agencia Internacional de Energía Atómica. A pesar de la frase algo engañosa "Agua del Océano", VSMOW se refiere al agua (H_2O) y no incluye ninguna sal u otras sustancias que normalmente se encuentran en el agua de mar y se refiere al agua pura con una composición particular de los isótopos. VSMOW sirve como patrón de referencia para la comparación de las relaciones de isótopos de hidrógeno y oxígeno en muestras de agua natural. Estas composiciones isotópicas son usualmente expresados por diferencias relativas de la del VSMOW.

VSMOW

El agua muy pura, destilada de VSMOW también se utiliza para hacer mediciones de alta exactitud de las propiedades físicas del agua y para la definición de los patrones de laboratorio ya que se considera que sean representativos del "Agua del Océano Promedio", en efecto, representando toda el agua en la tierra.

VSMOW es una re-calibración del concepto original SMOW introducido por Harmon Craig y fue creada en 1967 y otros investigadores de la Institución Scripps de Oceanografía, que mezclaron aguas destiladas del océano recogidos de diferentes puntos del mundo.

COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL VSMOW

La composición isotópica del agua VSMOW se especifica como las relaciones de la abundancia del isótopo raro en cuestión, dividido por la de su isótopo más común y se expresa como partes por millón (ppm). Por ejemplo ^{16}O (el isótopo más común de oxígeno con ocho protones y ocho neutrones) es aproximadamente 498,7 veces más frecuente en el agua de mar que es ^{18}O (con dos neutrones adicionales). Las relaciones isotópicas del Deuterio y ^{18}O del agua de VSMOW se definen como sigue:

$$R_D(\text{VSMOW}) = {}^2H/{}^1H = D/H = 155,76 \pm 0,05 \text{ ppm (una razón de 1 parte por aproximadamente 6 420 partes).}$$

$$R_{18}(\text{VSMOW}) = {}^{18}O/{}^{16}O = 1\,993,4 \pm 2,5 \text{ ppm (una razón de 1 parte por aproximadamente 498,7 partes).}$$

ABUNDANCIA ISOTÓPICA

La mayoría de usuarios del agua como patrón de referencia de densidad confían en el agua de la llave o grifo (tap water) en lugar de VSMOW. Entonces a_5 debe ser cambiada en este caso, (Girard and Menaché).

$$a'_5 = a_5 + 0,233 \cdot 10^{-3} \delta^{18}O + 0,0166 \cdot 10^{-3} \delta D \quad (2)$$

Donde a'_5 es el parámetro modificado, y los valores de $\delta^{18}O$ y δD expresados en partes por mil (‰). son definidos por las relaciones isotópicas de un elemento en una muestra y se reporta como la desviación de una muestra relativa a un patrón como VSMOW:

$$\delta^{18}O = \left[R_{18}(\text{sample}) / R_{18}(\text{SMOW}) - 1 \right] \cdot 10^3 \quad (3)$$

y

$$\delta D = \left[R_D(\text{sample}) / R_D(\text{SMOW}) - 1 \right] \cdot 10^3 \quad (4)$$

Donde R_{18} es la relación de isótopos [^{18}O]/[^{16}O] de una muestra y R_D es la relación de isótopos $^2H/^1H$ o $[D]/[H]$ de una muestra .

Un valor de $a'_5 = 999,972 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ es a menudo asumido. Este valor fue encontrado por Chappuis para el agua de la llave.

Isótopos

^{18}O

y

2H o (D)

DISUELTO EN AIRE

La densidad del agua ha sido dada bajo el supuesto que el agua está libre del aire.

N. Bignell ha determinado la diferencia en densidad entre el agua libre de aire y agua saturada de aire. Entre 0 °C y 25 °C esta diferencia es descrita por la fórmula siguiente,

$$\Delta_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = s_0 + s_1 t \quad (5)$$

$$s_0 / (10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = -4,612 \quad (6)$$

y

$$s_1 / (10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{°C}^{-1}) = 0,106 \quad (7)$$

Disuelto en el
Aire
y
Compresibilidad

COMPRESIBILIDAD

La densidad del agua desaireada ha sido dada a una presión p de 101 325 Pa (1 atmósfera). El factor de compresibilidad para la densidad del agua usada a presiones diferentes es:

$$f_c = \left[1 + (k_0 + k_1 t + k_2 t^2) \cdot \Delta_p \right] \quad (8)$$

$$\Delta p / \text{Pa} = p / \text{Pa} - 101\,325 \text{ Pa}$$

$$k_0 / (10^{-11} \text{Pa}^{-1}) = 50,74$$

$$k_1 / (10^{-11} \text{Pa}^{-1} \text{°C}^{-1}) = -0,326$$

$$k_2 / (10^{-11} \text{Pa}^{-1} \text{°C}^{-2}) = 0,004\,16$$

EJEMPLO DE CÁLCULO DE DENSIDAD DE UNA MUESTRA DE AGUA

Para una muestra de agua con una composición isotópica de $\delta^{18}O = -9,5 \text{ ‰}$ y $\delta^2H = \delta D = -78 \text{ ‰}$ a la temperatura de $20,0 \text{ °C}$ y la presión atmosférica de $85\,000 \text{ Pa}$, se realiza el cálculo siguiente.

El valor de a_5 evaluado con la composición isotópica de la muestra de agua mencionada es:

$$a'_5 = a_5 + 0,233 \cdot 10^{-3} \delta^{18}O + 0,0166 \cdot 10^{-3} \delta D = 999,971\,44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

La densidad de la muestra de agua antes de correcciones debidas al aire disuelto y a la presión atmosférica.

$$p' = a'_5 \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 (t + a_2)}{a_3 (t + a_4)} \right] = 998,203\,24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Corrección debida al aire disuelto de la muestra de agua,

$$\Delta_p = s_0 + s_1 t = -2,49 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Factor de corrección debido a la diferencia de presión (presión normalizada de $101\,325 \text{ Pa}$ y la presión medida),

$$f_c = \left[1 + (k_0 + k_1 t + k_2 t^2) \cdot \Delta_p \right] = 0,999\,992\,5$$

El valor corregido de densidad de la muestra de agua es:

$$p = p' \cdot f_c + \Delta_p = 998,193\,27 = 998,193 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

La incertidumbre relativa de este resultado es de $\pm 0,010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

REFERENCIAS

Tanaka, M., Girard, G., Davis, R., Peuto, A., Bignell, N., [NMIJ, BIPM, IMG, NML], (2001) “Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports”, Metrologia, 2001, 38, n°4, pp. 301–309.

Bettin, H., Spieweck, F., “Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990”, PTB-Mitt. 1003/90, pp. 195–196.

Kenichi Fujii and Mitsuru Tanaka (2004) “Density Standard at NMIJ and Related Activities in the CCM WG on Density”, 14th International Conference on the Properties of Water and Steam in Kyoto, National Metrology Institute of Japan.