



DOI: 10.12461/21.05

# Estudio comparativo de la densidad del agua y su aplicación en el presupuesto de incertidumbre para calibraciones en volumen

Comparative study of the density of water and its application in the uncertainty budget for the volume determination

Estudo comparativo da densidade da água e sua aplicação no orçamento de incerteza para calibrações de volumen

RECIBIDO: 3/9/2020 → APROBADO: 6/11/2020 ✉ [asica@latu.org.uy](mailto:asica@latu.org.uy)

✉ SICA, ANDREA(1); PRESTE, SHEILA(1); ALMEIDA, GABRIEL(1); ESTEVES, ROMINA(1).  
(1) DEPARTAMENTO DE METROLOGÍA FÍSICA, LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY (LATU). MONTEVIDEO, URUGUAY.

## RESUMEN

Dentro de la magnitud volumen, el método de calibración de mejor precisión es el gravimétrico. Para la calibración se usa un líquido de densidad conocida. En este método, el líquido de calibración utilizado es el agua destilada, ya que tiene ampliamente estudiada la variación de la densidad con relación a la temperatura. Para los cálculos de volumen a la temperatura de referencia, se utiliza la densidad del agua destilada obtenida a partir del uso de modelos matemáticos como, por ejemplo, la ecuación de Tanaka (Tanaka, et al., 2001). Si bien existen requisitos para el agua destilada (grado 3) en la norma ISO 3696 (International Organization for Standardization, 1987), y el laboratorio debe realizar los estudios periódicos de conductividad del agua utilizada, es necesario estudiar el apartamiento del valor de la densidad real del agua destilada con el valor obtenido mediante el uso de la ecuación de Tanaka. Además, es importante determinar si se debe considerar este apartamiento del valor de densidad (calculado por el modelo de Tanaka y medido por densímetro de oscilación) en la estimación de incertidumbre en las calibraciones de volumen por método gravimétricos.

**PALABRAS CLAVE:** Tanaka, método gravimétrico.

## ABSTRACT

In the quantity of volume, gravimetric method is considered the best accuracy method for the quantitative determination of an analyte based on its mass. The distilled water is selected as calibration liquid because it is well known how its

density changes with temperature. For volume calculation at reference temperature, the water density value is obtained by known mathematic models, for example, Tanaka equation (Tanaka, et al., 2001). According to ISO 3696 (International Organization for Standardization, 1987), there are requirements for water (Grade 3), the lab needs to perform periodic studies of conductivity, but it is necessary to study the water density deviation and comparing this value with that obtained by Tanaka equation. If this deviation value (calculated by Tanaka Equation vs Oscillation – type density meter) is significant, it must be considered in the uncertainty estimation for volume calibration using gravimetric method.

**KEYWORDS:** Tanaka, gravimetric method.

## RESUMO

Dentro da magnitude volume, o método de calibração mais preciso é o gravimétrico. Um líquido de densidade conhecida é usado para calibração. Nesse método, o líquido de calibração utilizado é a água destilada, que tem a variação da densidade em relação à temperatura amplamente estudada. Para cálculos de volume na temperatura de referência, utiliza-se a densidade da água destilada obtida com o uso de modelos matemáticos como a equação de Tanaka (Tanaka, et al., 2001). Embora existam requisitos para água destilada (grau 3) na norma ISO 3696 (International Organization for Standardization, 1987), e o laboratório realiza estudos periódicos de condutividade da água utilizada, é necessário estudar o afastamento do valor da densidade real da água destilada com o valor obtido usando a equação de Tanaka. Além disso, é importante determinar se este desvio do valor de densidade (calculado pelo modelo de Tanaka e medido por densímetro de oscilação) deve ser considerado na estimativa da incerteza nas calibrações de volume pelo método gravimétrico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tanaka, método gravimétrico.

## INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Volumen del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), las calibraciones de material volumétrico se realizan utilizando el método gravimétrico. Para el caso del material volumétrico aforado o graduado, se calibra utilizando como referencia la norma ISO 4787 (International Organization for Standardization, 2010); mientras que para el material volumétrico accionado por pistón, se realiza la calibración mediante métodos basados en la ISO 8655-6 (International Organization for Standardization, 2002). Estas normas indican el uso de agua destilada grado 3 (de acuerdo con la norma ISO 3696, International Organization for Standardization, 1987) como líquido de calibración.

Para los cálculos de volumen de los materiales volumétricos, se necesita conocer el valor de la densidad del agua a la temperatura de calibración y con la masa contenida o entregada por el material. Tal es así que es necesario conocer el valor de densidad a la temperatura correspondiente con muy buena exactitud. Para ello pueden utilizarse varias ecuaciones que modelan la densidad del agua con respecto a la temperatura. En nuestro laboratorio se utiliza la ecuación de densidad propuesta

por el modelo de Tanaka (Tanaka, et al., 2001), el cual es el más utilizado por laboratorios pares. Esta ecuación se presenta a continuación:

$$\rho_{\text{agua}} = a_5 \left[ 1 - \frac{(t + a_1)^2 (t + a_2)}{a_3(t + a_4)} \right] F_c + C_{\text{ad}}$$

*Ecuación 1*

Donde:

$t$  es el valor de la temperatura del agua en  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F_c$  y  $C_{\text{ad}}$  son variables que dependen de la temperatura ( $t$ ) y/o de la presión ( $p$ );  $a_1 = -3,983\ 035\ ^{\circ}\text{C}$ ;  $a_2 = 301,797\ ^{\circ}\text{C}$ ;  $a_3 = 522\ 528,9\ ^{\circ}\text{C}^2$ ;  $a_4 = 69,348\ 81\ ^{\circ}\text{C}$ ;  $a_5 = 999,972\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

$F_c$  es el factor de corrección por compresibilidad cuya ecuación se presenta a continuación:

$$F_c = [1 + (k_0 + k_1 t + k_2 t^2)(p - p_0)]$$

*Ecuación 2*

Donde:

$p$  = presión atmosférica en Pa;  $p_0 = 101\ 325\ \text{Pa}$ ;  $k_0 = 50,74 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1}$ ;  $k_1 = -0,326 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $k_2 = 0,004\ 16 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-2}$ .

$C_{\text{ad}}$  es el factor de corrección por aire disuelto en el agua, se calcula de la siguiente manera:

$$C_{\text{ad}} = s_0 + s_1 \cdot t$$

*Ecuación 3*

Donde:

$s_0 = -4,612 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $s_1 = 0,106 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Se realiza la evaluación de los  $F_c$  para las presiones atmosféricas que se presentan en Uruguay, y se constata que este factor es despreciable tanto para el cálculo como para la incertidumbre dentro de los valores trabajados, por lo que no se lo tendrá en cuenta en los cálculos.

Si bien se realizan controles periódicos al agua destilada usada en el laboratorio de volumen, tanto de pH como de conductividad, es necesario conocer los apartamientos de la densidad real del agua con respecto a los valores de la densidad calculados con la ecuación de Tanaka.

La cuantificación de este apartamiento permite determinar si está comprendido en la incertidumbre por el uso de la ecuación de Tanaka o si debe ser considerado como una componente más del presupuesto de incertidumbre en la calibración de material volumétrico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Para el estudio comparativo se utilizan los siguientes equipos:

- Densímetro de oscilación, marca Anton Paar, modelo DMA 4500 M, serie 81600397. Este densímetro fue calibrado por el método de comparación, según los lineamientos establecidos en la guía SIM para la calibración de densímetros de tipo oscilatorios SIM MWG7/cg-02/v.00 (Sistema Interamericano de Metrología, 2016). Se utilizaron como patrones Materiales de Referencia Certificados; Polialfaolefina Certificado N° CNM-MR-730-0290/2019, de fecha agosto de 2019; y agua de Certificado N°C NM-MR-730-0330/2019, de fecha setiembre de 2019, emitidos por CENAM. El sensor de temperatura del densímetro fue calibrado con un termómetro de resistencia de platino estándar (ITS 90), trazable al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través del certificado PTB 7.4-1.1-12-63, del 25/04/2014.
- Patrón sólido de volumen, sinker de cuarzo, N° LATU 18381, calibrado por PTB según certificado 1.82-2017A028, del 07/12/2017.
- Soporte de platino para el patrón de volumen.
- Balanza analítica, capacidad: 200 g, división 0,1 mg (con posibilidad para pesada por debajo del platillo), N° LATU 5139, calibrada con patrones trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través del certificado BIPM N° 3, de enero de 2018.
- Termómetro Pt100, con división 0,02 °C, calibrado con un termómetro de resistencia de platino estándar (ITS 90), trazable al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través del certificado PTB 7.4-1.1-12-63, del 25/04/2014.
- Probeta con camisa conectada a baño termostatzado (caracterizado) para mantener la temperatura del agua destilada.
- Termohigrómetro digital, N° LATU 21805, calibrado con un termómetro de resistencia de platino estándar (ITS 90), trazable al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través del certificado PTB 7.4-1.1-12-63, del 25/04/2014.
- Termohigrómetro digital, marca Testo, modelo 608-H1 (N° LATU 36057), calibrado con un termómetro de resistencia de platino estándar (ITS 90), trazable al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través del certificado PTB 7.4-1.1-12-63, del 25/04/2014.
- Barómetro digital marca Omega, modelo DPI 740 (N° LATU 24765), calibrado con un barómetro trazable a patrones primarios según Certificado CNM-CC-720-576/2017, del 10/11/17, y BIPM N° 3, de enero del año 2018.

### Métodos

En una primera etapa de este estudio, se realiza la comparación de los resultados obtenidos de la medición de la densidad del agua destilada a 20 °C con tres métodos diferentes que se detallan a continuación:

- Medidas con el densímetro de oscilación de una muestra de agua destilada de uso del laboratorio a 20 °C.
- Cálculo de la densidad del agua destilada usando la ecuación de Tanaka a 20 °C.
- Medidas con el patrón sólido de volumen de la densidad del agua a 20 °C.

Se toma una muestra de 2000 ml de agua destilada y desionizada a 20 °C. Se reservan 100 ml de esta muestra (m1) para hacer la determinación de la densidad con la medición en el densímetro de oscilación. Con el agua destilada restante se completa el volumen de la probeta con camisa para la determinación de la densidad por pesada hidrostática. Para esta determinación se utiliza el procedimiento descrito a continuación:

-Se enciende el baño termostatzado con recirculación por la camisa del recipiente de calibración a la temperatura requerida, dos horas antes de comenzar las mediciones. Se verifica el valor del punto final alcanzado y la estabilidad de la temperatura con el termómetro de control. No debe existir una deriva superior a 0,02 °C en 15 minutos.

-Se ajusta la balanza analítica con su pesa interna y se verifica el ajuste con la pesa de verificación.

-Se toma el dato de presión ambiental y se registra.

-Se cuelga el soporte del patrón de volumen y se deja estabilizar su temperatura 10 minutos, luego de los cuales se tara la balanza.

-Se cuelga el patrón de volumen dentro del líquido utilizando el soporte.

-Se deja estabilizar la temperatura del patrón por 60 minutos, para que adquiera la temperatura del líquido.

-Se registra la temperatura del líquido.

-Se lee la balanza.

-Se retira el patrón del soporte y se lee la balanza para verificar derivas de cero.

-Se repiten los cinco pasos anteriores por lo menos 4 veces (promedio de las lecturas =  $L_{Bal}$ ).

-Se lee nuevamente la temperatura del líquido.

-Se verifica que la variación esté en tolerancia (no mayor a 0,03 °C).

Con los datos recabados se realiza el cálculo de la densidad del agua según la siguiente ecuación:

$$\rho_{liq,t_0} = \left[ \frac{m_p + \frac{\pi D \gamma_{liq}}{g} - \left(1 - \frac{\rho_{a1}}{\rho_{pa}}\right) \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}\right) L_{Bal} / \left(1 - \frac{\rho_{a0}}{\rho_{pa}}\right)}{V_{pt_0} (1 + \alpha_p (t - t_0))} \right] * (1 + \alpha_{liq} (t - t_0))$$

*Ecuación 4*

Donde:

$m_p$  es la masa del patrón de densidad;  $D$  son las diferencias de los diámetros del hilo antes y después de colgar el patrón;  $\gamma_{liq}$  es la tensión superficial del líquido cuya densidad queremos determinar;  $\rho_{a1}$  es la densidad del aire en el momento del ajuste;  $\rho_0$  es la densidad del aire de referencia igual a 1,2 kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_c$  es la densidad de la pesa de referencia igual a 8 000 kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{pa}$  es la densidad de la pesa de ajuste;  $L_{Bal}$  es la indicación de la balanza de la pesada hidrostática;  $V_{(pt_0)}$  es el volumen del patrón de densidad a la temperatura de referencia;  $\alpha_p$  es el coeficiente volumétrico de dilatación térmica del patrón;  $\alpha_{liq}$  es el coeficiente volumétrico de dilatación térmica del líquido cuya densidad queremos medir;  $t_0$  es la temperatura de referencia en °C;  $t$  es la temperatura a la cual se hace la pesada hidrostática en °C;  $g$  es la aceleración local de la gravedad.

Para el caso de las medidas realizadas, la diferencia  $D$  es próxima a cero debido a las características del dispositivo con el que se cuelga el patrón, por lo que no se toma en cuenta este factor para el cálculo.

El laboratorio realiza una evaluación verificando que, con base en las características del dispositivo utilizado, las presiones atmosféricas que se presentan en Uruguay y las características del laboratorio son despreciables para este estudio dentro de las incertidumbres determinadas, la corrección debida al menisco, la compresibilidad del líquido y la corrección debida a la gravedad, por lo que no se presentan en la ecuación 4.

La densidad del aire se calcula según lo establecido en la fórmula revisada CIPM-2007 (Picard, et al., 2008), utilizándose la versión simplificada exponencial indicada en la OIML R 111-1 y OIML R 111-2 (International Organization of Legal Metrology, 2004a; International Organization of Legal Metrology, 2004b). El procedimiento de medición de la densidad del agua destilada con el densímetro de oscilación es el siguiente:

- La muestra (m1) de aproximadamente 100 ml de agua destilada desionizada se coloca junto al densímetro de oscilación media hora antes de realizar las mediciones.
- Se toma otra muestra de agua destilada desionizada de aproximadamente 100 ml (m2), se le retira el aire disuelto mediante el uso de un sonicador durante aproximadamente 15 minutos.
- Con la muestra de agua m2 se realizan las verificaciones iniciales y finales del densímetro de oscilación. Luego de que la verificación inicial cumple con los límites establecidos para el control del densímetro, se procede a la realización de las medidas de la densidad del agua destilada a 20 °C.
- Se realizan 10 medidas consecutivas de la muestra de agua destilada m1. Cada medición se realiza con parte de la muestra m1 inyectada cada vez.
- Se registra la densidad medida y la temperatura del agua durante la medición.
- Se registran las condiciones ambientales al inicio y al final de las mediciones.

Como en el laboratorio de volumen se realizan calibraciones en el intervalo de 21 °C  $\pm$  2 °C, la segunda parte de este estudio consiste en ampliar las mediciones de densidad del agua destilada a las temperaturas de 19 °C, 20 °C, 21 °C, 22 °C y 23 °C. De esta forma, se cubre todo el intervalo de temperatura de trabajo del laboratorio. Este método se realiza comparando los resultados medidos con el densímetro de oscilación y con los calculados mediante la aplicación de la ecuación de Takana. Las medidas de la densidad con el densímetro de oscilación se realizan de forma similar a las realizadas en la primera parte de este estudio, pero realizando 10 medidas de densidad del agua destilada para las temperaturas mencionadas anteriormente y realizando el promedio de los valores.

## RESULTADOS

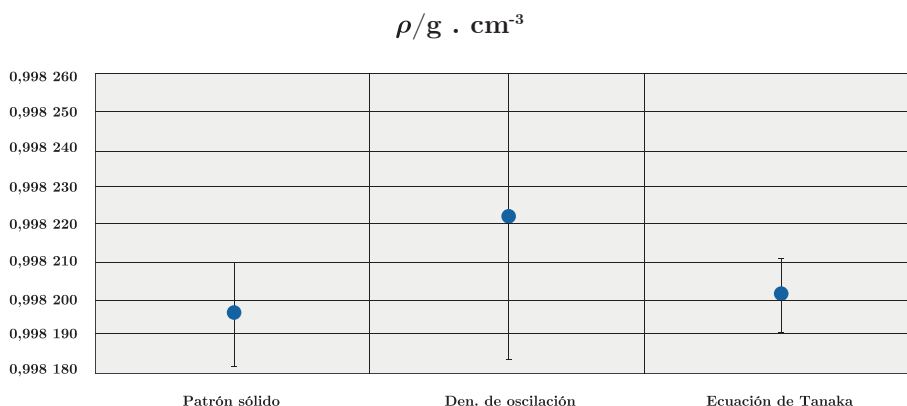
En todos los casos, la incertidumbre fue determinada de acuerdo con la Guide for the Expression of Uncertainty in Measurements JCGM 100:2008 (BIPM, et al., 2008), siendo el valor de incertidumbre total expandida la calculada como la suma cuadrática de las componentes tipo A y tipo B, con un factor de cobertura correspondiente a una probabilidad de 95,45 % ( $\sim k=2$ ). Para el cálculo no se tomaron en cuenta componentes debidas a efectos de inestabilidad a largo plazo.

Los resultados obtenidos de la medición de la densidad de una muestra de agua destilada a 20 °C, usando el patrón sólido de volumen, el densímetro de oscilación y la ecuación de Tanaka se presentan en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Resultados de la densidad de la misma muestra de agua destilada determinada mediante el método de pesada hidrostática, densímetro de oscilación y ecuación de Tanaka.

Forma de determinación	$\rho / g \cdot cm^{-3}$	$U / g \cdot cm^{-3} (k = 2)$	$t / ^\circ C$
Patrón sólido	0,998 196	0,000 014	19,98
Densímetro oscilación	0,998 222	0,000 038	20,00
Ecuación de Tanaka	0,998 201	0,000 010	20,00

En la Figura 1 se muestran los valores obtenidos en la Tabla 1, para los diferentes métodos utilizados.



**Figura 1.** Resultados de la densidad de la misma muestra de agua destilada determinada mediante el método de pesada hidrostática, densímetro de oscilación y ecuación de Tanaka.

A partir de los resultados obtenidos se calculan los errores normalizados entre las densidades determinadas, los valores se muestran en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Valor absoluto de los errores normalizados de comparación del valor de densidad a 20 °C determinados mediante el método de pesada hidrostática, densímetro de oscilación y ecuación de Takana.

Valores comparados	$ E_n $
Patrón Sólido – Ec. Tanaka	0,29
Patrón Sólido – Densímetro oscilación	0,03
Densímetro oscilación – Ec. Tanaka	0,53

Los resultados de la medición de la densidad del agua destilada promedio a 19 °C, 20 °C, 21 °C, 22 °C y 23 °C con el densímetro de oscilación se muestran en la Tabla 3, la incertidumbre de la medición es la correspondiente a la incertidumbre de calibración del densímetro de oscilación:

**Tabla 3.** Resultados de la medición de la densidad con el densímetro de oscilación a las temperaturas de la segunda parte del estudio.

$t / ^\circ\text{C}$	$\bar{\rho} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$U / \left( \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}}{k=2} \right)$
19	0,998 424	$3,8 \times 10^{-5}$
20	0,998 231	$3,8 \times 10^{-5}$
21	0,998 027	$3,8 \times 10^{-5}$
22	0,997 803	$3,8 \times 10^{-5}$
23	0,997 575	$3,8 \times 10^{-5}$

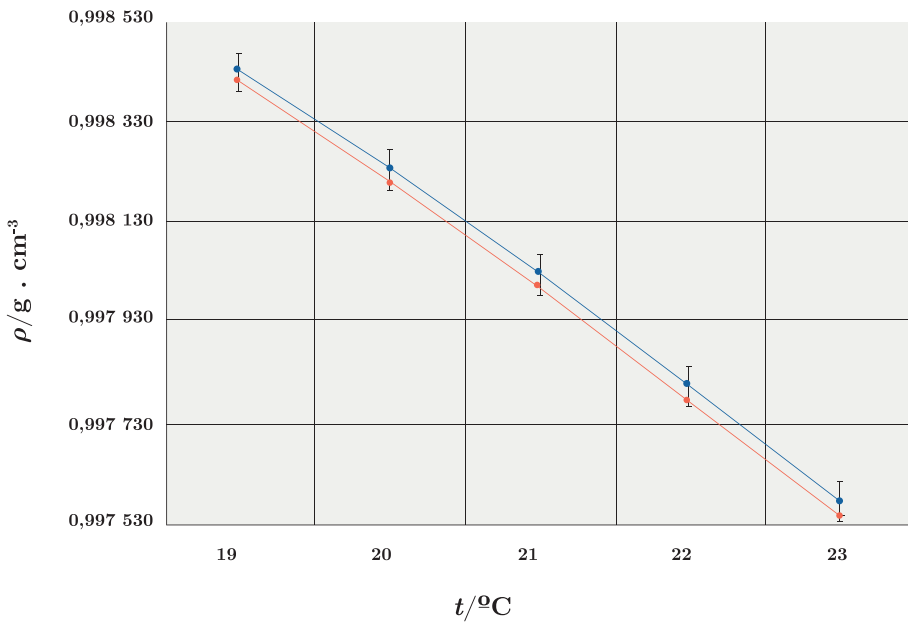
Se calculan las densidades con la ecuación de Tanaka para cada una de las temperaturas de estudio. Para la incertidumbre del cálculo de la densidad del agua mediante el uso de la ecuación de Tanaka, se consideró la incertidumbre debida a la medición de la temperatura (la incertidumbre de los gradientes de temperatura del volumen de agua durante la medición, la incertidumbre de la calibración del sensor de temperatura y la resolución del sensor de temperatura), la incertidumbre debida al aire disuelto en el agua destilada y la incertidumbre debida al ajuste de la ecuación de Tanaka. No se consideró la incertidumbre debida al factor de compresibilidad debido a que la misma es despreciable frente a las otras fuentes de incertidumbre. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Densidades calculadas con la ecuación de Tanaka a cada temperatura con sus respectivas incertidumbres.

$t / ^\circ\text{C}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$U / \left( \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}}{k=2} \right)$
19	0,998 403 0	$6,2 \times 10^{-6}$
20	0,998 201 7	$6,5 \times 10^{-6}$
21	0,997 994 2	$6,8 \times 10^{-6}$
22	0,997 772 3	$7,2 \times 10^{-6}$
23	0,997 540 3	$7,5 \times 10^{-6}$



En la Figura 2 se grafican los resultados obtenidos utilizando el densímetro de oscilación en color azul y utilizando la ecuación de Tanaka en color naranja, para una mejor visualización de estos.



**Figura 2.** Resultados de la medición de la densidad con el densímetro de oscilación y la calculada con la ecuación de Tanaka a las temperaturas de la segunda parte del estudio.

Se calculan los valores absolutos de los errores normalizados entre las densidades medidas con el densímetro de oscilación y las calculadas con la ecuación de Tanaka y se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Errores normalizados entre la densidad promedio medida con el densímetro de oscilación y la calculada con la ecuación de Tanaka a cada temperatura.

$t / ^\circ\text{C}$	$ E_n $
19	0,54
20	0,75
21	0,84
22	0,79
23	0,89

## DISCUSIÓN

En los resultados obtenidos en la primera parte de este estudio se observa que los tres métodos de determinación de la densidad del agua destilada (ecuación de Tanaka, densímetro de oscilación y pesada hidrostática utilizando patrón sólido de volumen) son comparables a 20 °C, ya que el error normalizado entre ellos es menor que uno.

En los resultados obtenidos en la segunda parte de este estudio se observa que los métodos de determinación de la densidad del agua destilada (ecuación de Tanaka y densímetro de oscilación) son comparables a todas las temperaturas desde 19 °C a 23 °C.

Comparando las medidas realizadas a 20 °C se observa una diferencia del valor de la densidad del agua destilada de aproximadamente  $0,9 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Estas diferencias se pueden atribuir a que las mediciones fueron realizadas en distintas muestras de agua y en diferentes fechas, pero no se consideran en los valores de incertidumbre calculados ya que estas se encuentran dentro de la incertidumbre de la medición de densidad con el densímetro de oscilación.

Es importante observar que la incertidumbre de medición con el densímetro de oscilación es aproximadamente cinco veces mayor que la obtenida calculando la densidad del agua con la ecuación de Tanaka. El cálculo del error normalizado usa estas incertidumbres ya que pondera las diferencias con respecto a las incertidumbres consideradas. Dada la diferencia considerable entre las incertidumbres calculadas por los tres métodos, es necesario incluir un nuevo componente en la incertidumbre de calibración de volumen por el método gravimétrico. Este nuevo componente proviene del valor de la incertidumbre de las mediciones de densidad de este estudio con el densímetro de oscilación. El valor de incertidumbre estándar a usar es  $u = 1,9 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

## AGRADECIMIENTOS

Al departamento de Metrología Química del LATU que nos abrió las puertas de su laboratorio inorgánico y nos permitió realizar las mediciones con el densímetro de oscilación. A nuestros colegas metrólogos del departamento de Metrología Física del LATU que revisaron este artículo.

## REFERENCIAS

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML, 2008. *JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. [s.l.]: JCGM. [Consulta: 04 de agosto de 2020]. Disponible en:  
[https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)

International Organization of Legal Metrology, 2004a. *OIML R 111-1. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements* [En línea]. Paris: Secrétariat-rapporteur OIML. [Consulta: 04 de agosto de 2020].  
Disponible en: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r111-1-e04.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf)

- International Organization of Legal Metrology, 2004b. *OIML R 111-2: Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Test report format* [En línea]. Paris: Secrétariat-rapporteur OIML. [Consulta: 08-2020]. Disponible en: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r111-2-e04.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-2-e04.pdf)
- International Organization for Standardization, 2002. ISO 8655-6: *Gravimetric methods for the determination of measurement error*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2010. ISO 4787: *Laboratory glassware-Volumetric instruments-Methods for testing of capacity and for use*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 1987. ISO 3696: *Water for analytical laboratory use – Specification and test methods*. Ginebra: ISO.
- Picard, A., Davis, R.S., Gläser, M. y Fujii, K., 2008. Revised formula for the density of moist air (CIPM 2007). En: *Metrologia*, 45(2), pp.149-155.  
DOI: 10.1088/0026-1397/45/2/004
- Sistema Interamericano de Metrología, 2016. *Guía SIM para la calibración de densímetros de tipo oscilatorio. SIM MWG7/cg-02/v.00* [En línea]. Querétaro: México. [Consulta: 04 de agosto de 2020].  
Disponible en: <https://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/>
- Tanaka, M., Girard, G., Davis, D., Peuto, A. y Bignell, N., 2001. *Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports*. En: *Metrología*, 38(4), pp.301-309.