



INACAL

Instituto Nacional
de Calidad

Metrología

PC-026: 2019

PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE HIGRÓMETROS Y TERMÓMETROS AMBIENTALES

DESCRIPCIÓN

Este procedimiento establece las acciones que deberá cumplir el metrólogo para efectuar la calibración de higrómetros y termómetros ambientales.

PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE HIGRÓMETROS Y TERMÓMETROS AMBIENTALES
PC-026: 2019

© INACAL
Instituto Nacional de Calidad

Dirección: Calle Las Camelias 817 - San Isidro, Lima, PERÚ
Teléfono: 640 8820
Website: www.inacal.gob.pe

Publicación editada por Dirección de Metrología del INACAL.

Prohibida la reproducción total o parcial de este procedimiento por cualquier medio, sin autorización del INACAL.

Primera Edición – Diciembre 2019

Las sugerencias y comentarios pueden ser remitidas a la Dirección de Metrología del INACAL al correo electrónico metrologia@inacal.gob.pe

Impreso en Perú – Printed in Perú

ÍNDICE

1. OBJETIVO	4
2. CAMPO DE APLICACIÓN.....	4
3. DEFINICIONES.....	4
4. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DE MEDICIÓN	6
5. CONDICIONES DE CALIBRACIÓN.....	8
6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	9
7. CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN Y DE LA INCERTIDUMBRE EN CADA PUNTO DE CALIBRACIÓN	11
8. DOCUMENTOS DE REFERENCIA	21
ANEXO 1.....	22

1. OBJETIVO

Describir las acciones que deberá cumplir el metrólogo para efectuar la calibración, por comparación, de higrómetros y termómetros ambientales.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

Este procedimiento es aplicable a higrómetros medidores de humedad relativa con sensores de tipo resistivo o capacitivo, con indicación digital, y que requieran ser calibrados en el intervalo de 10 %hr a 95 %hr. También, para termómetros ambientales con sensores de tipo RTD o termistor o termopar, entre otros, con indicación digital, y que requieran ser calibrados en el intervalo de 10 °C a 40 °C.

Además, la aplicación de este procedimiento puede extenderse a instrumentos o equipos que incluyan higrómetros medidores de humedad relativa y/o termómetros ambientales en sus funciones de medición y que cumplan con las indicaciones citadas en el párrafo anterior. Por ejemplo: estaciones meteorológicas, medidores de estrés térmico, dataloggers, etc.

3. DEFINICIONES

- 3.1 **Absorción (de vapor de agua):** retención (de vapor de agua) por penetración dentro del volumen de un material.
- 3.2 **Adsorción (de vapor de agua):** retención (de vapor de agua) como capa superficial sobre un material.
- 3.3 **Calibración:** operación que bajo condiciones especificadas establece una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, utiliza esta información para obtener un resultado de medida a partir de una indicación.
- 3.4 **Cámara climática:** equipo o instalación diseñada para reproducir, con cierta uniformidad y estabilidad, condiciones controladas de temperatura y humedad en su interior.
- 3.5 **Condensar:** convertir un gas en líquido o en sólido.

- 3.6 **Estabilidad en humedad (temperatura):** Diferencia, después de la estabilización, entre las humedades (temperaturas) máxima y mínima, en un punto cualquiera del espacio de trabajo, a lo largo de un intervalo de tiempo especificado.
- 3.7 **Higrómetro:** instrumento de medición de humedad.
- 3.8 **Higroscópico:** que tiende a absorber vapor de agua.
- 3.9 **Humedad:** presencia de vapor de agua en el aire u otro gas. Algunas veces “humedad” es entendido como humedad relativa; sin embargo, estrictamente hablando, “humedad” puede referirse a otros tipos de indicaciones de humedad absoluta.
- 3.10 **Humedad absoluta:** masa de vapor de agua presente en una unidad de volumen de aire húmedo de una temperatura y presión determinadas. En unidades del SI, la humedad absoluta es expresada en gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire ($g\ m^{-3}$)
- 3.11 **Humedad relativa:** relación entre la presión de vapor real y la presión de vapor de saturación sobre una superficie plana de agua líquida a la misma temperatura, expresada como un porcentaje.
- 3.12 **Incertidumbre estándar:** Incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación estándar.
- 3.13 **Incertidumbre estándar combinada:** Incertidumbre estándar del resultado de una medición, cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos las varianzas y covarianzas de dichas magnitudes, ponderadas de acuerdo a cómo varía el resultado de la medición por cambios respectivos en estas magnitudes.
- 3.14 **Incertidumbre expandida:** Parámetro que define un intervalo en torno al resultado de una medición, tal que en dicho intervalo se espera encontrar una fracción suficientemente grande de la distribución de valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando.
- 3.15 **Presión de vapor:** parte de la presión total aportada por el vapor de agua. Se expresa en unidades de presión, por ejemplo: pascales (Pa), o unidades que no pertenecen al SI como milibares (mbar) o milímetros de mercurio (mmHg).
- 3.16 **Punto de rocío:** temperatura a la que se forma el rocío, o condensación al enfriarse un gas. Esta es, en efecto, la temperatura a la cual el aire empieza a saturarse en equilibrio con el agua. Generalmente se expresan en grados Celsius (°C). También se suele utilizar las expresiones °C_{tr} y °C_{tp} (temperatura de punto de rocío y temperatura de punto de escarcha, respectivamente) o sus variantes en inglés.

- 3.17 **Sensor:** parte activa o sensible de un instrumento de medición. Usualmente los higrómetros medidores de humedad relativa llevan incorporados sensores del tipo mecánico, eléctrico o electrolítico.
- 3.18 **Sensor capacitivo (de humedad):** sensor del tipo eléctrico, en el cual, un cambio de humedad es medido por el cambio en su capacitancia eléctrica. Son los más empleados para la medición de la humedad relativa debido su alta linealidad a bajas humedades. En general, este tipo de sensores no son dañados por la condensación, aunque los resultados de su calibración pueden verse alterados.
- 3.19 **Sensor resistivo (de humedad):** sensor del tipo eléctrico, en el cual, un cambio de humedad es medido por el cambio de su resistencia eléctrica. Poseen una buena linealidad a altas humedades; sin embargo, la mayoría requiere de un circuito de auto-calentamiento para prevenir la condensación y sus daños consecuentes.
- 3.20 **Sonda:** parte de un instrumento que contiene al sensor y lo mantiene distante de su indicador. A veces, la palabra “sonda” es utilizado para hacer referencia al “sensor” y “transmisor” de un instrumento de medición.
- 3.21 **Uniformidad en humedad (temperatura):** Diferencia máxima entre el valor promedio de la humedad (temperatura), después de la estabilización y en cualquier momento, entre dos puntos distintos situados en el espacio de trabajo.

4. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DE MEDICION

- 4.1 **Un higrómetro patrón,** el cual debe cumplir, por lo menos con las siguientes características, (pueden ser mejores):
- Higrómetro con sensor externo de tipo capacitivo o resistivo
 - Tiempo de respuesta menor o igual que 1 minuto
 - Calibrado en el intervalo de mediciones: de 10 %hr a 95 %hr
 - Resolución: 0,1 %hr
 - Error máximo permitido: $\pm 2,5$ %hr
 - Máxima incertidumbre expandida de calibración: 2,0 %hr (con un nivel de confianza de al menos 95 %)

- 4.2 **Un termómetro patrón**, el cual debe cumplir, por lo menos con las siguientes características, (pueden ser mejores):
- Termómetro digital con sensor externo
 - Tiempo de respuesta menor o igual que 1 minuto
 - Calibrado en el intervalo de mediciones: de 10 °C a 40 °C
 - Resolución: 0,1 °C
 - Error máximo permitido: $\pm 0,5$ °C
 - Máxima incertidumbre expandida de calibración: 0,2 °C (con un nivel de confianza de al menos 95 %)
- 4.3 **Medidor de condiciones ambientales** calibrado en los intervalos de mediciones de humedad y temperatura del entorno de la calibración.
- 4.4 **Cámara climática** calibrada y/o caracterizada (en estabilidad y uniformidad) en humedad relativa y temperatura, en los intervalos de 10 %hr a 95 %hr y de 10 °C a 40 °C respectivamente. La calibración en humedad relativa de la cámara climática debe realizarse a la misma temperatura a la que se realizarán las mediciones de la calibración de higrómetros.

5. CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Fuera de la cámara climática

- 5.1 El aire del ambiente de calibración no deberá contener polvo ni vapores agresivos que puedan producir la formación de sedimentos en los sensores de humedad.
- 5.2 Deberá garantizarse una circulación de aire suficiente para el correcto funcionamiento de la cámara climática.
- 5.3 La cámara climática deberá estar protegido contra:
- Grandes superficies de calor radiante como por ejemplo ventanas, hornos, etc.
 - Radiación solar directa
 - Intensas corrientes de aire.

- 5.4 Alejar de los transductores o indicadores cualquier fuente de radiación que pueda afectar las lecturas de medición.
- 5.5 Condiciones ambientales: $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $55\text{ \%hr} \pm 25\text{ \%hr}$

Dentro de la cámara climática

- 5.6 La cámara climática debe tener un sistema de recirculación de aire, que permita lograr el estado estacionario con una cierta estabilidad y uniformidad durante la calibración.
- 5.7 La cámara climática debe tener un cierre hermético suficiente para evitar que las fugas de aire alteren la estabilidad y uniformidad durante la calibración.
- 5.8 Debe evitarse la condensación, sobre todo, durante las calibraciones en valores altos de humedad relativa.
- 5.9 La cámara climática debe estar libre de partículas que afecten a los sensores de humedad. Caso contrario, deben limpiarse con el consentimiento del cliente.
- 5.10 Los equipos, que produzcan un auto-calentamiento, que perturben las condiciones internas de humedad relativa y temperatura de la cámara climática, deben calibrarse por separado.
- 5.11 El espacio total, ocupado por los instrumentos de medición, no debe superar las condiciones de calibración de la cámara climática.

6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

6.1 Calibración de Higrómetros

- 6.1.1 Incluir el termómetro digital, descrito en 4.2, para la medición de la temperatura en el interior de la cámara climática, durante la calibración de los higrómetros.
- 6.1.2 Verificar que las baterías de los instrumentos de medición se encuentren debidamente cargadas. Reemplazar baterías descargadas por otras nuevas.
- 6.1.3 Verificar que las rendijas, de los higrómetros con sensor interno, se encuentren despejadas y libres de cualquier agente (etiquetas, cintas adhesivas, esponjas, etc.) que impida la circulación de aire dentro de los instrumentos de medición.

- 6.1.4 Colocar los instrumentos de medición dentro del volumen de calibración o caracterización de la cámara climática. Estos deberán estar lo suficientemente separados para permitir el flujo de aire entre ellos.
- 6.1.5 Las sondas de los higrómetros deben introducirse totalmente en la cámara climática. En casos que la longitud del vástago supere las dimensiones de la cámara climática, se notificará al usuario antes de iniciar la calibración sobre la profundidad de inmersión para conocer si está de acuerdo con las condiciones propuestas.
- 6.1.6 Verificar el cierre hermético de la puerta y de todo orificio en las paredes de la cámara climática.
- 6.1.7 Iniciar el funcionamiento de la cámara climática en el punto más bajo de calibración en humedad relativa.
- 6.1.8 Esperar que la cámara climática haya alcanzado la estabilización de acuerdo a sus condiciones de calibración. Luego de, al menos, 30 minutos después que se alcanzó el estado estacionario para los valores de temperatura y humedad relativa esperados.
- 6.1.9 Registrar, simultáneamente, las lecturas del higrómetro patrón (h_{Si}), del higrómetro a calibrar (h_{Xi}) y del termómetro patrón.
- 6.1.10 Repetir el ítem 6.1.9, cada un minuto, hasta obtener diez grupos de mediciones.
- 6.1.11 Repetir los ítems 6.1.8, 6.1.9 y 6.1.10 para los siguientes puntos de calibración, los cuales se realizarán en orden ascendente hasta el punto de mayor humedad relativa.
- 6.1.12 Repetir los ítems 6.1.8, 6.1.9 y 6.1.10 en el punto de calibración más bajo de humedad relativa.

6.2 Calibración de Termómetros

- 6.2.1 Verificar que las baterías de los instrumentos de medición se encuentren debidamente cargadas. Reemplazar baterías descargadas por otras nuevas.
- 6.2.2 Verificar que las rendijas, de los termómetros con sensor interno, se encuentren despejadas y libres de cualquier agente (etiquetas, cintas adhesivas, esponjas, etc.) que impida la circulación de aire dentro de los instrumentos de medición.
- 6.2.3 Colocar los instrumentos de medición dentro del volumen de calibración o caracterización de la cámara climática. Estos deberán estar lo suficientemente separados para permitir el flujo de aire entre ellos.

- 6.2.4 Las sondas de los termómetros deben introducirse totalmente en la cámara climática. En casos que la longitud del vástago supere las dimensiones de la cámara climática, se notificará al usuario antes de iniciar la calibración sobre la profundidad de inmersión para conocer si está de acuerdo con las condiciones propuestas.
- 6.2.5 Verificar el cierre hermético de la puerta y de todo orificio en las paredes de la cámara climática.
- 6.2.6 Iniciar el funcionamiento de la cámara climática en el punto más bajo de calibración en temperatura.
- 6.2.7 Esperar que la cámara climática haya alcanzado la estabilización de acuerdo a sus condiciones de calibración. Luego de, al menos, 30 minutos después que se alcanzó el estado estacionario para los valores de temperatura esperados.
- 6.2.8 Registrar, simultáneamente, las lecturas del termómetro patrón (t_{Si}) y de los termómetros ambientales (t_{Xi}) a calibrar.
- 6.2.9 Repetir el ítem 6.2.8, cada un minuto, hasta obtener diez grupos de mediciones.
- 6.2.10 Repetir los ítems 6.2.7, 6.2.8 y 6.2.9 para los siguientes puntos de calibración, los cuales se realizarán en orden ascendente hasta el punto de mayor temperatura ambiental.

7. CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN Y DE LA INCERTIDUMBRE EN CADA PUNTO DE CALIBRACIÓN

7.1 Calibración de Higrómetros

7.1.1 Cálculo de la corrección [C_H]

Por definición, para obtener C_H , se debe resolver la siguiente ecuación:

$$C_H = H_S - H_X \quad (1)$$

donde:

H_S es el valor de referencia de la humedad relativa en un punto de calibración.

H_X es el valor medido, con el higrómetro a calibrar, de la humedad relativa en un punto de calibración.

Para el cálculo de H_S , utilizar la siguiente ecuación:

$$H_S = \bar{h}_S + \delta h_C + \delta h_{IC} + \delta h_{DS} + \delta h_{RS} + \delta h_E + \delta h_{IE} + \delta h_U + \delta h_{IU} \quad (2)$$

donde:

- \bar{h}_S promedio aritmético de las diez lecturas, obtenidas con el higrómetro patrón.
- δh_C corrección de \bar{h}_S , debida a la calibración del higrómetro patrón.
- δh_{IC} corrección debida a la interpolación de las correcciones del certificado de calibración del higrómetro patrón.
- δh_{DS} corrección debida a la deriva del higrómetro patrón.
- δh_{RS} corrección debida a la resolución del higrómetro patrón.
- δh_E corrección debida a la estabilidad de la humedad relativa en la cámara climática.
- δh_{IE} corrección debida a la interpolación de la estabilidad de la humedad relativa en la cámara climática.
- δh_U corrección debida a la uniformidad de la humedad relativa en la cámara climática.
- δh_{IU} corrección debida a la interpolación de la uniformidad de la humedad relativa en la cámara climática.

Para el cálculo de H_X , utilizar la siguiente ecuación:

$$H_X = \bar{h}_X + \delta h_{RX} + \delta h_{Xrep} \quad (3)$$

donde:

- \bar{h}_X es el promedio aritmético de las diez lecturas del higrómetro a calibrar.
- δh_{RX} corrección debida a la resolución del higrómetro a calibrar.
- δh_{Xrep} corrección debida a la reproducibilidad del higrómetro a calibrar.

Finalmente, al reemplazar las ecuaciones (2) y (3) en (1) :

$$C_H = \bar{h}_S + \delta h_C + \delta h_{IC} + \delta h_{DS} + \delta h_{RS} + \delta h_E + \delta h_{IE} + \delta h_U + \delta h_{IU} - \bar{h}_X - \delta h_{RX} - \delta h_{Xrep} \quad (4)$$

7.1.2 Cálculo de la incertidumbre expandida de la corrección $[U(C_H)]$

Al aplicar la ley de propagación de incertidumbre en la ecuación (4) se obtiene la varianza combinada $u^2(C_H)$:

$$u^2(C_H) = u^2(\bar{h}_S) + u^2(\delta h_C) + u^2(\delta h_{IC}) + u^2(\delta h_{DS}) + u^2(\delta h_{RS}) \\ + u^2(\delta h_E) + u^2(\delta h_{IE}) + u^2(\delta h_U) + u^2(\delta h_{IU}) + u^2(\bar{h}_X) \\ + u^2(\delta h_{RX}) + u^2(\delta h_{Xrep}) \quad (5)$$

donde:

$u(\bar{h}_S)$ es la incertidumbre estándar debida a la dispersión de las lecturas del higrómetro patrón (h_{Si}); y se calcula como la desviación estándar del promedio:

$$u(\bar{h}_S) = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (h_{Si} - \bar{h}_S)^2} \quad (6)$$

$u(\delta h_C)$ es la incertidumbre estándar debida a la corrección de la lectura del higrómetro patrón; y se calcula como el cociente del mayor valor de las incertidumbres expandidas de los dos valores de humedad relativa más próximos al punto de calibración y el factor de cobertura, reportados en su certificado de calibración:

$$u(\delta h_C) = \text{máx}(U_1, U_2)/k \quad (7)$$

El valor de $u(\delta h_C)$ puede variar en cada punto de calibración.

$u(\delta h_{IC})$ es la incertidumbre debida a la interpolación de las correcciones del certificado de calibración del higrómetro patrón; y se calcula como el cociente de la máxima desviación de las correcciones respecto de su curva de interpolación entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta h_{IC}) = \text{máx}(\Delta\delta_{cert-inter})/\sqrt{3} \quad (8)$$

$u(\delta h_{DS})$ es la incertidumbre debida a la deriva del higrómetro patrón, y se calcula como el cociente de la deriva máxima del higrómetro patrón (h_{sd}) entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta h_{DS}) = h_{DS}/\sqrt{3} \quad (9)$$

Usualmente, h_{DS} se calcula como el mayor valor de las diferencias entre correcciones de dos calibraciones sucesivas.

$u(\delta h_{RS})$ es la incertidumbre debida a la resolución del higrómetro patrón, y se calcula como el cociente de la resolución ($h_{RS}/2$) entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta h_{RS}) = (h_{RS}/2)/\sqrt{3} \quad (10)$$

$u(\delta h_E)$ es la incertidumbre debido a la falta estabilidad en humedad relativa de la cámara climática en el punto de calibración. Se estima como el cociente del valor interpolado de la estabilidad $\text{máx}(h_E)$ en el punto de calibración entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta h_E) = \text{máx}(h_E)/\sqrt{3} \quad (11)$$

El valor de $u(\delta h_E)$ puede variar en cada punto de calibración.

$u(\delta h_U)$ es la incertidumbre debida a la falta de uniformidad en humedad relativa de la cámara climática en el punto de calibración. Se estima como el cociente del valor interpolado de la uniformidad $\text{máx}(h_U)$ en el punto de calibración entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta h_U) = \text{máx}(h_U)/\sqrt{3} \quad (12)$$

El valor de $u(\delta h_U)$ puede variar en cada punto de calibración.

$u(\bar{h}_X)$ es la incertidumbre debida a la dispersión de las lecturas del higrómetro a calibrar (h_{Xi}), y se calcula como la desviación estándar del promedio:

$$u(\bar{h}_X) = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (h_{Xi} - \bar{h}_X)^2} \quad (13)$$

$u(\delta h_{RX})$ incertidumbre debida a la resolución del higrómetro a calibrar, y se calcula como el cociente de la resolución ($h_{RX}/2$) entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta h_{RX}) = (h_{RX}/2)/\sqrt{3} \quad (14)$$

$u(\delta h_{Xrep})$ incertidumbre debida a la reproducibilidad del higrómetro a calibrar. Se calcula como el cociente del valor absoluto de la diferencia entre la corrección inicial y final en el punto más bajo de humedad relativa entre $\sqrt{3}$:











$$u(\delta h_{Xrep}) = |\Delta C_{inicial-final}|/\sqrt{3} \quad (15)$$

Finalmente, para calcular la incertidumbre expandida con un nivel aproximado de confianza del 95%, se debe multiplicar la incertidumbre combinada por $k = 2$:

$$U(C_H) = k \times u(C_H) \quad (16)$$

En la Tabla 1 se resumen las variables que intervienen en el cálculo de la corrección y su incertidumbre combinada asociada.

Tabla 1 : Resumen de las variables que intervienen en el cálculo de C_H y $u(C_H)$

Magnitud X_k	Estimación x_k	Incertidumbre estándar $u(x_k)$	Coefficiente de sensibilidad c_k	Distribución de probabilidad	Aporte en porcentaje %
\bar{h}_S	$\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} h_{Si}$	$u(\bar{h}_S)$	1		
δh_C	δh_C	$u(\delta h_C)$	1		
δh_{IC}	0	$u(\delta h_{IC})$	1		
δh_{DS}	0	$u(\delta h_{DS})$	1		
δh_{RS}	0	$u(\delta h_{RS})$	1		
δh_E	0	$u(\delta h_E)$	1		
δh_U	0	$u(\delta h_U)$	1		
\bar{h}_X	$\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} h_{Xi}$	$u(\bar{h}_X)$	-1		
δh_{RX}	0	$u(\delta h_{RX})$	-1		
δh_{Xrep}	0	$u(\delta h_{Xrep})$	-1		
$C_H = \bar{h}_S + \delta h_C - \bar{h}_X$		$u(C_H) = \sqrt{\sum_{k=1}^{12} c_k^2 u^2(x_k)}$			100 %

7.2 Calibración de Termómetros

7.2.1 Cálculo de la corrección (C_T)

Por definición, para obtener C_T , se debe resolver la siguiente ecuación:

$$C_T = T_S - T_X \quad (17)$$

donde:

T_S es la temperatura convencionalmente verdadera del punto de calibración.

T_X es la lectura corregida de la temperatura medida con el termómetro a calibrar.

Para el cálculo de T_S , utilizar la siguiente ecuación:

$$T_S = \bar{t}_S + \delta t_C + \delta t_{IC} + \delta t_{DS} + \delta t_{RS} + \delta t_E + \delta t_{IE} + \delta t_U + \delta t_{IU} \quad (18)$$

donde:

\bar{t}_S promedio aritmético de las diez lecturas, corregidas, del termómetro patrón.

δt_C corrección de \bar{t}_S , debida a la calibración del termómetro patrón.

δt_{IC} corrección debida a la interpolación de las correcciones del certificado de calibración del termómetro patrón.

δt_{DS} corrección debida a la deriva del termómetro patrón.

δt_{RS} corrección debida a la resolución del termómetro patrón.

δt_E corrección debida a la estabilidad de la temperatura en la cámara climática.

δt_{IE} corrección debida a la interpolación de la estabilidad de la temperatura en la cámara climática.

δt_U corrección debida a la uniformidad de la temperatura en la cámara climática.

δt_{IU} corrección debida a la interpolación de la uniformidad de la temperatura en la cámara climática.

Para el cálculo de T_X , utilizar la siguiente ecuación:

$$T_X = \bar{t}_X + \delta t_{RX} \quad (19)$$

donde:

\bar{t}_X es el promedio aritmético de las diez lecturas del termómetro a calibrar.

δt_{RX} corrección debida a la resolución del termómetro a calibrar.

Finalmente, al reemplazar las ecuaciones (18) y (19) en (17) :

$$C_T = \bar{t}_S + \delta t_C + \delta t_{IC} + \delta t_{DS} + \delta t_{RS} + \delta t_E + \delta t_{IE} + \delta t_U + \delta t_{IU} - \bar{t}_X - \delta t_{RX} \quad (20)$$

7.2.2 Cálculo de la incertidumbre expandida de la corrección $[U(C_T)]$

Al aplicar la ley de propagación de incertidumbre en la ecuación (20) se obtiene la varianza combinada $u^2(C_T)$

$$u^2(C_T) = u^2(\bar{t}_S) + u^2(\delta t_C) + u^2(\delta t_{IC}) + u^2(\delta t_{DS}) + u^2(\delta t_{RS}) + u^2(\delta t_E) + u^2(\delta t_{IE}) + u^2(\delta t_U) + u^2(\delta t_{IU}) + u^2(\bar{t}_X) + u^2(\delta t_{RX}) \quad (21)$$

donde:

$u(\bar{t}_S)$ es la incertidumbre debida a la dispersión de las lecturas del termómetro patrón (t_{Si}), y se calcula como la desviación estándar del promedio:

$$u(\bar{t}_S) = \sqrt{\frac{1}{10(9)} \sum_{i=1}^{10} (t_{Si} - \bar{t}_S)^2} \quad (22)$$

$u(\delta t_C)$ es la incertidumbre estándar debida a la corrección por calibración de la lectura del termómetro patrón; y se calcula como el cociente del mayor valor de las incertidumbres expandidas de los dos valores de temperatura más próximos al punto de calibración entre el factor de cobertura, reportados en su certificado de calibración:

$$u(\delta t_c) = \text{máx}(U_1, U_2)/k \quad (23)$$

El valor de $u(\delta t_c)$ puede variar en cada punto de calibración.

$u(\delta t_{IC})$ incertidumbre debida a la interpolación de las correcciones por calibración, y se calcula como el cociente de la máxima desviación de las correcciones respecto de su curva de interpolación $\text{máx}(\Delta\delta_{cert-inter})$ entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta t_{IC}) = \text{máx}(\Delta\delta_{cert-inter})/\sqrt{3} \quad (24)$$

$u(\delta t_{DS})$ incertidumbre debida a la deriva del termómetro patrón, y se calcula como el cociente de la deriva máxima del termómetro patrón (t_{DS}) entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta t_{DS}) = t_{DS}/\sqrt{3} \quad (25)$$

Usualmente, t_{DS} se calcula como el mayor valor de las diferencias entre correcciones de dos calibraciones sucesivas.

$u(\delta t_{RS})$ incertidumbre debida a la resolución del termómetro patrón, y se calcula como el cociente de la resolución ($t_{RS}/2$) entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta t_{RS}) = (t_{RS}/2)/\sqrt{3} \quad (26)$$

$u(\delta t_E)$ incertidumbre debida a la falta de estabilidad en temperatura de la cámara climática en el punto de calibración. Se estima como el cociente del valor interpolado de la estabilidad en el punto de calibración $\text{máx}(t_E)$ entre $\sqrt{3}$.

$$u(\delta t_E) = \text{máx}(t_E)/\sqrt{3} \quad (27)$$

El valor de $u(\delta t_E)$ puede variar en cada punto de calibración.

$u(\delta t_U)$ incertidumbre debida a la falta de uniformidad en temperatura de la cámara climática en el punto de calibración. Se estima como el cociente del valor interpolado de la uniformidad en el punto de calibración $máx(t_U)$ entre $\sqrt{3}$.

$$u(\delta t_U) = máx(t_U)/\sqrt{3} \quad (28)$$

El valor de $u(\delta t_U)$ puede variar en cada punto de calibración.

$u(\bar{t}_X)$ es la incertidumbre debida a la dispersión de las lecturas del termómetro a calibrar (t_{Xi}), y se calcula como la desviación estándar del promedio:

$$u(\bar{t}_X) = \sqrt{\frac{1}{10(9)} \sum_{i=1}^{10} (t_{Xi} - \bar{t}_X)^2} \quad (29)$$










$u(\delta t_{RX})$ incertidumbre debida a la resolución del termómetro a calibrar, y se calcula como el cociente de la resolución ($t_{RX}/2$) entre $\sqrt{3}$:

$$u(\delta t_{RX}) = (t_{RX}/2)/\sqrt{3} \quad (30)$$

Finalmente, para calcular la incertidumbre expandida con un nivel aproximado de confianza de 95%, se debe multiplicar la incertidumbre combinada por $k = 2$:

$$U(C_T) = k \times u(C_T) \quad (31)$$

Tabla 2 : Resumen de las variables que intervienen en el cálculo de C_T y $u(C_T)$

Magnitud X_k	Estimación x_k	Incertidumbre estándar $u(x_k)$	Coefficiente de sensibilidad c_k	Distribución de probabilidad	Aporte en porcentaje %
\bar{t}_S	$\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t_{Si}$	$u(\bar{t}_S)$	1		
δt_C	δt_C	$u(\delta t_C)$	1		
δt_{IC}	0	$u(\delta t_{IC})$	1		
δt_{DS}	0	$u(\delta t_{DS})$	1		
δt_{RS}	0	$u(\delta t_{RS})$	1		
δt_E	0	$u(\delta t_E)$	1		
δt_U	0	$u(\delta t_U)$	1		
\bar{t}_X	$\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t_{Xi}$	$u(\bar{t}_X)$	-1		
δt_{RX}	0	$u(\delta t_{RX})$	-1		
$C_T = T_S - T_C$	$u(C_T) = \sqrt{\sum_{k=1}^{11} c_k^2 u^2(x_k)}$				100 %

8. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- 8.1 Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos básicos y generales, y términos asociados (VIM) (JCGM 200:2012). Traducción al español de la 3ª edición 2012 versión 2008 con correcciones menores, publicada por INACAL y autorizada por el BIPM y el JCGM.
- 8.2 A Guide to the Measurement of Humidity – National Physical Laboratory, Inglaterra, 1996
- 8.3 JCGM 100:2008 Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de la medición GUM, Primera edición, 2008
- 8.4 Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review – H. Farahani, R. Warigan and M. N. Hamidon, 2014
- 8.5 Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms, Z. Chen and C. Lu, 2005

ANEXO 1
EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para la calibración de un termohigrómetro “X”, de 0,1 °C y 0,1 %hr de resolución en temperatura y humedad relativa respectivamente, se ha empleado un termohigrómetro patrón “S” de 0,01 °C y 0,01 %hr de resolución.

Los resultados de las calibraciones del termómetro e higrómetro del termohigrómetro patrón se muestran en las tablas 3 y 4. También, se ha determinado que los valores de deriva máxima son 0,12 °C/año y 0,35 %hr/año respectivamente.

La cámara climática fue calibrada en humedad relativa; y el resultado se muestra en la Tabla 5.

Tabla 3: Resultados de la calibración del termómetro del termohigrómetro patrón “S”.

INDICACIÓN DEL TERMÓMETRO /°C	TEMPERATURA CONV. VERDADERA /°C	CORRECCIÓN /°C	INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN /°C
15,01	14,95	-0,06	0,15
25,12	25,01	-0,11	0,11
30,16	30,02	-0,14	0,10

Tabla 4: Resultados de la calibración del higrómetro del termohigrómetro patrón “S”.

INDICACIÓN DEL HIGRÓMETRO /%hr	HUMEDAD RELATIVA CONV. VERDADERA /%hr	CORRECCIÓN /%hr	INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN /%hr
9,88	10,01	0,13	0,40
29,30	30,02	0,72	0,45
48,53	50,01	1,48	0,51
68,51	70,04	1,53	0,78
88,62	90,08	1,46	1,10

Tabla 5: Resultados de la calibración, en humedad relativa, de la cámara climática a la temperatura de 22,5 °C ± 0,5 °C

HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO /%hr	ESTABILIDAD MEDIDA /%hr	UNIFORMIDAD MEDIDA /%hr
9,58	±0,02	0,12
30,01	±0,03	0,28
60,04	±0,05	0,60
95,20	±0,06	1,00

Tabla 6: Datos de las mediciones realizadas en los puntos de calibración de humedad relativa. H_{Xi} es la lectura del termohigrómetro "X". H_{Si} y T_{Si} son las lecturas del termohigrómetro patrón "S".

i	1° PUNTO			2° PUNTO		
	H_{Xi}	H_{Si}	T_{Si}	H_{Xi}	H_{Si}	T_{Si}
1	40,1	39,98	23,01	59,8	60,04	22,98
2	40,1	39,98	23,01	59,8	60,03	22,98
3	40,2	39,97	23,02	59,8	60,03	22,99
4	40,1	39,96	23,01	59,8	60,02	22,98
5	40,1	39,97	23,02	59,8	60,01	22,98
6	40,1	39,98	23,01	59,8	60,01	22,97
7	40,1	39,98	23,01	59,8	60,02	22,97
8	40,1	39,98	23,00	59,8	60,03	22,98
9	40,1	39,97	23,00	59,8	60,02	22,98
10	40,1	39,98	23,02	59,8	60,02	22,97
i	3° PUNTO			4° PUNTO		
	H_{Xi}	H_{Si}	T_{Si}	H_{Xi}	H_{Si}	T_{Si}
1	88,9	90,01	23,04	40,3	40,01	23,04
2	88,9	90,01	23,04	40,3	40,01	23,03
3	88,8	90,01	23,05	40,4	40,02	23,03
4	88,9	90,02	23,04	40,4	40,02	23,03
5	88,9	90,02	23,04	40,4	40,03	23,04
6	88,9	90,02	23,05	40,3	40,02	23,04
7	89,0	90,02	23,04	40,3	40,02	23,03
8	89,0	90,02	23,04	40,3	40,01	23,03
9	89,0	90,02	23,04	40,4	40,01	23,04
10	88,9	90,03	23,04	40,3	40,02	23,04

Cálculo de la corrección en 40 %hr

Para obtener la corrección del instrumento a calibrar empleamos la ecuación (4), de tal forma que:

$$C_H = \bar{h}_S + \delta h_C + \delta h_{IC} + \delta h_{DS} + \delta h_{RS} + \delta h_E + \delta h_{IE} + \delta h_U + \delta h_{IU} - \bar{h}_X - \delta h_{RX} - \delta h_{Xrep}$$

De la tabla 6, para el 1° valor de calibración obtenemos $\bar{h}_S = 39,98 \%hr$ y $\bar{h}_X = 40,1 \%hr$, luego utilizando los valores estimados de la Tabla 4, obtenemos el valor interpolado de la corrección del certificado calibración del patrón, $\delta h_C = 1,17 \%hr$ para el valor de $\bar{h}_S = 39,98 \%hr$.

Todos los demás componentes de (4) tienen un valor esperado igual a cero, por lo tanto, C_H se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_H = \bar{h}_S + \delta h_C - \bar{h}_X$$

$$C_H = 39,98 \%hr + 1,17 \%hr - 40,1 \%hr$$

$$C_H = 1,05 \%hr$$

Estimación de la incertidumbre de la corrección en 40 %hr

Empleando los valores de la tabla 6 para el 1° valor de calibración y aplicando la ecuación (6), obtenemos:

$$u(\bar{h}_S) = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (h_{Si} - \bar{h}_S)^2}$$

$$u(\bar{h}_S) = 0,002 \%hr$$

De acuerdo a la ecuación (7) y la Tabla 4:

$$u(\delta h_c) = \frac{\text{máx}(0,45 \%hr; 0,51 \%hr)}{2}$$

$$\mathbf{u(\delta h_c) = 0,255 \%hr}$$

De acuerdo a la ecuación (8):

La máxima diferencia entre la correcciones del certificado de calibración del patrón y las correcciones interpoladas del mismo, se obtiene que: $\text{máx}(\Delta\delta_{\text{cert-inter}}) = 0,14 \%hr$

$$u(\delta h_{IC}) = \text{máx}(\Delta\delta_{\text{cert-inter}})/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_{IC}) = \frac{0,14 \%hr}{\sqrt{3}}$$

$$\mathbf{u(\delta h_{IC}) = 0,082 \%hr}$$

Como dato tenemos que la deriva máxima del patrón es 0,85 %hr/año y la frecuencia de calibración es de 1 año, entonces aplicamos la ecuación (9):

$$u(\delta h_{DS}) = h_{DS}/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_{DS}) = (\frac{0,35 \%hr}{\text{año}} \cdot 1\text{año})/\sqrt{3}$$

$$\mathbf{u(\delta h_{DS}) = 0,202 \%hr}$$

La resolución del patrón es 0,01 %hr, por lo tanto, aplicando la ecuación (10), obtenemos:

$$u(\delta h_{RS}) = (h_{RS}/2)/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_{RS}) = (0,01 \%hr/2)/\sqrt{3}$$

$$\mathbf{u(\delta h_{RS}) = 0,003 \%hr}$$

De acuerdo a la ecuación (11) se toma el valor interpolado de la estabilidad medida de la Tabla 5 para el valor de calibración de humedad relativa, para el valor de 41,15 %hr:

$$u(\delta h_E) = \text{máx}(h_E)/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_E) = \frac{0,04 \%hr}{\sqrt{3}}$$

$$\mathbf{u(\delta h_E) = 0,023 \%hr}$$

De acuerdo a la ecuación (12) se toma el valor interpolando de la uniformidad medida de la Tabla 5 para el valor de calibración de humedad relativa, para el valor de 41,15 %hr :

$$u(\delta h_U) = \text{máx}(h_U)/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_U) = \frac{0,40}{\sqrt{3}} \%hr$$

$$\mathbf{u(\delta h_U) = 0,230 \%hr}$$

Empleando los valores de la tabla 6 para el 1° valor de calibración y aplicando la ecuación (13), obtenemos:

$$u(\bar{h}_X) = \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (h_{Xi} - \bar{h}_X)^2}$$

$$\mathbf{u(\bar{h}_X) = 0,010 \%hr}$$

La resolución del patrón es 0,1 %hr, por lo tanto, aplicando la ecuación (14), obtenemos:

$$u(\delta h_{RX}) = (h_{RX}/2)/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_{RX}) = (0,1 \%hr/2)/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_{RX}) = 0,029 \%hr$$

Con los datos de la tabla 6, calculamos la corrección final:

$$C_H = \bar{h}_S + \delta h_C - \bar{h}_X$$

$$C_H = 40,02 \%hr + 1,17 \%hr - 40,3 \%hr$$

$$C_H = 0,89 \%hr$$

Tabla 7: Cálculo la diferencia entre las correcciones inicial y final.

CORRECCIÓN INICIAL /%hr	CORRECCIÓN FINAL /%hr	$ \Delta C_{inicial-final} $ /%hr
1,05 %hr	0,89 %hr	0,16 %hr

De acuerdo a la tabla 7 y la ecuación (15) obtenemos:


$$u(\delta h_{Xrep}) = |\Delta C_{inicial-final}|/\sqrt{3}$$

$$u(\delta h_{Xrep}) = |1,05 \%hr - 0,89 \%hr|/\sqrt{3}$$










$$u(\delta h_{Xrep}) = 0,092 \%hr$$

Con los valores calculados, completamos la Tabla1:

Tabla 8: Resumen de cálculos para la calibración en 40 %hr

Magnitud X_k	Estimación x_k	Incertidumbre estándar $u(x_k)$	Coficiente de sensibilidad c_k	Distribución de probabilidad	Aporte en porcentaje %
\bar{h}_S	39,98 %hr	0,002 %hr	1		0,0

PC-026 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE HIGRÓMETROS Y TERMÓMETROS AMBIENTALES

δh_C	1,17 %hr	0,255 %hr	1		37,1
δh_{IC}	0	0,082 %hr	1		3,8
δh_{DS}	0	0,202 %hr	1		23,3
δh_{RS}	0	0,003 %hr	1		0,0
δh_E	0	0,022 %hr	1		0,3
δh_U	0	0,230 %hr	1		30,2
\bar{h}_X	40,1 %hr	0,010 %hr	-1		0,1
δh_{RX}	0	0,029 %hr	-1		0,5
δh_{Xrep}	0	0,092 %hr	-1		4,8
$C_H = 1,05 \text{ %hr}$		$u(C_H) = 0,419 \text{ %hr}$			100 %hr

Calculamos la incertidumbre expandida con ecuación (16):

$$U(C_H) = k \times u(C_H)$$

$$U(C_H) = 2 \times 0,419 \text{ %hr}$$

$$U(C_H) = \mathbf{0,84 \text{ %hr}}$$

Finalmente, para un nivel de confianza de aproximadamente 95 %:

Tabla 9: Resultados de la calibración en el punto de 40 %hr a 22,91 °C

INDICACIÓN DEL HIGRÓMETRO / %hr	HUMEDAD RELATIVA CONV. VERDADERA / %hr	CORRECCIÓN / %hr	INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN / %hr
40,1	41,15	1,05	0,84