

Optimización de los métodos y procedimientos de calibración de termohigrómetros en el Centro Regional de Instrumentos de Buenos Aires

Nota Técnica SMN 2021-102

Natalí Giselle Aranda¹, Rocío Napán Maldonado² y Javier García Skabar²

¹ *Dirección Nacional de Infraestructura Tecnología y de Datos. Servicio Meteorológico Nacional*

² *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*

Septiembre 2021

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

El rol de los Centros Regionales de Instrumentos (CRI), es garantizar la calidad y trazabilidad de las mediciones meteorológicas. El CRI de Buenos Aires cuenta con un laboratorio en el que se realizan las calibraciones de los instrumentos meteorológicos. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en colaboración con el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina (INTI) puso en marcha un plan para mejorar las capacidades del laboratorio del CRI de Buenos Aires. Entre las medidas adoptadas, se encuentra la adquisición de una moderna cámara climática y la actualización de procedimientos de calibración, incorporando el análisis de las fuentes de incertidumbre. Las calibraciones se realizan dentro del rango de temperatura entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin control de humedad relativa a temperaturas inferiores a los $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en el rango de humedad relativa entre 15% HR y 95% HR con control de temperatura. En este trabajo se describe el desarrollo y la metodología de calibración, implementada en el SMN, en temperatura y humedad relativa de sensores con indicador digital utilizando la cámara climática.

Abstract

The role of Regional Instrument Centres (RICs) is to guarantee meteorological measurements' quality and traceability. RIC in Buenos Aires has a laboratory where calibrations of meteorological instruments are done. The National Meteorological Service of Argentina (SMN) in conjunction with The National Institute of Industrial Technology of Argentina (INTI) elaborated a plan to improve its laboratory's capabilities. Some of the measures taken are the purchase of a modern climatic chamber and the update of calibration procedures, by the budget uncertainty analysis. Calibrations are made in a temperature range between $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ without control of relative humidity for temperature values below $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the relative humidity range is from 15% HR to 95% HR, controlling the temperature. In this study, the methodology implemented by the SMN and the analysis for digital thermometer and thermohygrometer calibrations in the climatic chamber, are described.

Palabras clave: calibración, incertidumbre, temperatura, humedad relativa.

Citar como:

Aranda N.G., R. Napán Maldonado, y J. García Skabar, 2021: Optimización de los métodos y procedimientos de calibración de termohigrómetros en el Centro Regional de Instrumentos de Buenos Aires. Nota Técnica SMN 2021-102.

1. INTRODUCCIÓN

Las observaciones meteorológicas son fundamentales para la elaboración de pronósticos meteorológicos, avisos de tiempo severo y operaciones sensibles a las condiciones meteorológicas como las operaciones de vuelo en aeródromos, trabajos de construcción, entre otros. Además, los datos de las observaciones son utilizados con fines de investigación como por ejemplo, estudio del clima y cambio climático, y también son necesarios en el campo de la hidrología y de la meteorología agrícola. Dado el alcance de las observaciones, hay una creciente necesidad de contar con datos meteorológicos de calidad y para ello son necesarios instrumentos meteorológicos, procedimientos de medición, equipamiento de laboratorio para calibración y gestión del laboratorio que garanticen la trazabilidad de las mediciones de acuerdo a los requerimientos del Sistema Internacional de Unidades (SI, por sus siglas en inglés).

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) alberga al Centro Regional de Instrumentos de Buenos Aires (CRI Bs.As). Este Centro, dependiente de la Organización Mundial de Meteorología (OMM), es uno de los centros especializados en las calibraciones de instrumentos meteorológicos de temperatura, humedad, presión atmosférica y viento. Entre las capacidades del CRI Bs.As se encuentran la de contar con instrumentos meteorológicos patrones y establecer la trazabilidad de sus propios procedimientos e instrumentos de medición respecto del SI, (WMO No. 8. Volume I, 2018, WMO No. 8. Volume V, 2018).

El aporte de la metrología en las mediciones meteorológicas cumple un rol importante a la hora de garantizar la exactitud y trazabilidad de las mediciones. Si bien se han realizado pocas investigaciones en este campo, el uso de la metrología en la meteorología está cobrando un creciente interés a nivel mundial. En los últimos años el personal del CRI Bs.As ha participado en capacitaciones asociadas a la medición y análisis de datos. En noviembre del 2015, el CRI Bs.As fue sede del Taller Regional de Metrología para los países de habla hispana de las asociaciones regionales AR III y AR IV, bajo el patrocinio de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) de la OMM, y en colaboración con el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina (INTI) (García Skabar y otros, 2016). Durante el 2017, el SMN participó del "Taller sobre Metrología para Meteorología y Climatología" organizado por el INTI con el apoyo del Instituto Nacional de Metrología de Alemania (PTB, por sus siglas en alemán). Esta actividad continuó en un conjunto de talleres organizados por el Proyecto Regional del PTB para la protección del clima y la biodiversidad en América Latina y el Caribe. A partir de dicho proyecto, el SMN participó en talleres y actividades para mejorar y actualizar las tareas realizadas en el CRI Bs.As. En el 2018 se llevaron a cabo el Entrenamiento de "Mediciones de termómetros, higrómetros y de presión", en el Centro Nacional de Metrología en Panamá (CENAMEP AIP) y el "Entrenamiento internacional de mediciones de intensidad de viento y calibración de anemómetros" en el SMN. En el 2019, el SMN participó en el Workshop de Metrología en Meteorología, en el Laboratorio Tecnológico de Uruguay (LATU) y en el Workshop de Statistical, data analysis and measurement uncertainty for Meteorology, en el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM).

De la experiencia alcanzada en estos talleres, ha surgido la necesidad de mejorar los laboratorios de calibración de los servicios meteorológicos de la región AR III. Además el CRI Bs.As. renovó su compromiso con la OMM como laboratorio de referencia de dicha región (https://community.wmo.int/activity-areas/imop/Regional_Instrument_Centres/ric-argentina). Por esta razón, y además impulsados por los avances tecnológicos del instrumental meteorológico y la necesidad de incorporar la metrología en la meteorología, el SMN en colaboración con el INTI ha puesto en marcha un plan para mejorar las capacidades del CRI Bs.As. Un primer paso fue la adquisición de una moderna cámara climática y la actualización de procedimientos de calibración de instrumentos. El cálculo de la incertidumbre de medición y la evaluación de los aportes de cada componente fueron un pilar importante de la capacitación, y se ha logrado incluirlos como práctica habitual del laboratorio.

En este trabajo, en la sección 2 se describen los procedimientos de calibración de temperatura y humedad relativa de sensores digitales, empleados por el CRI Bs.As, y su correspondiente cálculo de incertidumbre. En la sección 3, a modo de ejemplo se desarrollan los cálculos para la calibración de un termohigrómetro en el punto de 20 °C y 50% HR. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones.

2. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN Y CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

2.1 Definiciones

Una calibración es un procedimiento de comparación entre lo que indica el instrumento y el patrón utilizado como instrumento de referencia. El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) define a la calibración como una operación que en una primera etapa, 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 en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación (JCGM 200, 2012). La calibración de un instrumento permite, además, conocer la desviación de sus mediciones respecto a los valores de calibración determinados a partir del patrón, y tanto sus resultados como las incertidumbres de medición deben documentarse en un certificado de calibración.

La incertidumbre de medición es el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mesurando, que en el caso de la calibración es la corrección (diferencia entre el valor indicado por el patrón y el instrumento bajo calibración). A su vez, la incertidumbre puede entenderse como el grado de duda de los resultados de la calibración. Para mayor profundización de los conceptos, se recomienda la revisión del vocabulario que concierne a la metrología (JCGM 200, 2012).

2.2 Cámara climática

En el CRI Bs.As., la calibración de termómetros y termohigrómetros digitales se realiza dentro de una cámara climática. El patrón utilizado es un termohigrómetro Vaisala (Vaisala, 2005), calibrado por el INTI garantizando la trazabilidad de las mediciones al SI.

La cámara climática utilizada es marca Aralab, modelo Fitoclima ECP75 y tiene un volumen de 1000 L. Su rango de funcionamiento es de -70 °C a 180 °C sin control de humedad relativa y desde 10 °C a 90 °C con control de humedad relativa entre 10% HR y 98% HR. Durante la calibración de instrumental meteorológico, las mediciones se realizan dentro de un rango de temperatura entre -30 °C y 50 °C, y para temperaturas mayores a 10 °C en un rango de humedad relativa entre 15% HR y 95% HR.

La finalidad del uso de las cámaras climáticas es la generación de una zona estable y homogénea en temperatura y humedad relativa con el fin de comparar la indicación de los instrumentos inmersos en ella. Sin embargo, en su interior se presentan gradientes de humedad y temperatura que influyen en la inhomogeneidad espacial e inestabilidad temporal, y que dependen de su diseño. En este sentido, la caracterización de las cámaras climáticas son indispensables para cuantificar estos efectos que influyen sobre las incertidumbres de medición (Pacheco y Lopez, 2007; Grykałowska y Szymrka-Grzebyk, 2015; Salminen y otros, 2017). La caracterización de la cámara climática utilizada en el CRI Bs.As. se llevó a cabo de acuerdo

a las consideraciones realizadas por DKD-R 5-7 (2004) e INACAL (2020), obteniéndose así valores de estabilidad y uniformidad de temperatura y humedad relativa, que intervienen en el análisis de incertidumbre.

Para la caracterización de la cámara se utilizaron siete termohigrómetros ubicados según el esquema de la Figura 1. En los procesos de calibración, se suele identificar la zona de trabajo en el que se colocan los instrumentos y/o equipos bajo calibración. En el caso del CRI Bs.As, los instrumentos se colocan en la parte superior de la cámara y por ello la caracterización se realizó sólo en dicha sección, definiendo así el volumen útil de la cámara climática.

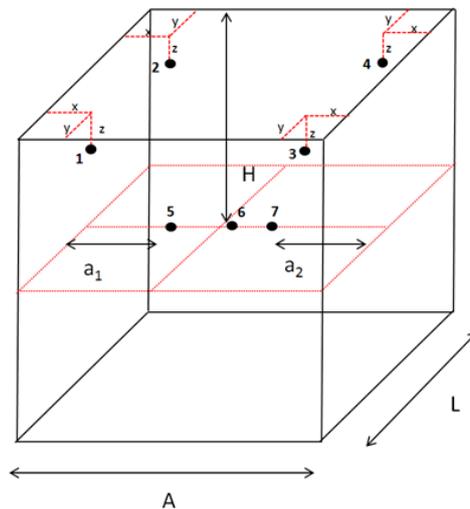


Fig 1: Esquema de la distribución de los sensores utilizados en el ensayo de caracterización, en donde cada punto representa un sensor. La cámara climática presenta una altura de 98 cm, ancho de 100 cm (A) y largo de 106 cm (L). $H = 32$ cm, $x = y = 11$ cm; $z = 6$ cm; $a_1 = 35$ cm; $a_2 = 37$ cm.

2.3 Calibración

A continuación se presenta el modelo de medición empleado para obtener el valor de la corrección del instrumento bajo calibración (IBC) de temperatura (1) y de la humedad relativa (2):

$$CT_{IBC} = T_p + CT_p - T_{IBC} + \sum_{i=1} \beta T_i \quad (1)$$

en donde CT_{IBC} es la corrección de temperatura del instrumento bajo calibración, T_p la temperatura del patrón, CT_p representa la corrección de temperatura del patrón, T_{IBC} es la temperatura del IBC y βT_i representa las correcciones debidas a otros efectos sobre la medición de la temperatura, en promedio con valor nulo pero que aportan a la incertidumbre.

$$CHR_{IBC} = HR_p + CHR_p - HR_{IBC} + \sum_{i=1} \beta HR_i \quad (2)$$

CHR_{IBC} es la corrección de humedad relativa del instrumento bajo calibración, HR_p la humedad relativa del patrón, CHR_p es la corrección de humedad relativa del patrón, HR_{IBC} es el valor de la humedad relativa del IBC y βHR_i representa las correcciones por otros efectos sobre la medición de la humedad relativa que, al igual que en la temperatura, en promedio tienen valor nulo pero aportan a la incertidumbre de medición.

La calibración se realiza por el método de comparación con el patrón, y los datos son registrados cada un minuto. Las mediciones se realizan primero en sentido ascendente y luego, de manera descendente. Por cada valor de temperatura y/o humedad relativa a calibrar se debe considerar al menos 10 mediciones. En la Figura 2 se muestra un esquema de la disposición de los instrumentos dentro de la cámara climática para una calibración por comparación.

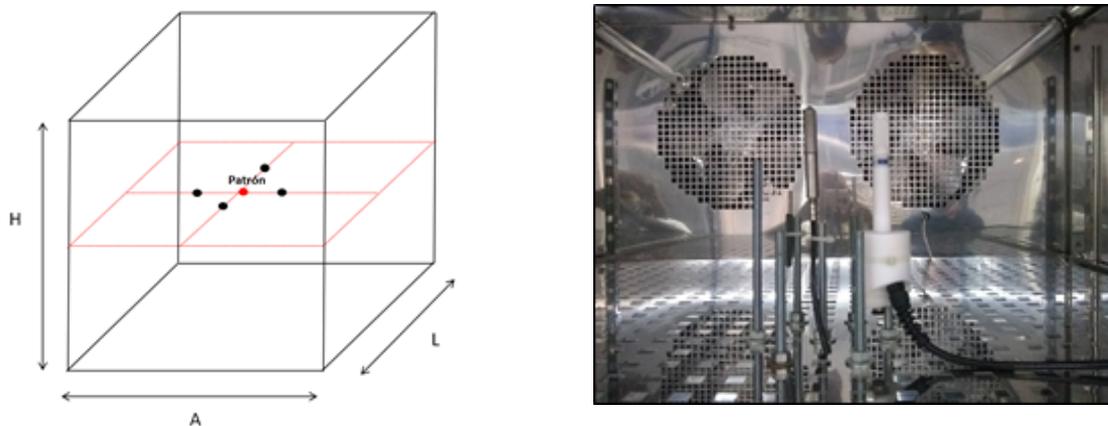


Fig 2: Esquema del interior de la cámara climática (izquierda). Los puntos representan las posibles ubicaciones de los IBC. El punto rojo indica la ubicación del patrón. En la derecha se muestra una fotografía del interior de la cámara climática. El instrumento patrón se ubica en el centro.

2.4 Análisis de las fuentes de incertidumbre

Los resultados de las correcciones de temperatura y humedad relativa deben ir acompañados del análisis de su incertidumbre (European Accreditation, 2013; ISO/IEC 17025, 2017). Para ello es necesario identificar las fuentes o factores que intervienen en el proceso de calibración. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre, a partir de un análisis estadístico de los valores medidos. Otras pueden calcularse mediante una evaluación tipo B, evaluadas a partir de certificados, experiencias o documentación del instrumento.

Para el caso del CRI Bs.As, las incertidumbres (S_i) involucradas son:

- a) Incertidumbre de calibración del instrumento patrón.
- b) Resolución del instrumento patrón y del IBC.
- c) Repetibilidad de las mediciones.
- d) Estabilidad de la cámara climática.
- e) Uniformidad de la cámara climática.
- f) Histéresis del IBC.
- g) Efecto de temperatura sobre humedad.

Las fuentes de incertidumbre de los incisos a) hasta f), afectan tanto a las mediciones en temperatura como a las de humedad relativa.

La fuente de incertidumbre de calibración del patrón se obtiene del certificado de calibración entregado por el INTI. La incertidumbre asociada a la resolución del instrumento se calcula a partir de la mínima división del instrumento o puede encontrarse en su manual, mientras que la repetibilidad se calcula como el desvío estándar de las mediciones.

La contribución de la estabilidad y uniformidad de la cámara en el análisis de las fuentes de incertidumbre se obtuvo a partir de DKD-R 5-7 (2004). La incertidumbre de uniformidad es la máxima desviación de temperatura o humedad relativa dentro del volumen de la cámara respecto de su centro y se calcula como:

$$ST_{uniformidad} = \max|T_{ref} - T_i|$$

$$SHR_{uniformidad} = \max|HR_{ref} - HR_i| \quad (3)$$

$ST_{uniformidad}$ es la incertidumbre de uniformidad de temperatura. T_{ref} es la temperatura registrada en el centro de la cámara y T_i corresponde a la temperatura registrada en distintos puntos de la cámara. $SHR_{uniformidad}$ corresponde a la incertidumbre por uniformidad de humedad relativa, HR_{ref} la humedad relativa en el centro y HR_i , la humedad en otros puntos del interior de la cámara.

La incertidumbre por estabilidad dentro de la cámara se determina a partir de la variación temporal de temperatura o humedad relativa sobre un periodo de tiempo de al menos 30 minutos una vez que las condiciones dentro de la cámara son estables (4).

$$ST_{estabilidad} = \max|T' - T_i|$$

$$SHR_{estabilidad} = \max|HR' - HR_i| \quad (4)$$

$ST_{uniformidad}$ representa la incertidumbre de estabilidad de temperatura de la cámara climática, y $SHR_{uniformidad}$, la incertidumbre de estabilidad de humedad relativa. T' y HR' son los valores medios de la temperatura y humedad relativa del punto medido a partir de los registros de cada instrumento. T_i y HR_i representan los valores de temperatura y humedad relativa registrados en cada muestra.

La incertidumbre de temperatura por histéresis se obtiene a partir de la diferencia entre la temperatura media del IBC en sentido ascendente y descendente. De manera análoga, se calcula la incertidumbre de humedad relativa por histéresis.

Por último, el efecto de temperatura sobre humedad se obtiene de considerar la variación de temperatura sobre el sensor de humedad, influenciado por la estabilidad de la cámara. Para el valor de variación de temperatura se considera la estabilidad de la cámara (4).

El CRI Bs.As. declara la incertidumbre expandida de medición (U) a partir de los aportes de la incertidumbre normalizada o estándar (u), el coeficiente de sensibilidad (C) y del factor de cobertura (k) de cada fuente de incertidumbre. Para obtener la incertidumbre normalizada de cada fuente y así poder comparar y combinar las incertidumbres, es necesario conocer la distribución de probabilidad de cada fuente de incertidumbre. Si solo se puede conocer los límites superior e inferior de cierta incertidumbre (por ejemplo, las provenientes de las especificaciones de fábrica del instrumento), se le asigna igual probabilidad a todos los resultados dentro

de ese intervalo y por lo tanto se asume distribución rectangular (R). En cambio, cuando la incertidumbre proviene de experimentos con observaciones repetidas, se asume distribución normal (N). De esta forma, se considera que las incertidumbres de calibración del patrón, las que se obtienen de la caracterización de la cámara y de la repetibilidad de las mediciones, corresponden a una distribución normal. Sus respectivas incertidumbres normalizadas se calculan de acuerdo a (5). Las incertidumbres de resolución del instrumento, de histéresis y del efecto de temperatura sobre la humedad relativa presentan una distribución rectangular, y su incertidumbre estándar se calcula de acuerdo a (6).

Incetidumbre estándar con distribución normal:

$$u = \frac{s}{2} \quad (5)$$

Incetidumbre estándar con distribución rectangular:

$$u = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

El coeficiente de sensibilidad, C , indica cómo un pequeño cambio en los valores de entrada (X_i) del modelo de medición (CT_{IBC} , CHR_{IBC}) puede alterar el resultado. C puede obtenerse a partir de las derivadas parciales del modelo de medición empleado (7) o bien por métodos numéricos.

$$c_T = \frac{\partial CT_{IBC}}{\partial x_i}$$

$$c_{HR} = \frac{\partial CHR_{IBC}}{\partial x_i} \quad (7)$$

A partir del modelo (1) y (2), y de acuerdo con (7), los coeficientes de sensibilidad asociados a las incertidumbres identificadas en el proceso de medición son iguales a 1 excepto para el coeficiente de sensibilidad del efecto de temperatura sobre humedad (c_T), que se calcula como:

$$c_T = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{HR_{i+1} - HR_i}{T_{i+1} - T_i}}{N} \quad (8)$$

Luego, a partir de la incertidumbre estándar y el coeficiente de sensibilidad se obtiene la incertidumbre estándar combinada, δ :

$$\delta = C \cdot u \quad (9)$$

Considerando que las fuentes de incertidumbres son independientes, U se calcula como:

$$U = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_i)^2} \quad (10)$$

Siendo n , el número de fuentes de incertidumbre. En el CRI Bs.As. se identificaron ocho fuentes de incertidumbre de temperatura y diez fuentes de incertidumbre de humedad relativa, como se muestra en la sección de Resultados.

El factor de cobertura k se obtiene en base al nivel de confianza con el que se quiere expresar los valores de incertidumbre (normalmente, al 95%) y depende de los grados efectivos de libertad (V_{ef}) de las fuentes de incertidumbre (10). Una vez conocido el valor de V_{ef} , k se calcula a partir de una distribución t-student (CENAM, 2012).

$$V_{ef} = \frac{(\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_i)^2)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (10)$$

en donde v_i es el número de grados de libertad y está relacionado con la fuente de incertidumbre u_i . Si la incertidumbre es del tipo A, es decir que se obtiene a partir de un análisis estadístico o a partir de una serie de mediciones, v_i se calcula de acuerdo a (11).

$$v_i = N - 1 \quad (11)$$

en donde N representa el número de mediciones. En cambio, si la incertidumbre es del tipo B (aquellas incertidumbres que se obtienen a partir de otros certificados, fichas técnicas, otra documentación, y cuyo resultado no puede modificarse), se considera que los grados de libertad tienden a infinito (12).

$$v_i \rightarrow \infty \quad (12)$$

3. RESULTADOS

El Laboratorio del SMN cuenta con un procedimiento de calibración para termohigrómetros y termómetros digitales, el cual permite determinar la corrección de temperatura y humedad relativa del IBC con sus respectivas incertidumbres. El alcance de este procedimiento abarca las calibraciones de temperatura entre -30 °C y 50 °C , y respecto de la humedad relativa, a partir de los 10 °C , entre 15% HR y 95% HR. A modo de ejemplo, se muestra el desarrollo del cálculo de incertidumbre de la calibración de un termohigrómetro en 20 °C y 50% HR (Tabla I y Tabla II).

Una vez estabilizada la cámara climática en 20 °C y 50% HR, se realizaron 20 mediciones con el instrumento patrón y el instrumento bajo calibración, y se calcularon los valores medios de temperatura y humedad relativa de ambos instrumentos. Para el caso del IBC, la temperatura media obtenida fue de $20,78\text{ °C}$ con una humedad relativa media de 56,82% HR. La corrección de temperatura del IBC en el punto analizado es $-0,17\text{ °C}$, mientras que para la humedad relativa, la corrección es $-6,68\%$ HR.

Respecto de las incertidumbres de temperatura involucradas, en la Tabla I se puede identificar que los aportes con mayor peso provienen de la calibración del patrón realizada por el INTI y la uniformidad de la cámara climática, mientras que las incertidumbres asociadas a la resolución tienen menor impacto en procedimiento de medición.

Tabla I: Valores de las fuentes de incertidumbre de temperatura para la calibración en valores próximos a 20°C y 50% HR. Se muestran además el valor obtenido de k y de la incertidumbre expandida U_T .

Fuente de incertidumbre	Tipo de incertidumbre	Valor calculado / °C	Distribución	c	Contribución de δ / %
Calibración patrón	Tipo B	0,20	Normal	1	37,70
Resolución patrón	Tipo B	0,01	Rectangular	1	0,03
Repetibilidad patrón	Tipo A	0,02	Normal	1	0,38
Uniformidad cámara	Tipo A	0,23	Normal	1	49,86
Estabilidad cámara	Tipo A	0,11	Normal	1	11,40
Resolución IBC	Tipo B	0,01	Rectangular	1	0,03
Repetibilidad IBC	Tipo A	0,01	Normal	1	0,09
Histéresis IBC	Tipo A	0,02	Rectangular	1	0,50
k		2,01			
U_T		0,33			

Luego de la identificación de las fuentes de incertidumbre de temperatura, y utilizando la ecuación 10 y la distribución t-Student, se calculó el valor del k , siendo este de 2,01 con un nivel de confianza del 95%. Finalmente, la incertidumbre expandida asociada a la corrección de temperatura resultó de 0,33 °C.

Respecto de la calibración de humedad relativa, y al igual que en el caso de la temperatura, las incertidumbres con mayor influencia son la incertidumbre por calibración del patrón y de uniformidad de la cámara (Tabla II). La resolución de los instrumentos y el efecto de la temperatura sobre la humedad, son despreciables frente a las demás fuentes de incertidumbre.

De acuerdo al análisis de las incertidumbres de la humedad relativa, el valor obtenido de k fue de 2,04 con un nivel de confianza del 95%, obteniéndose un valor de incertidumbre expandida de 0,93% HR de humedad relativa.

Finalmente, las correcciones en temperatura y humedad relativa en el termohigrómetro calibrado se informan con su respectiva incertidumbre:

Corrección de temperatura: $(-0,17 \pm 0,33)$ °C

Corrección de humedad relativa: $(-6,68 \pm 0,93)\%$ HR

con un factor de cobertura k cercano a 2 y con un nivel de confianza del 95%.

Es decir que a la medición del IBC de 20,78 °C y 56,82% HR, debe aplicarse una corrección de -0,17 °C y de -6,68% HR para la temperatura y humedad relativa, respectivamente. Además, considerando al valor verdadero como aquel resultado hipotético de una medición perfecta, hay un 95% de probabilidad que el valor verdadero de la corrección de temperatura esté dentro del intervalo de -0,50 °C y 0,16 °C, y un 95% de probabilidad que el valor verdadero de la corrección de humedad relativa esté dentro del intervalo de -7,61% HR y -5,7% HR.

Tabla II: Valores de las fuentes de incertidumbre de humedad relativa para la calibración en valores próximos a 20 °C y 50% HR. Se muestran además el valor obtenido de k y de la incertidumbre expandida U_{HR} .

Fuente de incertidumbre	Tipo de Incertidumbre	Valor calculado / % HR	Distribución	c	Contribución de δ / %
Calibración patrón	Tipo B	0,80	Normal	1	77,66
Resolución patrón	Tipo B	0,01	Rectangular	1	0,00
Repetibilidad patrón	Tipo A	0,05	Normal	1	0,30
Efecto de temperatura patrón	Tipo A	0,11	Rectangular	-0,01	0,00
Uniformidad cámara	Tipo A	0,31	Normal	1	11,66
Estabilidad cámara	Tipo A	0,28	Normal	1	9,51
Resolución IBC	Tipo B	0,01	Rectangular	1	0,00
Repetibilidad IBC	Tipo A	0,07	Normal	1	0,59
Histéresis IBC	Tipo A	0,04	Rectangular	1	0,26
Efecto de temperatura IBC	Tipo A	0,11	Rectangular	0,01	0,00
k		2,04			
U_{HR}		0,93			

De acuerdo a las incertidumbres de calibración requeridas por la OMM (WMO No. 8. Volume I, 2018), la incertidumbre de temperatura para mediciones entre -40 °C y 40 °C debería estar entre 0,1 °C y 0,2 °C, y la incertidumbre de humedad relativa, entre 1% HR y 3% HR. Para el caso de estudio, la incertidumbre de temperatura fue de 0,3 °C, levemente superior a la requerida por la OMM, mientras que la incertidumbre de

humedad relativa cumple con las especificaciones. Sin embargo, el desempeño de los instrumentos y de los sistemas de medición para cumplir con dichos requisitos varía constantemente, de acuerdo a la tecnología de los sistemas e instrumentos de observación. Por esto, la OMM reconoce que sus incertidumbres requeridas sólo pueden ser alcanzadas si se cuenta con equipamiento y procedimiento de la más alta calidad.

4. CONCLUSIONES

Las mejoras llevadas a cabo por el CRI Bs.As. permiten conocer el grado de exactitud y la calidad de las observaciones meteorológicas a través de la incorporación del análisis de las fuentes de incertidumbre en la calibración de los instrumentos meteorológicos.

En el caso de estudio, los mayores aportes a la incertidumbre de medición se deben a los efectos de estabilidad y uniformidad de temperatura y humedad relativa dentro de la cámara. Estas fuentes de incertidumbre se obtienen a partir de la caracterización del equipo, por lo que es fundamental que la caracterización se realice cada cierto periodo de tiempo para evaluar el correcto funcionamiento de la cámara climática. La frecuencia con que deba repetirse la caracterización dependerá del uso y del comportamiento de la cámara.

En general, las calibraciones de humedad relativa a temperatura ambiente obtienen valores de incertidumbre expandida cercanos o superiores a 1,5% HR (CENAM, 2012), por lo que el resultado de la incertidumbre expandida de la humedad relativa para el punto analizado fue el esperado. Además, la incertidumbre obtenida cumple con los requerimientos de la OMM.

De acuerdo a requerimientos de la OMM, los termómetros deberían tener una corrección menor a 0,2 °C y una incertidumbre de medición alcanzable de 0,2 °C (WMO No. 8. Volume I, 2018). Los valores mencionados por la OMM son requisitos establecidos en la guía pero muchas veces difíciles de alcanzar con el instrumental disponible en campo y las capacidades de calibración de los laboratorios en variables meteorológicas. En el valor de temperatura medido y analizado, la incertidumbre expandida resultó ser 0,33 °C. Si bien para los estándares del CRI Bs.As este resultado es aceptable, se puede plantear realizar trabajos para mejorar la incertidumbre. Una forma de alcanzar dicha meta es focalizándose en el comportamiento de la cámara climática, dado que el mayor peso en el análisis de las fuentes de incertidumbre se debe a la uniformidad de temperatura dentro de la misma. En este sentido, podría repetirse el experimento de caracterización con una nueva distribución de los sensores en el interior de la cámara, por ejemplo, disponerlos alejados de los ventiladores de la cámara, ya que estos pudieron haber influido negativamente en los resultados actuales de la caracterización.

Este trabajo es un primer paso hacia la inclusión de criterios metrológicos en mediciones meteorológicas. A partir de la interacción del INTI con el SMN, se ha podido desarrollar un procedimiento de calibración de termohigrómetros y termómetros digitales, para la obtención de datos meteorológicos con trazabilidad al SI y evaluación de incertidumbres. Como trabajo a futuro se plantea la necesidad de aplicar los conceptos metrológicos en la medición del resto de las variables meteorológicas, por ejemplo, en la calibración de sensores de presión y viento.

5. REFERENCIAS

Beyon R., Lovell-Smith J., Mason R. y Vicente T., 2002: State-of- art calibration of relative humidity sensors. Proceedings of Tempmeko 2001, pp. 1003-1008.

CENAM, 2012: Guía Técnica sobre trazabilidad e incertidumbre de medición en la calibración de higrómetros de humedad relativa.

DKD-R 5-7, 2004: Calibration of Climatic Chambers.

https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/dkd/zurueckgezogene_dokumente/Publications/Guidelines/dkd_r_5_7_e.pdf

DKD-R 5-8, 2019: Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa. DOI: 10.7795/550.20190214ES.

https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/dkd/archiv/Publications/DKD-R_5-8_2019_es_korrek.pdf

European Accreditation, 2013: EA-4/02 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration.

García Skabar, J., Napán, R., García, M., Solari, M., Sayago, P., 2016: Intercomparison of meteorological variables measurement, between the National Institute of Industrial Technology (INTI) and the National Meteorological Service (SMN), CIMO TECO 2016.

Grykałowska, A., Kowal, A., y Szmyrka-Grzebyk, A., 2015: The basics of calibration procedure and estimation of uncertainty budget for meteorological temperature sensors. Meteorological Applications, 22, 867-872.

Heinonen, M., 2006: Uncertainty in humidity measurements: Publication of the EUROMET Workshop P758. In EUROMET Workshop P758. Centre of Metrology and Accreditation.

INACAL, 2020: Procedimiento para la calibración y caracterización de medios isotérmicos con aire como medio termostático PC-018. Edición 1°.

International Organization for Standardization (ISO), 2015: Sistema de Gestión de la Calidad (ISO 9001). <https://www.iso.org/standard/62085.html>

International Organization for Standardization (ISO), 2017: Specifies the general requirements for the competence, impartiality and consistent operation of laboratories (ISO/IEC 17025). <https://www.iso.org/standard/66912.html>

INTI, 2015: Calibración de termohigrómetros PEC16; INTI, Centro de Desarrollo e Investigación en Física y Metrología; julio 2015.

JCGM 200, 2012: Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM), 3ª edición en español 2012. Traducción de la 3ª edición del VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones, CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA.

Pacheco, J. A. D., y López, E. M., 2007: Validación del método de calibración de higrómetros capacitivos con soluciones sal-agua como generadoras de humedad. Cent. Nac. Metrol. Publicaciones Técnicas.

Salminen, J., Sairanen, H., Grahn, P., Högström, R., Lakka, A., y Heinonen, M., 2017: Characterization of the humidity calibration chamber by numerical simulations. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 84.

Vaisala, O., 2005: Vaisala HUMICAP humidity and temperature transmitter series HMT330 user's guide.

World Meteorological Organization, 2018: Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Volume I –Measurement of Meteorological Variables.

World Meteorological Organization, 2018: Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Volume V – Quality Assurance and Management of Observing Systems.

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martin Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).