

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

<https://doi.org/10.35381/i.p.v8i14.4903>

Calibración alternativa: su inclusión en el diseño de un módulo cualimétrico

Alternative calibration: its inclusion in the design of a qualimetric module

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera
lazarodejesus@infomed.sld.cu

Hospital Provincial Universitario Cardiocentro Ernesto Che Guevara, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

<https://orcid.org/0000-0001-8953-0689>

Margarita de Jesús Fernández Clúa
margadifc@gmail.com

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara
Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-9410-8981>

María Sotolongo Sánchez
msotolongo@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara
Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-8341-7455>

Ebir González Cruz
ebir@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara
Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-1766-1599>

Recibido: 18 de agosto 2025
Revisado: 23 de octubre 2025
Aprobado: 28 de noviembre 2025
Publicado: 01 de enero 2026

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

RESUMEN

La confiabilidad en instrumentos de medida hospitalarios es crucial para la seguridad y calidad asistencial. En contextos sin patrones de referencia formal se requieren métodos alternativos para validar equipos. El objetivo de la investigación es validar un procedimiento estadístico y operativo para la verificación de instrumentos hospitalarios sin recurrir a patrones certificados. La investigación propone un método estadístico para calibrar instrumentos basado en pruebas de hipótesis y pruebas para eliminar errores, además de comparar con las especificaciones del fabricante. Este método demostró que es posible obtener resultados confiables dentro de las tolerancias del fabricante, sugiriendo que puede implementarse como protocolo técnico institucional en hospitales con limitaciones estructurales. Así, aunque no reemplaza la trazabilidad formal, incrementa la precisión y confianza en las mediciones clínicas, fortaleciendo la cultura de calidad y sostenibilidad operativa, igualmente como su inclusión en el diseño de un módulo cualimétrico.

Descriptores: Calibración sin patrón; confiabilidad; mediciones; trazabilidad; procedimiento. (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The reliability of hospital measurement instruments is crucial for the safety and quality of care. In contexts without formal reference standards, alternative methods are required to validate equipment. The objective of the research is to validate a statistical and operational procedure for the verification of hospital instruments without resorting to certified standards. The research proposes a statistical method for calibrating instruments based on hypothesis tests and tests to eliminate errors, in addition to comparing with the manufacturer's specifications. This method demonstrated that it is possible to obtain reliable results within the manufacturer's tolerances, suggesting that it can be implemented as an institutional technical protocol in hospitals with structural limitations. Thus, although it does not replace formal traceability, it increases precision and confidence in clinical measurements, strengthening the culture of quality and operational sustainability, as well as its inclusion in the design of a qualitative module.

Descriptors: Standardless calibration; reliability; measurements; traceability; procedure. (UNESCO Thesaurus).

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

INTRODUCCIÓN

La calibración de los instrumentos en un hospital cardiovascular condiciona decisiones clínicas cotidianas: una desviación en un monitor de presión invasiva o en un ecógrafo puede modificar un diagnóstico o la dosificación de un tratamiento. En nuestro servicio, por ejemplo, las verificaciones rutinarias incluyen registro de temperatura, tiempo de estabilización y responsable técnico por equipo; esas prácticas facilitan la trazabilidad interna y permiten justificar intervenciones ante auditorías (Webster, 2020). Adoptar rutinas concretas —frecuencias de verificación, formatos de registro y responsables definidos— reduce la variabilidad operativa y mejora la reproducibilidad de las mediciones en condiciones reales de trabajo (ISO 10012, 2003; ISO/IEC 17025, 2017).

Cuando la disponibilidad de patrones certificados es limitada, como ocurre en muchas instituciones con recursos restringidos, es necesario complementar la calibración tradicional con procedimientos alternativos que mantengan la validez operativa. La literatura reciente describe métodos de transferencia y comparación cruzada: proyecciones no supervisadas, optimización por verosimilitud y esquemas de armonización interna; que, aplicados con control experimental y documentación rigurosa de la incertidumbre, permiten estimar el desempeño de equipos sin un patrón físico directo (Díaz, et al., 2022; Nam et al., 2022; Robert y Gosselin, 2024). Estas estrategias no suplen la trazabilidad formal, pero ofrecen una vía práctica para verificar conformidad frente a tolerancias del fabricante cuando la calibración trazable no es inmediata.

Desde la perspectiva metrológica, la estimación de incertidumbre basada en la dispersión de repeticiones (componente Tipo A) resulta adecuada para evaluar la consistencia operativa; sin embargo, para acreditación es imprescindible incorporar contribuciones Tipo B y participar en comparaciones interlaboratorio que cuantifiquen la incertidumbre de transferencia (Kok, 2022). Tecnologías emergentes, como gemelos digitales y modelos estadísticos avanzados, amplían las posibilidades de simulación y ajuste de modelos de calibración en entornos complejos (Beñat Iñigo et al., 2024).

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

En este marco, el objetivo de la investigación es validar un procedimiento estadístico y operativo para la verificación de instrumentos hospitalarios sin recurrir a patrones certificados. El método combina cartas de control, pruebas de aleatoriedad y normalidad, cribado de outliers y un protocolo documental pensado para su integración en un módulo cualimétrico institucional, facilitando su adopción en centros con recursos limitados.

MÉTODO

La presente investigación se enmarca dentro del enfoque aplicado, con diseño metodológico de tipo descriptivo-validativo, orientado a la construcción y prueba de un procedimiento técnico para la calibración de instrumentos de medida en hospitales, sin recurrir a patrones de referencia certificados. El objetivo central consiste en demostrar que, mediante herramientas estadísticas y control operativo, es posible validar la confiabilidad de un instrumento clínico aun en ausencia de trazabilidad formal, siempre que se documente el proceso con rigor técnico.

Se adoptó un diseño no experimental, de corte transversal, con aplicación directa sobre un instrumento hospitalario de uso frecuente: un manómetro de escala 0–10 bar, destinado a la medición de presión en sistemas cardiovasculares. La elección del instrumento responde a criterios de criticidad clínica, accesibilidad operativa y representatividad funcional dentro del entorno hospitalario cubano.

El procedimiento propuesto consta de seis etapas secuenciales, cada una respaldada por fundamentos metrológicos y herramientas estadísticas:

1. Preparación y registro inicial: Se identificaron las características técnicas del manómetro, incluyendo rango de medición, resolución, condiciones de uso y tolerancia especificada por el fabricante ($\pm 3\%$) y se definieron condiciones ambientales y tiempo de estabilización. Todas las lecturas se tomaron con el mismo montaje y operador para minimizar variabilidad operativa. La etapa asegura trazabilidad del procedimiento conforme a requisitos de laboratorio (ISO/IEC

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

17025:2017)

2. Recolección de datos: Se realizaron 30 mediciones consecutivas bajo condiciones ambientales controladas, utilizando un sistema de presión simulada. Las mediciones fueron registradas manualmente y digitalizadas para su análisis posterior, cada lectura se registró con fecha, hora, temperatura y humedad.
3. Verificación de aleatoriedad: Se aplicó la prueba de rachas para confirmar la ausencia de patrones sistemáticos en la secuencia de datos, lo que garantiza la independencia de las observaciones.
4. Evaluación de distribución: Mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov se verificó la normalidad de la muestra, condición necesaria para aplicar modelos de regresión y estimar la incertidumbre.
5. Análisis estadístico: Se calcularon la media aritmética, la desviación estándar muestral y el error relativo de la serie de mediciones. Adicionalmente se construyó una carta de control por medidas individuales para monitorizar la estabilidad operativa durante la corrida y detectar desviaciones o tendencias que pudieran invalidar el conjunto de datos. Cualquier hallazgo relevante en estas pruebas fue documentado y, si procedía, se justificó la exclusión de observaciones conforme a criterios estadísticos y metrológicos.
6. Expresión del resultado de medición: El resultado de la medición se expresó según el formato establecido: $Y = \bar{x} \text{ bar} \pm s$. Donde \bar{x} representa la media de las $n = 30$ mediciones y s la desviación estándar, los resultados de las pruebas estadísticas (incluyendo el estadístico y el valor-p de Kolmogorov-Smirnov y de la prueba de rachas) y la carta de control, de modo se pueda evaluar la validez y reproducibilidad del procedimiento.

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

La elección del procedimiento responde a la necesidad de validar instrumentos en contextos donde la disponibilidad de patrones certificados es limitada o inexistente. Al integrar análisis estadístico, control documental y criterios operativos, se busca ofrecer una alternativa trazable, replicable y defendible desde el punto de vista técnico, sin comprometer la seguridad clínica ni la legitimidad institucional hasta llegar a su inclusión en el diseño de un módulo cualimétrico.

RESULTADOS

La aplicación del procedimiento técnico propuesto permitió validar la confiabilidad operativa de un manómetro hospitalario sin recurrir a patrones de referencia certificados. Se realizaron treinta mediciones consecutivas bajo condiciones ambientales controladas, utilizando un sistema de presión simulada. Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico para verificar su consistencia, distribución y estabilidad como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.
Estadística descriptiva.

Estadístico	Valor
Media \bar{x}	4,98 bar
Desviación estándar s	0,248 bar
Mediana	4,95 bar
Moda	5,00 bar
Mínimo	4,50 bar
Máximo	5,60 bar
Rango	1,10 bar
IQR	0,30 bar

Elaboración: Los autores.

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

La serie de treinta lecturas, obtenida con el montaje y el operador definidos en la etapa de Preparación, muestra una dispersión moderada alrededor de la media. Los valores extremos permanecen dentro de un rango reducido respecto al punto de operación seleccionado.

Verificación de supuestos estadísticos

La prueba de rachas no detectó patrones sistemáticos en la secuencia, lo que respalda la independencia de las observaciones requerida en la etapa 3 del procedimiento. La prueba de Kolmogorov–Smirnov, aplicada según el protocolo en la etapa 4, no rechazó la normalidad de la muestra; por tanto, los estimadores basados en la distribución normal son aplicables. La prueba de Grubbs no identificó valores atípicos significativos, por lo que se mantuvieron las treinta observaciones para el análisis (Tabla 2).

Tabla 2.

Resultados de pruebas de consistencia.

Prueba	Hipótesis nula	Estadístico aproximado	Decisión
Rachas	Aleatoriedad	$Z \approx 0,72$	No se rechaza H_0
Kolmogorov–Smirnov	Normalidad	$D \approx 0,08$	No se rechaza H_0
Grubbs	Ausencia de outliers	$G \approx 2,10$	Sin outliers

Elaboración: Los autores.

Se aplicó de forma complementaria la prueba de Grubbs y el criterio Q de Dixon para la detección de valores atípicos, tras verificar la normalidad con Kolmogorov–Smirnov. Los resultados fueron consistentes: Grubbs arrojó $G \approx 2,10$ ($p > 0,05$) y no identificó outliers, y Dixon presentó $Q_{max} \approx 0,182$ frente a $Q_{crit} \approx 0,28$ ($\alpha = 0,05$), por lo que tampoco detectó valores atípicos. Aunque ambos criterios se reportan por transparencia y por concordancia, la decisión final se fundamentó en Grubbs por su mayor potencia y estabilidad para $n=30$; la aplicación de Grubbs se considera más adecuada para

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

muestras de tamaño moderado y para la estimación de la desviación estándar utilizada en el presupuesto de incertidumbre.

Carta de control por medidas individuales

La carta de control construida conforme a la etapa 5 del procedimiento no muestra puntos fuera de control ni patrones de alarma, como se aprecia en la Tabla 3, que confirma la estabilidad operativa durante la corrida y valida el conjunto de datos para la expresión final del resultado.

Tabla 3.

Parámetros de la carta de control.

Parámetro	Valor
Línea central (CL)	4,98 bar
UCL = $\bar{x}+3s$	5,72 bar
LCL = $\bar{x}-3s$	4,24 bar
Observaciones fuera de control	0

Elaboración: Los autores.

Expresión del resultado de medición

De acuerdo con la etapa 6 del procedimiento original, el resultado se expresa utilizando la media y la desviación estándar muestral:

$$Y = \bar{x} \text{ bar} \pm s = 4.98 \text{ bar} \pm 0.248 \text{ bar}$$

La expresión refleja la media y la dispersión observada en las treinta mediciones bajo las condiciones operativas definidas en el protocolo. Se documentaron en el informe técnico los estadísticos y los valores-p de las pruebas aplicadas (rachas y Kolmogorov–Smirnov), la carta de control y la tabla de datos crudos para garantizar trazabilidad y reproducibilidad.

Tras el análisis estadístico y la verificación de la integridad de los datos, sin errores operativos detectables y sin observaciones fuera de los límites de control en la carta de

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

control por individuos, se procedió a comprobar si las tolerancias de las mediciones obtenidas ofrecen un error máximo permisible (EMP) comparable con el declarado por el fabricante.

Al analizar las medidas de tendencia central se obtuvo una media de $\bar{x} = 4,98 \text{ bar}$ y una desviación estándar muestral $s=0,248 \text{ bar}$. Conforme al procedimiento original, que asocia la incertidumbre a la dispersión de las repeticiones, se calculó la incertidumbre estándar del promedio (componente Tipo A) como:

$$u(\bar{x}) = S(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,248}{\sqrt{30}} \approx 0,0454 \text{ bar}$$

La incertidumbre expandida asociada a la media, con $k=2$, resulta:

$$U = 2 \cdot u(\bar{x}) \approx 0,091 \text{ bar}$$

De acuerdo con la expresión empleada, el resultado puede presentarse en dos formas complementarias: (a) según la notación que utiliza la desviación estándar muestral como medida de dispersión,

$$Y = \bar{x} \pm s = 4,98 \text{ bar} \pm 0,248 \text{ bar}$$

y (b) como estimación de la incertidumbre del promedio (más adecuada para comparar con tolerancias),

$$\bar{x} = 4,98 \text{ bar}, \quad U_{k=2} \approx 0,091 \text{ bar}$$

Las verificaciones estadísticas realizadas según el protocolo respaldan la validez de estas expresiones: la prueba de rachas confirmó la aleatoriedad de la secuencia (ausencia de patrones sistemáticos) y la prueba de Kolmogorov–Smirnov no rechazó la hipótesis de normalidad, lo que habilita el uso de estimadores basados en la normalidad. Además, las pruebas de detección de outliers (Grubbs y criterio Q de Dixon) no identificaron valores atípicos significativos para $\alpha=0,05$, por lo que se conservaron las treinta observaciones para el análisis final. La carta de control por medidas individuales mostró estabilidad operativa sin puntos fuera de control ni tendencias que indiquen deriva.

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

Al comparar la incertidumbre expandida $U \approx 0,091$ bar con la tolerancia del fabricante ($\pm 3\%$ de la escala $\rightarrow T=0,30$ bar), se observa que $U < T$; por tanto, bajo el criterio adoptado en el procedimiento, el instrumento opera dentro de los límites aceptables sin necesidad de calibración frente a un patrón formal para este alcance de evaluación.

El resultado refuerza la viabilidad técnica del método propuesto, especialmente en contextos donde la disponibilidad de patrones certificados es limitada o inexistente, por tanto, se puede incluir en el diseño de un módulo cualimétrico.

DISCUSIÓN

Los análisis estadísticos y el control documental aplicados muestran que el procedimiento propuesto permite verificar la confiabilidad operativa del manómetro sin recurrir de forma inmediata a un patrón certificado. La carta de control no presentó puntos fuera de control; la prueba de rachas confirmó independencia y la prueba de Kolmogorov–Smirnov no rechazó normalidad, lo que habilitó el uso de estimadores basados en la distribución normal. La ausencia de outliers según Grubbs y Dixon refuerza la decisión de conservar las 30 observaciones y fundamentar la incertidumbre en la dispersión de repeticiones (Tipo A).

El presupuesto de incertidumbre calculado se limita a la componente Tipo A; por tanto, no sustituye la trazabilidad formal que aporta una calibración frente a un patrón certificado. La validez de una verificación sin patrón depende críticamente de la repetibilidad del procedimiento y de la incertidumbre asociada al estándar de transferencia cuando se emplee uno; por ello, para fines de acreditación se requiere complementar el análisis con contribuciones Tipo B y comparaciones trazables como sugieren Díaz et al. (2022).

En entornos hospitalarios con limitaciones estructurales, la implementación de métodos alternativos —documentados y respaldados por análisis estadístico riguroso— permite sostener la calidad asistencial sin comprometer la seguridad del paciente. La literatura

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

reciente muestra enfoques para transferencia de calibración y métodos “standard-free” que preservan la utilidad práctica de las estimaciones cuando faltan patrones certificados; estos enfoques incluyen transformaciones espectrales, proyecciones ortogonales no supervisadas y esquemas de transferencia por máxima verosimilitud, que han demostrado ser efectivos en aplicaciones instrumentales diversas cuando se controlan las condiciones experimentales (Díaz et al., 2022; Robert y Gosselin, 2024).

En el ámbito de la metrología aplicada, se ha demostrado que la interpolación y los esquemas de comparación cruzada pueden proporcionar estimaciones de igual calidad metrológica que una calibración formal, siempre que se controlen estrictamente las condiciones de medición y se documente el procedimiento con rigor, lo cual es coherente con los enfoques de calibración por interpolación y calibración comparativa descritos en la literatura especializada (Kok, 2022; Nam et al. 2022). Asimismo, se refiere el uso de modelos estadísticos y gemelos digitales como alternativa o complemento a la calibración tradicional para verificar la operatividad de instrumentos bajo condiciones idealizadas (Dethier, 2022; Beñat Iñigo et al., 2024; Boardman et al., 2025; Li et al., 2025)

Es importante destacar que los métodos mencionados y resumidos en la Tabla 4, son algunos ejemplos de los diversos enfoques que se pueden utilizar para calibrar instrumentos de medida y generalmente parten del uso de un patrón de referencia o sistemas computacionales avanzados.

La elección del método dependerá de factores como el tipo de instrumento, el nivel de precisión requerido y la disponibilidad de recursos y equipos de calibración adecuado. En Cuba, se manifiesta la tendencia a no contar con un patrón de referencia en las instituciones hospitalarias para cada magnitud a calibrar, por lo que es pertinente la solución propuesta.

Desde el punto de vista institucional, la adopción del procedimiento técnico aplicado puede traducirse en beneficios tangibles, como la optimización de recursos, la reducción de costos operativos y la mejora de la trazabilidad interna. La estandarización del método

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

mediante un protocolo técnico alineado con la norma ISO 10012:2003 permitiría su replicación en otros instrumentos clínicos, como balanzas, termómetros y oxímetros, fortaleciendo así la cultura de calidad y la sostenibilidad del sistema hospitalario.

Tabla 4.

Otros métodos aplicados para la calibración metrológica de instrumentos de medida con y sin patrón de referencia.

Autor (Año)	Aplicación
Jones (2013) (con patrón)	Método de comparación con instrumento patrón de referencia trazable a estándares nacionales o internacionales.
Organismo Uruguayo de acreditación (2014) (con patrón)	Método de comparación con un conjunto de instrumentos de calibración con trazabilidad a estándares nacionales o internacionales.
Satoh y Kakiuchi (2021)	Método de calibración para abordar las influencias de la temperatura y la conductividad eléctrica para un sensor de contenido de agua del suelo de bajo costo en el campo agrícola.
Vijayan et al. (2023)	Materiales de referencia indios para la calibración de instrumentos sofisticados.
Leushin, et al. (2023)	Características de la calibración de un radiotermógrafo médico 3D
Cabal (2024)	Mediciones. Enfoque normalizado.
Sánchez (2024)	Calibración de un medidor de flujo tipo Coriolis empleando un método de comparación directa y un procedimiento de tipo estático para flujo másico. Flores
Guzman-Acevedo et al. (2024)	Metodología para estimar un índice de seguridad de puentes utilizando la serie temporal InSAR y un modelo EF calibrado.
Mane et al. (2024)	Avances en la calibración de sensores dieléctricos de humedad del suelo: una revisión exhaustiva de métodos y técnicas
Srisang, et al. (2024)	Calibración e implementación de sensores PM2.5 IoT, incluido el aprendizaje automático
Ye et al. (2024)	Métodos de calibración para ayudar a tener en cuenta el dispositivo.
Yu et al. (2024)	Diseño experimental para el método de calibración de magnetómetros lineales basados en la inclinación
Ai et al. (2025)	Calibración de marcador a objeto mediante Landmark Touch
Wiese et al. (2025)	Estimación de la calidad de calibración espacial de sistemas multicámara para el seguimiento de instrumentos quirúrgicos en grandes volúmenes de medición

Elaboración: Los autores.

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

En síntesis, esta investigación aporta una solución metodológicamente defendible para la calibración de instrumentos sin patrón de referencia, basada en evidencia empírica y criterios técnicos verificables. Su aplicación no solo es viable, sino necesaria en entornos donde la innovación operativa debe surgir desde las propias limitaciones estructurales.

CONCLUSIONES

La presente investigación demuestra que es posible validar la confiabilidad operativa de instrumentos hospitalarios sin recurrir a patrones de referencia certificados, siempre que se aplique un procedimiento técnico respaldado por análisis estadístico riguroso y control documental. La aplicación del método propuesto sobre un manómetro de oxígeno medicinal permitió obtener resultados consistentes, reproducibles y dentro de los márgenes de tolerancia establecidos por el fabricante, lo que confirma su viabilidad técnica en contextos clínicos reales.

El enfoque metodológico, basado en pruebas de distribución, análisis de rachas, ofrece una alternativa trazable y defendible para entornos hospitalarios con limitaciones estructurales. Además, la posibilidad de extender los períodos de calibración sin comprometer la seguridad clínica representa un beneficio institucional significativo, tanto en términos económicos como operativos.

La calibración sin patrón de referencia, cuando se acompaña de criterios técnicos claros, evidencia estadística y documentación trazable, puede institucionalizarse como procedimiento válido en sistemas hospitalarios que requieren soluciones adaptativas. La estandarización de este método, junto con la capacitación del personal técnico y la integración en sistemas de gestión metrológica, contribuiría a fortalecer la cultura de calidad, la sostenibilidad operativa y la legitimidad técnica de los procesos clínicos, lo cual permite su inclusión en el diseño de un módulo cualimétrico.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

AGRADECIMIENTO

A todos los actores sociales involucrados en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Ai, L., Sengupta, S., & Chen, Y. (2025). Marker-to-Object Calibration Using Landmark Touch. *IEEE Sensors Journal*, 25(19), 36773-36784. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3602006>
- Beñat Iñigo, Colinas-Armijo, N., Norberto, L., & Aguirre, G. (2024). Digital Twin for Volumetric Thermal Error Compensation of Large Machine Tools. *Sensors*, 24(19), 6196-6196. <https://doi.org/10.3390/s24196196>
- Boardman, E. N., Boisramé, G. F. S., Wigmosta, M. S., Shriver, R. K., & Harpold, A. A. (2025). Improving model calibrations in a changing world: controlling for nonstationarity after mega disturbance reduces hydrological uncertainty. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(22), 6333–6352. <https://doi.org/10.5194/hess-29-6333-2025>
- Cabal, E. (2024). *Mediciones. Enfoque normalizado*. Universidad del Valle, Programa Editorial. <https://n9.cl/ciyeft>
- Dethier, C. (2022). Calibrating statistical tools: Improving the measure of Humanity's influence on the climate. *Studies in History and Philosophy of Science*, 94, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2022.06.010>
- Díaz, V. F., Roger, J.-M., & Wouter Saeys. (2022). Unsupervised dynamic orthogonal projection. An efficient approach to calibration transfer without standard samples. *Analytica Chimica Acta*, 1225, 340154–340154. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340154>
- Guzman-Acevedo, G. M., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana-Rodriguez, J. A., Gaxiola-Camacho, J. R., Anaya-Diaz, M., Mediano-Martinez, J. C., & Carrión Viramontes, F. J. (2024). Structural health monitoring and risk assessment of bridges integrating InSAR and a calibrated FE model. *Structures*, 63, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106353>

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

International Organization for Standardization. (2003). *ISO 10012:2003 Measurement management systems—Requirements for measurement processes and measuring equipment*. ISO. <https://n9.cl/cm45w>

International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO. <https://n9.cl/fy35x0>

Jones, B. E. (2013). Measurement: Past, Present and Future: Part 1 Measurement History and Fundamentals. *Measurement and Control*, 46(4), 108–114. <https://doi.org/10.1177/0020294013485673>

Kok, G. (2022). The digital transformation and novel calibration approaches. *Tm - Technisches Messen*, 89(4), 214–223. <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0136>

Leushin, V. Yu., Sidorov, I. A., Gudkov, A. G., Chizhikov, S. V., & Agandeev, R. V. (2023). Characteristics of the Calibration of a Medical 3D Radiothermograph. *Biomedical Engineering*, 57(3), 224–227. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10302-x>

Li, J., Koo, J., Lee, J., Wang, P., Zhao, T., & Yoon, S. (2025). AI agent-driven virtual in-situ calibration for intelligent building digital twins. *Energy*, 339, 138968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138968>

Mane, S., Das, N., Singh, G., Cosh, M., & Dong, Y. (2024). Advancements in dielectric soil moisture sensor Calibration: A comprehensive review of methods and techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108686. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108686>

Nam, Y., Lee, J. H., Kim, S. M., Jun, S.-H., Song, S. H., Lee, K., & Song, J. (2022). Periodic Comparability Verification and Within-Laboratory Harmonization of Clinical Chemistry Laboratory Results at a Large Healthcare Center With Multiple Instruments. *Annals of Laboratory Medicine*, 42(2), 150-159. <https://doi.org/10.3343/alm.2022.42.2.150>

Organismo Uruguayo de Acreditación. (2014). *Guía sobre calibración y trazabilidad de las mediciones en laboratorios de ensayo y calibración (DOQ-CGCRE-003)*. <https://n9.cl/izfq3>

Robert, G., & Gosselin, R. (2024). Calibration transfer by likelihood maximization: A standard-free method for multiple instruments. *Infrared Physics & Technology*, 140, 105386. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105386>

Lázaro de Jesús Espinosa-Yera; Margarita de Jesús Fernández-Clúa; María Sotolongo-Sánchez; Ebir González-Cruz

Satoh, Y., y Kakiuchi, H. (2021). Calibration method to address influences of temperature and electrical conductivity for a low-cost soil water content sensor in the agricultural field. *Agronomy Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107015>

Srisang, W., Jaroensutasinee, K., Jaroensutasinee, M., Khongthong, C., Piamonte, J. R. P., & Sparrow, E. B. (2024). PM2. 5 IoT sensor calibration and implementation issues including machine learning. *Emerging Science Journal*, 8(6), 2267–2277. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-06-08>

Vijayan, N., Pallavi Kushwaha, Patra, A., Kumar, R., Singh, S. P., Singh, S., Krishna, A., Kumari, M., Nayak, D., & Singh, N. (2023). Indian Reference Materials for Calibration of Sophisticated Instruments. In: Aswal, D.K., Yadav, S., Takatsuji, T., Rachakonda, P., Kumar, H. (eds) *Handbook of Metrology and Applications*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_31

Webster, J. G. (2020). *Medical instrumentation: application and design*. Wiley. <https://n9.cl/azizlj>

Wiese, L., Hinz, L., & Reithmeier, E. (2025, August). Estimation of the spatial calibration quality of multicamera systems for tracking surgical instruments in large measuring volumes. In *Automated Visual Inspection and Machine Vision VI* (Vol. 13572, pp. 124-135). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3062621>

Ye, C., Lukas, H., Wang, M., Lee, Y., & Gao, W. (2024). Nucleic acid-based wearable and implantable electrochemical sensors. *Chemical Society Reviews*, 53(15), 7960–7982. <https://doi.org/10.1039/d4cs00001c>

Yu, H., Guo, Y., Ye, L., Han, T., & Su, S. W. (2024). Experimental Design for the Inclination-Based Linear Magnetometers Calibration Method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1-9. <https://doi.org/10.1109/tim.2024.3400363>