

# METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE LIMNIGRAFO-FREATÍMETRO

Havrylenko Sofia B.<sup>1</sup>, Moltoni Andrés F.<sup>2</sup>, Clemares Nicolás<sup>2</sup>, Espindola Aime<sup>1</sup>, Fiorini Correa Julio G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Clima y Agua (+54-11-43384600-8509), <sup>2</sup>Instituto de Ingeniería Rural (+54-11-43384600-8805), INTA. Nicolas Repetto y de los Reseros s/n. (1686), Buenos Aires, Argentina.

havrylenko.sofia@inta.gob.ar, moltoni.andres@inta.gob.ar, clemares.nicolas@inta.gob.ar, espindola.aime@inta.gob.ar, fiorini.julio@inta.gob.ar

## Introducción

La disponibilidad de registros precisos y exactos del nivel del agua es fundamental para comprender la dinámica de los recursos hídricos y su relación con actividades agropecuarias, industriales y el consumo humano. Además, los registros de calidad evitan desviaciones en los procesos que se están estudiando. En el caso de innovaciones tecnológicas, como el prototipo de Limnigrafo-Freatímetro desarrollado por INTA (Clemares et al., 2022; Havrylenko et al., 2022), las etapas de ensayos, pruebas e instalaciones en campo son cruciales. Con el objetivo de asegurar mediciones confiables que sean consistentes con lo esperado y adecuadas para su uso, se planteó el desarrollo de una metodología para caracterizar estos equipos. Aunque esta fase del desarrollo requiere tiempo y recursos económicos y humanos, es fundamental para demostrar las funcionalidades de los equipos y mejorar el diseño inicial.

## Materiales y métodos

Con el fin de evaluar la precisión del equipo en condiciones de laboratorio, se comparó su medición simultánea con una escala graduada y un equipo comercial calibrado de características similares. Además, se observaron las condiciones ambientales prevalecientes durante dicho proceso (Heiner, 2012). Se asumió un equilibrio hidrostático y que  $P_m = P_{atm} + \rho_w * g * h_m$  donde  $P_m$  es la presión del agua a una cierta profundidad ( $h_m$ ) y  $P_{atm}$  es la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie del agua,  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ) y  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ). Así, el sensor de presión mide una cantidad relacionada con la altura de la columna de agua sobre el sensor. El equipo cuenta con un sensor comercial cuyo fabricante indicó una precisión de 0,5% de fondo de escala, que permite una medición continua de niveles hasta 10 m columna de agua y que se puede sumergir hasta 100 m sin perder estanqueidad.

Para recrear un pozo freatimétrico que se ubicó en el hangar del Laboratorio de Electrónica del Instituto de Ing. Rural (Figura 1) se diseñó un banco de ensayo. Se utilizó un caño pluvial de polipropileno opaco de 110 mm de diámetro y 4 m de altura, en posición vertical nivelado y amurado a una pared. En la parte inferior se colocó una cámara de inspección y una canilla para regular la altura de la columna de agua. Para visualizar el nivel de la misma, empleando el sistema de vasos comunicantes, se instaló una manguera de PVC cristal y una regla milimetrada paralelo al caño. Por último, los sensores se introdujeron por la parte superior con sus respectivos ceros emparejados hasta una profundidad de 4 metros.

Para caracterizar el prototipo, se diseñaron tres unidades muestrales (UM1, UM2 y UM3). La UM1 analizó la respuesta del sensor a la presión atmosférica cuando está expuesto al aire para determinar la presencia de un offset. Se tomaron registros cada 30 segundos durante 67 horas. La UM2 constó de 4 unidades de análisis para evaluar la medición del instrumento en puntos fijos de una escala. Tres de ellas fueron estáticas, correspondiendo al ascenso, descenso y comportamiento errático

del nivel de agua. La cuarta unidad se estableció en condiciones dinámicas, con un descenso continuo de la columna de agua. Por último, la UM3 evaluó el instrumento en un amplio rango de mediciones en condiciones dinámicas de descenso. Se registró la altura cada 60 segundos desde los 4 metros hasta vaciar el banco de ensayo.

A partir de las pruebas piloto del experimento, se evaluó el número y la duración de las repeticiones, corrigiendo errores experimentales. Se observó un ruido en la señal del equipo, manifestado en cambios abruptos menores a 18 mm en la medición a intervalos regulares. Para controlar este ruido, se incorporó un filtro analógico y otro digital en el firmware. Debido a que en el ensayo solo se necesitaba medir una altura de columna de agua de 4 metros como máximo, se optó por configurar el equipo para que utilice rango de medición del sensor de 0 a 5 metros. Además, se estableció llevar a cabo 3 repeticiones por unidad de análisis. En particular, para la UM2, cada repetición consistió en 30 mediciones cada 30 segundos, en las siguientes alturas fijas (en milímetros): 12, 32, 80, 144, 224, 320, 720, 1600, 2640 y 3840 (Figura 1).

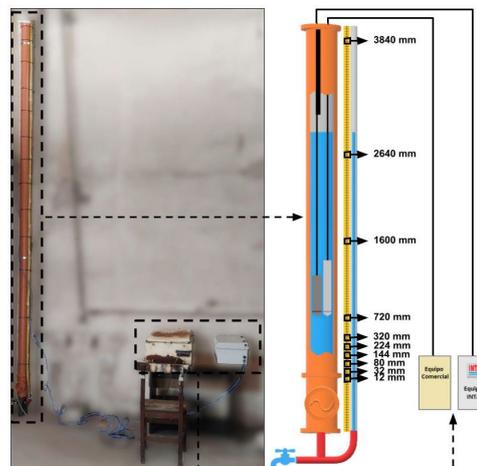


Figura 1.- Diseño y estructura del banco de ensayo.

Se realizaron las siguientes pruebas a partir de los datos observados: repetibilidad, reproducibilidad, sesgo y linealidad (Moret y Paisan, 2010; AIAG, 2010). Estos análisis permiten evaluar la variabilidad de las mediciones del prototipo bajo una condición específica (repetibilidad) y en diferentes condiciones (reproducibilidad). Además, se busca detectar si las mediciones del prototipo son consistentemente más bajas o más altas que el valor de referencia (sesgo) y si siguen una relación lineal con las mediciones de referencia. Estas pruebas en conjunto proporcionan información fundamental sobre el rendimiento del prototipo y ayudan a identificar las mejoras necesarias.

## Resultados

A partir de la UM1, se determinó que el prototipo no presentó un offset asociado a la presión atmosférica durante el período

observado, mientras que el equipo comercial tuvo un offset promedio de 18 mm.

La repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición se evaluaron utilizando el método de promedios y rangos sugerido por Moret y Paisan (2010), con los datos de la UM2. El % de repetibilidad promedio de todos los niveles de agua resultó ser 15,430 ligeramente mayor al % de reproducibilidad promedio (12,369). Esto indica que la variabilidad existente entre las mediciones se debe al instrumento en sí y/o al sistema utilizado para realizar las mediciones en los diferentes tratamientos aplicados. El porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad promedio R&R fue de 20,041, ubicándose entre el rango 10% y 30%. Esto implica que el sistema de medición es aceptable temporalmente, aunque se requieren mejoras. Se plantearon dos hipótesis: en primer lugar, puede ser necesario aumentar la tolerancia admitida ( $T=10\text{ mm}$ ) en la medición; y en segundo lugar, se debe revisar el sistema de medición, ya que los mejores resultados se obtuvieron en las mediciones centrales, lo que sugiere que los extremos podrían tener un error asociado a una mayor dificultad operativa.

El sesgo de las mediciones se obtuvo a partir del método de Bland-Altman (Figura 2). A partir del gráfico se puede observar que el sesgo medio de los datos se mantiene cerca del cero. La mayoría de las diferencias individuales se encuentran dentro de un rango de confianza del 95% ( $\pm 5\text{ mm}$ ). El 99% de los datos se encuentra dentro de las líneas establecidas como tolerancia del instrumento ( $\pm 10\text{ mm}$ ), y todos los datos están dentro de la tolerancia proporcionada por el fabricante del sensor (máximo  $\pm 50\text{ mm}$  para la sonda utilizada).

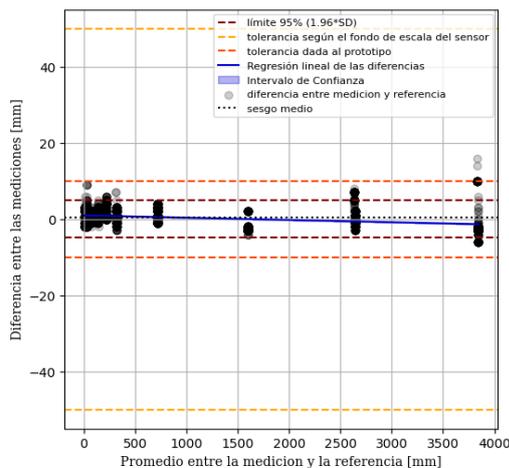


Figura 2.- Gráfico de Bland-Altman que muestra la concordancia entre las mediciones del prototipo y escala graduada.

Asimismo, al observar la regresión lineal de las diferencias de las mediciones del prototipo se ve una tendencia negativa en los datos. Esta misma evaluación se realizó para el equipo comercial, y en ambos equipos se observó un comportamiento similar, con pendientes muy bajas. Esto indica que las diferencias entre las mediciones no son constantes en todo el rango. Específicamente, cuando los niveles de agua son altos, las diferencias son más amplias y se alejan con mayor frecuencia del valor observado en la escala. A medida que nos acercamos a los niveles de agua más bajos, los datos de ambos equipos y la escala se centran. El coeficiente de determinación para la línea de regresión  $R^2$  del prototipo fue de 0,09 (0,06 equipo comercial), y el valor p del t-test de una muestra fue  $p=0,0$ . Estos resultados confirman que, aunque existe una diferencia estadísticamente significativa entre las mediciones y la regla, dichas diferencias son operacionalmente insignificantes. La única diferencia notable se encontró en los sesgos medios de los equipos evaluados, donde el equipo comercial registró un valor 25,16 mm, mientras que el prototipo desarrollado presentó un sesgo de 0,37 mm., mostrando

una mejor capacidad del equipo a acercarse al valor de referencia.

Para confirmar la linealidad encontrada, se evaluó el equipo en un rango amplio de medición. Para ello se utilizó el conjunto de datos de la UM3. Se creó un gráfico de dispersión (Figura 3) que representa los datos observados en la escala graduada en relación al valor dado por los equipos. Se ajustó una línea de regresión para cada instrumento, y se obtuvieron coeficientes de determinación  $R^2$  de 0,999 para ambos. Estos resultados indican una excelente linealidad de los equipos en un amplio rango de mediciones.

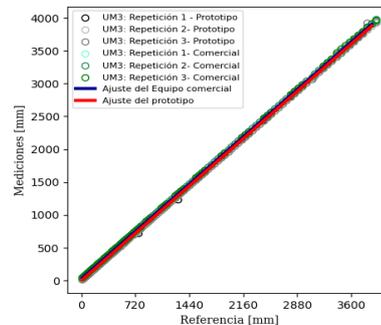


Figura 3.- Análisis de linealidad en condiciones dinámicas.

### Conclusión

El análisis de Bland-Altman muestra que la diferencia promedio entre el prototipo y la regla es poco significativa, y se mantiene dentro de la tolerancia establecida. Aunque hay una tendencia negativa en las diferencias, este comportamiento no tiene un impacto práctico significativo en las mediciones. Los análisis realizados en este estudio mostraron una excelente linealidad en un amplio rango de mediciones. Los resultados obtenidos con el prototipo fueron equiparables a los del equipo comercial. Se concluye que las mediciones del prototipo son precisas y confiables, y que la metodología utilizada para caracterizar el mismo y calibrar los demás equipos fabricados es aceptable.

Agradecimientos: Fundación ArgenINTA, P041 INTA.

### Referencias

AIAG-Work Group. (2010). Measurement systems analysis. MSA 4th Edition-Reference manual. Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation.

Clemares, N., Moltoni, A.F., Havrylenko, S.B., Espindola, A., & Fiorini Correa, J. (2022). Desarrollo de un hardware para una estación de monitoreo hidrológico multiparamétrica. Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2022) - JAIIO 51. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Sociedad Argentina de Informática - SADIO.

Havrylenko, S.B., Moltoni, A.F., Clemares, N., Espindola, A., & Fiorini Correa, J. (2022). "Desarrollo de un prototipo electrónico inalámbrico para medir el nivel de agua en cuencas del sistema agroalimentario argentino". XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Foz de Iguazú, Brasil: Association for Hydro-Environment Engineering and Research.

Heiner, B.J., & Gill, T.W. (2012). "Water Level Sensors, What Works?". International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures. 4. <https://digitalcommons.usu.edu/ewhs/Sessions/1/4>.

Paisan, Y.P., & Moret, J.P. (2010). "La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición". Chemical Technology, 30(2), 117-121.

Tamari, S. & Aguilar-Chávez, A. (2010). Testing submersible pressure transducers to monitor water level in tanks. Water Technology and Sciences, 1 (3) July-September, 2010, pp. 71-88.