Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Evaluación experimental y estadística del sensor capacitivo SEN0193 para la medición de humedad en materiales granulares

Experimental and Statistical Evaluation of the SEN0193 Capacitive Sensor for Moisture Measurement in Granular Materials

Diaz-Peña, I.[a], Hermosillo-Nevárez, J.J.[b], Félix-Sámano, A.L.[a], Zaldívar-Cadena, A.A.[c], Castro-Rubio, J.R.[a], Félix-Medina, J.V.[a]*

[a] División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Culiacán. Culiacán 80220. México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9852-4309, https://orcid.org/0009-0006-4934-2177, https://orcid.org/0009-0003-9857-8694, https://orcid.org/0009-0005-6018-7414*.

[b] Universidad Autónoma de Occidente-Unidad Regional Culiacán. 80020. Culiacán, Sinaloa, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0462-231x.

[c] Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, 66455, San Nicolás de los Garza, N.L., México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7216-2557.

ismael.dp@culiacan.tecnm.mx; jhonatan.hermosillo@uadeo.mx; ana.fs@culiacan.tecnm.mx; azaldiva70@hotmail.com; roberto.cr@culiacan.tecnn.mx; jennifer.fm@culiacan.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Análisis del comportamiento de un sensor de ultra bajo costo para medición de humedad en materiales granulares.

Área de aplicación industrial: Materiales granulares**,** Instrumentación y control.

Recibido: 28 abril 2026
Aceptado: 23 septiembre 2026

Abstract

This study presents a methodology for the experimental and statistical evaluation of low-cost capacitive sensors (SEN0193) for moisture measurement in granular media under controlled laboratory conditions. Ten sensors were used to measure the moisture content of a granular material characterized by particle size distribution in accordance with ASTM D1241. Moisture content was systematically varied across seven levels (0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 %), with 10,000 measurements per moisture level (a total N of 70,000) acquired through a data acquisition system. The analysis focused on characterizing the sensor response as a function of gravimetric water content (GWC), assessing its repeatability and stability under controlled soil–water ratio conditions. Statistical analysis included multiple normality tests (Shapiro–Wilk, Anderson–Darling, Lilliefors, Jarque–Bera, and D'Agostino), as well as descriptive statistics such as the mean, standard deviation, and coefficient of variation. The results show low dispersion in the

measurements (CV < 1%), indicating high repeatability and consistency among the sensors. Two fitting models were developed: a fourth-order polynomial model for empirical fitting and an exponential model to describe the nonlinear behavior of the signal as a function of moisture. Both models exhibited a high degree of fit to the experimental data within the evaluated range, although the exponential model demonstrated greater consistency with the expected system behavior. The results indicate that the sensor response exhibits a nonlinear relationship with moisture content, consistent with the nature of capacitive sensing. Under the experimental conditions, stable and reproducible performance of the measurement system was observed. This work demonstrates the feasibility of low-cost capacitive sensors for moisture measurement in granular media under controlled conditions, highlighting their high repeatability, which may help complement the results of conventional techniques that typically entail greater time, effort, cost, and labor requirements.

Keywords: SEN0193 sensor, moisture measurement, granulometry test, ASTM D1241.

Resumen

Este estudio presenta una metodología para la evaluación experimental y estadística de sensores capacitivos de bajo costo (SEN0193) para la medición de humedad en medios granulares bajo condiciones controladas de laboratorio. Se emplearon 10 sensores para medir la humedad de un material granular caracterizado mediante distribución de tamaño de partícula conforme a ASTM D1241. El contenido de humedad se varió sistemáticamente en siete niveles (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 %) con 10,000 mediciones por nivel de humedad (*N* total de 70,000) adquiridas mediante un sistema de digitalización. El análisis se centró en la caracterización de la respuesta del sensor en función del contenido de agua gravimétrico (GWC), evaluando su repetibilidad y estabilidad bajo condiciones controladas de relaciones suelo/agua. El análisis estadístico incluyó múltiples pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk, Anderson–Darling, Lilliefors, Jarque–Bera y D'Agostino), así como estadísticos descriptivos como media, desviación estándar y coeficiente de variación. Los resultados muestran una baja dispersión en las mediciones (CV < 1%), lo que indica alta repetibilidad y consistencia entre sensores. Se desarrollaron dos modelos de ajuste: un modelo polinomial de cuarto orden para ajuste empírico y un modelo exponencial para describir el comportamiento no lineal de la señal en función de la humedad. Ambos modelos mostraron un alto grado de ajuste a los datos experimentales dentro del rango evaluado, aunque el modelo exponencial presenta mayor coherencia con el comportamiento esperado del sistema. Los resultados indican que la respuesta del sensor presenta una relación no lineal con el contenido de humedad, consistente con la naturaleza del sensor capacitivo. Bajo las condiciones del experimento, se observó un comportamiento estable y reproducible del sistema de medición. Este trabajo demuestra la viabilidad de sensores capacitivos de bajo costo para la medición de humedad en medios granulares bajo condiciones controladas, destacando su alta repetibilidad, lo que pudiera ayudar a complementar los resultados de las técnicas convencionales, las cuales conllevan un mayor consumo de tiempo, esfuerzo, dinero y mano de obra.

Palabras clave: Sensor SEN0193, Medición de Humedad, Granulometría, ASTM D1241.

1. Introducción

El contenido de agua en suelos y materiales granulares es un parámetro fundamental en el análisis de propiedades mecánicas y comportamiento geotécnico (Das, 2010). En particular, la compactación del suelo depende directamente de su contenido de humedad, lo que influye en la capacidad de carga y estabilidad de estructuras construidas sobre él. Ensayos clásicos como los derivados del método Proctor permiten establecer relaciones entre la densidad seca y el contenido de agua, identificando condiciones óptimas de desempeño mecánico (ASTM International, 2007; American Association of State Highway and Transportation Officials, 1995a; American Association of State Highway and Transportation Officials, 1995b).

La determinación convencional del contenido de agua se basa en procedimientos gravimétricos que implican el secado de muestras en horno a temperaturas cercanas a 105 °C durante periodos prolongados. Aunque este método es ampliamente aceptado, presenta limitaciones asociadas a tiempos de análisis elevados y costos operativos, lo que restringe su aplicabilidad en mediciones rápidas o monitoreo continuo (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003).

En este contexto, los sensores capacitivos de bajo costo han surgido como una alternativa viable para la estimación indirecta del contenido de humedad, permitiendo reducir tiempos de medición y costos de implementación (Contreras-Ferreyra et al., 2024; Vaz et al., 2013). Entre estos dispositivos, el sensor SEN0193 destaca por su accesibilidad económica y su principio de operación basado en la respuesta dieléctrica del medio, lo que les confiere sensibilidad a variaciones en el contenido de agua (Abdelmoneim et al., 2025; Placidi et al., 2020). No obstante, su desempeño depende significativamente de las propiedades del suelo, tales como granulometría, compactación y distribución de fases, lo que hace necesario el desarrollo de procedimientos de calibración específicos para cada material (Adla et al., 2020).

Adicionalmente, la creciente disponibilidad de sensores de ultra bajo costo ha impulsado su uso en configuraciones multisensor, con el objetivo de capturar la heterogeneidad espacial de los materiales. No obstante, este enfoque introduce nuevos retos asociados a la repetibilidad, la variabilidad entre sensores y la confiabilidad de los datos obtenidos, aspectos que no han sido ampliamente documentados en materiales no cohesivos utilizados en aplicaciones geotécnicas, particularmente en capas de subbase para infraestructura vial (Hidayat et al., 2024).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar experimentalmente el comportamiento de múltiples sensores capacitivos SEN0193 en un material granular no cohesivo, bajo condiciones controladas de laboratorio (Fernandes-Genovez et al., 2025). Se emplea un agregado triturado caracterizado con base en ASTM D1241 (retirada el 29 de enero de 2024, sin sustituta directa) como material de referencia. El contenido de humedad se varía en un rango de 0 a 30 %, y se analizan más de 70,000 datos experimentales obtenidos a partir de 10 sensores. Estudios previos con el SEN0193 en suelos naturales reportan una variabilidad entre sensores considerablemente mayor a la buscada en aplicaciones de precisión. Algunos investigadores (Radi et al., 2018; Pereira et al., 2022) obtuvieron coeficientes de variación de 3.27–17.84 % en suelos del Cerrado brasileño, y en otros trabajos calibraron cinco sensores en suelo franco-arenoso mediante regresión potencial (R^2 = 0.842–0.989), excluyendo una unidad de bajo ajuste sin un criterio estadístico explícito. A

diferencia de estos antecedentes, centrados en suelos naturales con fines agrícolas, este trabajo aborda un material no cohesivo caracterizado para aplicaciones de pavimentación, evaluando su comportamiento estadístico con un diseño experimental más extenso.

El enfoque adoptado se centra en la caracterización estadística de la respuesta del sensor, evaluando su repetibilidad, dispersión y consistencia entre dispositivos mediante el uso de estadísticos descriptivos y pruebas de normalidad. A partir de estos resultados, se desarrollan modelos matemáticos no lineales que permiten correlacionar el contenido de agua gravimétrico con la señal digital del sensor, proporcionando una base para su uso en aplicaciones geotécnicas. Se ha seguido un enfoque comparable en varios estudios (Kulmány et al., 2022; Al-Rawi, 2024) para suelos arcillosos, donde se obtienen resultados más favorables mediante el uso de curvas polinomiales en comparación con modelos lineales y exponenciales, alcanzando coeficientes de determinación (R^2) de hasta 0.97.

En contraste con la técnica gravimétrica por secado en horno, este estudio busca complementar la evidencia existente sobre la relativa robustez del sensor SEN0193 de ultra bajo costo para la estimación del contenido de agua gravimétrico, como se ha demostrado previamente (Agustirandi et al., 2024), bajo una caracterización específica del suelo. Este trabajo se motiva y desarrolla en respuesta a la falta de documentación sobre la aplicabilidad del sensor SEN0193 en materiales no cohesivos utilizados en la construcción de carreteras.

En este estudio, el contenido de humedad gravimétrico (GWC) se determina respecto a la masa seca de la muestra base (400 g). La unidad experimental corresponde a cada combinación única de sensor, nivel de humedad y repetición de preparación física de la muestra (n = 5 repeticiones con reposo de 5 minutos), mientras que las 200 lecturas consecutivas registradas en cada ensayo se consideran repeticiones técnicas de dicha unidad experimental. El análisis estadístico detallado se realiza sobre el conjunto de 10,000 lecturas correspondientes al nivel de 0% de humedad como caso representativo del comportamiento del sistema, mientras que el ajuste de los modelos de calibración se realizó utilizando los valores promedio de cada medición a lo largo de los seis niveles de humedad, proporcionando grados de libertad para la estimación de los coeficientes.

Este trabajo busca contribuir a la validación experimental del uso de sensores capacitivos de bajo costo en materiales granulares con aplicaciones ingenieriles (Rahman, 2017; Schwamback et al., 2023; Nagahage et al., 2019; ASTM International, 2015; Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016), destacando su potencial como herramienta complementaria a métodos tradicionales, así como identificar las limitaciones asociadas a su implementación en condiciones reales.

2. Materiales y Métodos

Se extrajo una muestra de 3 kg de agregado de arena triturada de la región de Culiacán, Sinaloa (latitud 24.8091° N, longitud 107.39° O; México), para caracterizar sus parámetros morfológicos y físicos. Se realizaron análisis granulométricos por tamizado con el fin de cuantificar la masa que pasa a través de cada malla y compararla con una referencia basada en la norma ASTM D1241. Adicionalmente, el estudio se complementó mediante la medición de las áreas proyectadas de la fase sólida utilizando un microscopio digital (Microscope LED Light), con el propósito de complementar la distribución de tamaño de partícula observada en el análisis granulométrico. Finalmente, se determinó el ángulo de reposo (φ) para proporcionar una

estimación indirecta de la fricción del material estudiado. Los análisis de caracterización se llevaron a cabo utilizando arena sin fase líquida como material base, con el objetivo de caracterizar el material en condiciones secas.

2.1 Granulometría

Se emplearon siete tamices estándar ASTM–AASHTO (proveedor ALCON) para la realización de los ensayos granulométricos. Los números de tamiz utilizados (Figura 1), de acuerdo con la recomendación de la norma ASTM D1241, fueron 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200, correspondientes a aberturas de 4.75, 2.36, 1.18, 0.60, 0.30, 0.15 y 0.075 mm, respectivamente. El proceso de tamizado se llevó a cabo mediante un equipo de vibración mecánica, modelo FII-114 (FIICSA), operado durante 10 minutos a nivel 3 de intensidad en cada uno de los tres ensayos realizados.

Los ensayos se efectuaron utilizando arena previamente acondicionada, la cual fue sometida a un proceso de secado en horno a 110 °C durante 7 días, con el propósito de eliminar la fase líquida y trabajar exclusivamente con la fase sólida. Para cada ensayo de tamizado se utilizaron muestras de 1 kg de material. La determinación de masas se realizó mediante una balanza electrónica de precisión, modelo 102317 (TRUPER), con una resolución mínima de 0.1 g.

Con el fin de mejorar la exactitud de las mediciones, se emplearon dos balanzas digitales con diferentes niveles de precisión. Una balanza OHAUS PA163, con resolución de 1 mg, se utilizó para registrar la masa retenida en los tamices de mayor abertura (4.75 y 2.36 mm), mientras que la balanza electrónica de precisión se utilizó para los tamices restantes. A partir de estos datos, se calcularon los porcentajes de masa pasante para cada tamiz, los cuales fueron comparados con las cinco graduaciones establecidas en la norma. Como resultado, el material analizado presentó una caracterización granulométrica que corresponde principalmente a la graduación No. 3 según dicha normativa.



Figura 1. Equipo para tamizado automático modelo FII-114 (FIICSA).

2.2 Análisis de imagen de morfología

De manera complementaria al análisis granulométrico, se adquirieron 40 imágenes con una resolución de 1920 × 1080 px (equivalente a 5.96 × 3.35 mm, bajo una calibración de 322.2938 px/mm, utilizando muestras de 2 g de arena previamente acondicionada, dispersas de forma uniforme sobre una caja Petri.

Las áreas proyectadas de las partículas sólidas con diámetros mayores a 25 μm fueron determinadas mediante el software ImageJ, empleando un procedimiento de delimitación manual de los contornos de cada partícula (Figura 2). Este análisis permitió complementar la caracterización granulométrica mediante una evaluación directa de la geometría de las partículas.

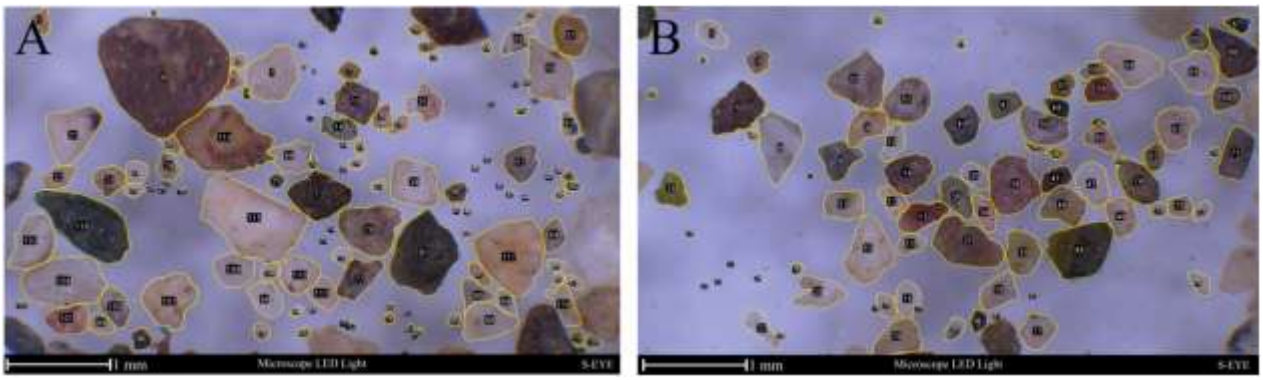


Figura 2. Análisis de imagen de contorno y área proyectada de partículas.

2.3 Ángulo de reposo

De manera complementaria, se determinó el ángulo de reposo (φ) como parámetro de la fricción del material granular. Este se calculó a partir de la relación entre la altura y el radio del cono formado, siguiendo metodologías reportadas en la literatura (Geldart et al., 2006).

El procedimiento consistió en la caída libre de 100 g de arena previamente acondicionada a través de un embudo de vidrio (diámetro inferior de 8 mm y longitud de cuello de 100 mm), formando un cono sobre una superficie de vidrio tras una altura de caída de 100 mm. La altura del cono se midió con un medidor digital (Mitutoyo 570-312), mientras que el radio promedio se determinó con un vernier digital. Adicionalmente, se capturaron imágenes laterales para documentar la geometría del depósito (Figura 3).

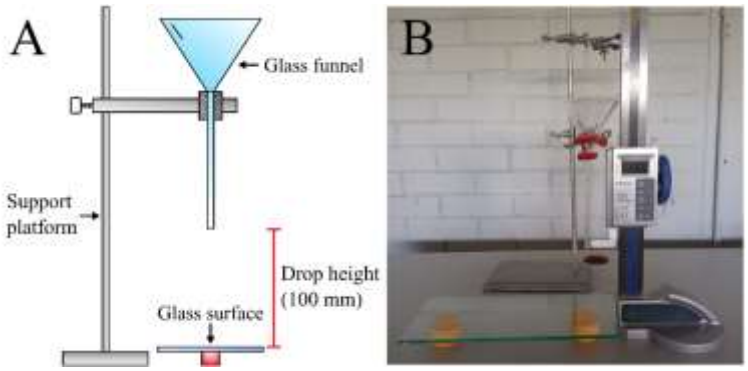


Figura 3. Arreglo para determinación de ángulo de reposo. A) Diagrama esquemático, B) Experimento.

2.4 Adquisición de Datos

El sistema de adquisición de datos se implementó mediante una tarjeta Arduino DUE (Arduino, 2026) en conjunto con el sensor de humedad SEN0193 (Figura 4). Las señales analógicas fueron digitalizadas utilizando el convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits integrado en el microcontrolador Atmel SAM3X8E, y posteriormente almacenadas en tiempo real en una hoja de cálculo mediante el complemento Data Streamer.

La salida del sensor depende tanto del medio circundante como de la resistencia de los conectores. El voltaje de salida está determinado por un circuito temporizador basado en un TL555I, operando a frecuencias cercanas a 1.5 MHz (Placidi et al., 2020), donde la señal se ve influenciada por la permitividad del medio a través de cambios

en la capacitancia del sistema. Asimismo, la resistencia de los conectores introduce caídas de voltaje que afectan la magnitud de la señal, por lo que estas fueron medidas utilizando un medidor HRM-10, marca FNIRSI (Figura 5).

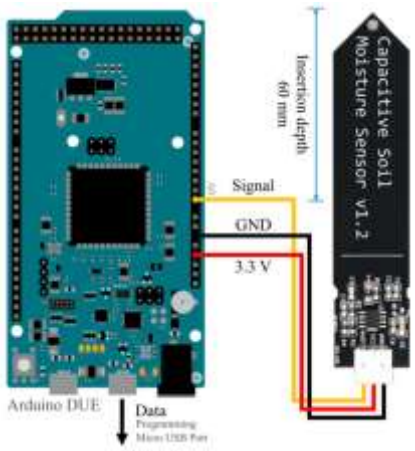


Figura 4. Diagrama esquemático de conexión del sensor SEN0193.

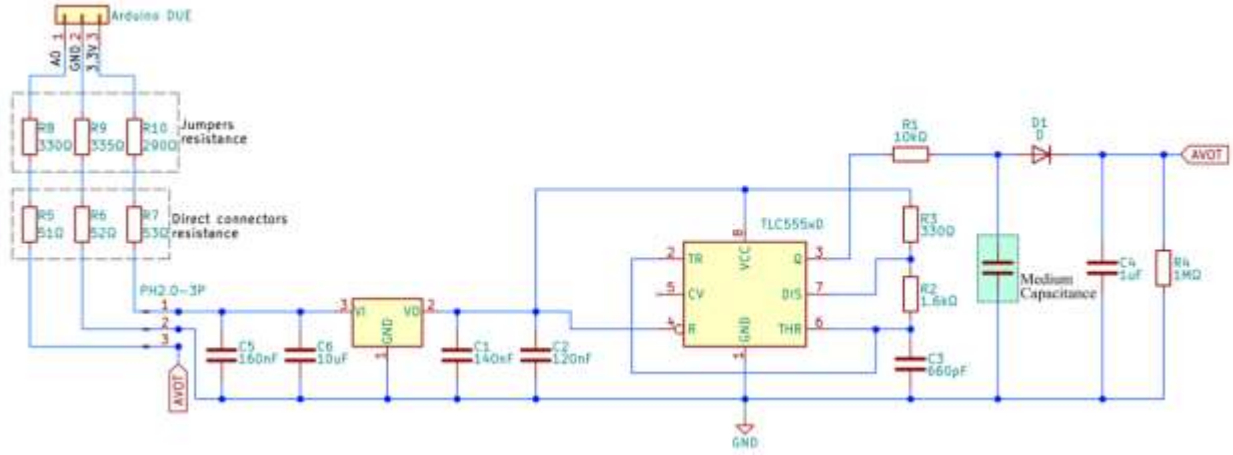


Figura 5. Diagrama interno del sensor SEN0193.

2.5 Preparación de las muestras

La primera etapa consistió en la eliminación de la fase líquida (humedad ambiental) del material. Para ello, se emplearon 3 kg de arena, los cuales fueron sometidos a secado en horno a 110 °C durante 168 horas. Posteriormente, la arena se transfirió a un recipiente de polipropileno (PP) de 5 L herméticamente cerrado durante 24 horas, con el fin de permitir su estabilización térmica a condiciones ambientales. Finalmente, el material seco se almacenó en un contenedor sellado para evitar la reabsorción de humedad. Para calcular el porcentaje de agua, se obtuvo el contenido de agua gravimétrico (GWC) a través de la Ec. (1) como:

$$\mathrm{GWC} = \frac{m_A}{m_S} \times 100 \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde m_A es la masa de agua y m_S es la masa de suelo seco. Los ensayos se realizaron con una masa base de 400 g de arena con diferentes niveles de GWC. Las pruebas experimentales consistieron en siete niveles de GWC: 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 % (0, 20, 40, 60, 80, 100 y 120 g de agua, respectivamente). El agua utilizada presentó un pH de 7.25 ± 0.1, medido con un equipo HI98129 (Hanna Instruments).

Las mezclas se prepararon en recipientes de polipropileno (Ø75 × 135 mm) y, una vez alcanzado el contenido de humedad deseado, se sometieron a agitación en el equipo FII-114

durante 5 minutos a nivel 3, con el fin de homogenizar la distribución del agua en el material (Figura 6).

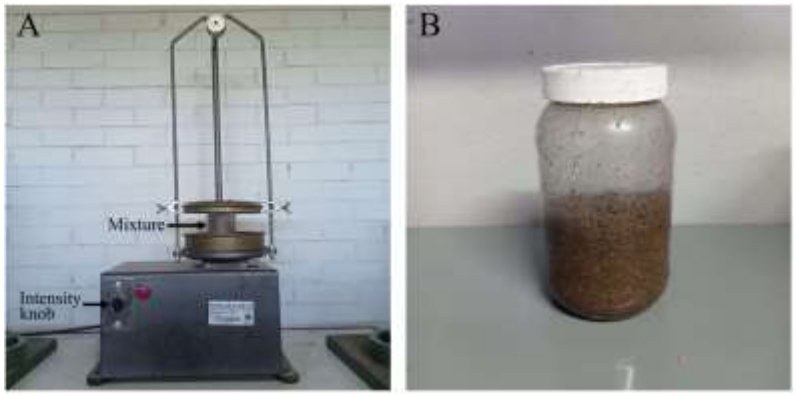


Figura 6. A) Tamizadora eléctrica automática y B) Muestra preparada con porcentaje de agua.

Previo a la medición de humedad, se implementó un procedimiento para asegurar una distribución homogénea de la fase líquida entre ensayos. Debido a la sensibilidad de los sensores capacitivos al nivel de contacto, la rugosidad superficial y el nivel de compactación (Placidi et al., 2020), el procedimiento consistió en someter el contenedor a caídas libres repetidas desde una altura de 50 mm, medida con un calibrador de altura Mitutoyo 570-312.

Se definieron dos tipos de repeticiones: 200 caídas posteriores a la etapa de vibración, y 100 caídas adicionales tras cada cambio de sensor, con el fin de mantener condiciones consistentes de medición (Figura 7).

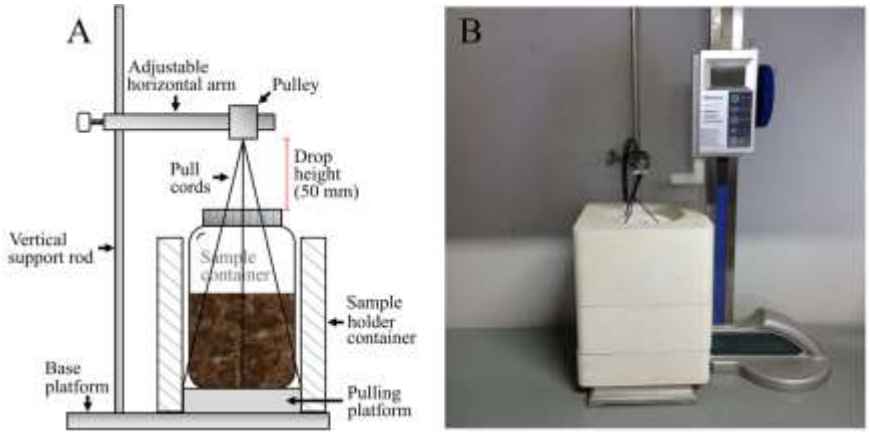


Figura 7. A) Esquema de arreglo de compactación de muestras y B) Experimento físico.

La recolección de datos consistió en emplear las siete muestras distintas de agregado triturado con GWC específicos para evaluar la consistencia de las lecturas a través del intercambio de 10 sensores. Las lecturas del ADC se registraron cada 500 ms, obteniéndose 200 lecturas por ensayo (1 min 40 s), con cinco repeticiones por condición. La profundidad a la que se sometieron los sensores fue de 60 mm (indicada en la Figura 4).

El número total de observaciones por nivel de humedad se obtuvo del producto entre 10

sensores, 5 repeticiones y 200 lecturas por ensayo (10,000 datos por nivel). Previo a cada medición, las muestras se dejaron reposar durante 10 minutos para favorecer una distribución homogénea de la humedad en la zona de medición.

2.6 Análisis de datos

El análisis de los datos se realizó en MATLAB. Para cada nivel de humedad (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 % GWC) se adquirieron 5 corridas de 200 lecturas del ADC por sensor, es decir, 1,000 lecturas por sensor, 10,000 por nivel y 70,000 en total. La estadística descriptiva y las pruebas de normalidad se aplicaron a las lecturas del nivel de 0% de humedad (10,000 datos), tomado como referencia; para el análisis de los modelos se emplearon los promedios por sensor y nivel (70 valores). Los valores atípicos se identificaron mediante el Z-score (ver Ec. (2)) (Triola, 2009):

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \qquad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde z representa el número de desviaciones estándar por encima o por debajo de la media, x es el valor individual de la medición y μ y σ corresponden a la media y la desviación estándar, respectivamente, estimadas por cada corrida de 200 lecturas. En este estudio, se evaluaron tres umbrales, $|z| \leq 1.96$, 2.58 y 3.29, que corresponden a niveles de confianza de 95, 99 y 99.9 % de una distribución normal. Los umbrales se definieron a priori a partir de estos cuantiles, y se evaluaron los tres para analizar la sensibilidad de los resultados al criterio de filtrado. El filtrado se justifica porque los datos sin filtrar presentan valores extremos de 3.1 a 6.5 desviaciones estándar respecto a la media de cada sensor, mayores a las 3.4 esperadas en 1,000 lecturas asumidas gaussianas.

Para cada conjunto de datos se calcularon la media (μ), la mediana (M), la desviación estándar (σ), la varianza (σ^2), el coeficiente de variación (CV), el número de valores atípicos detectados (#OL), el mínimo y el máximo.

La normalidad se evaluó con las pruebas de Shapiro–Wilk, Jarque–Bera, Anderson–Darling, Lilliefors y D'Agostino, aplicadas a cada corrida de 200 lecturas, con los datos sin filtrar y con los datos filtrados con cada uno de los tres umbrales de Z-score. La decisión se tomó con niveles de significancia (α) de 0.05 para las pruebas y criterios, de modo que las diferencias entre criterios reflejen el efecto del filtrado y no un cambio en el criterio de rechazo. Se reportan los valores *p* y la tasa de aceptación, definida como el porcentaje de las 50 corridas (10 sensores × 5 corridas) en que no se rechazó la normalidad.

2.7 Modelos de ajuste

El ajuste de modelos se realizó en MATLAB utilizando la función incorporada *lsqcurvefit*, la cual estima los coeficientes de una función no lineal, en este caso exponenciales y polinomiales, mediante un algoritmo basado en el método de mínimos cuadrados (Ec. (3)):

$$\min_{\boldsymbol{x}} \sum_i \left(F\left(x, x_{value,i}\right) - y_{value,i}\right)^2 \qquad \textbf{(Ec. 3)}$$

Donde x es el vector de coeficientes del modelo no lineal F, mientras que $x_{value,i}$ y $y_{value,i}$ corresponden a las variables de entrada (GWC) y salida (valores ADC), respectivamente. El criterio definido en la Ec. (3) se aplicó a los dos modelos no lineales previamente establecidos. Estas métricas se calcularon utilizando como referencia el ajuste previo de la curva correspondiente. Las definiciones empleadas para el cálculo de cada una de las medidas estadísticas se presentan en las Ec (4) y (5):

$$R^2 = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADC_i}-\bar{C}_{ADC}\right)\left(C_{ADCR_i}-\bar{C}_{ADCR}\right)\right|^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADC_i}-\bar{C}_{ADC}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADCR_i}-\bar{C}_{ADCR}\right)^2} \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\text{GDL}}\sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADC_i} - C_{ADCR_i}\right)^2} \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|C_{ADC_i} - C_{ADCR_i}\right| \quad \textbf{(Ec. 6)}$$

Donde *n* representa el tamaño de la muestra, que en este caso corresponde a los valores en unidades de código ADC representativos de cada nivel de humedad; C_{ADC_i}y C_{ADCR_i}denotan el valor medido representativo y el valor estimado por el modelo ajustado para el nivel de humedad *i*, respectivamente, expresados en unidades de código; mientras que $\bar{C}_{ADC}$y $\bar{C}_{ADCR}$ corresponden a las medias globales de los valores medidos y estimados por el modelo, respectivamente, para los niveles de humedad; GDL representa los grados de libertad.

Los coeficientes de los modelos se estimaron mediante optimización no lineal por mínimos cuadrados (función *lsqcurvefit* incorporada de Optimization Toolbox, MATLAB). El orden del polinomio fue predefinido a tercer y cuarto grado con tal de capturar adecuadamente la curvatura no lineal de la respuesta del sensor dentro del rango de calibración evaluado (0–25 % GWC). Por tratarse de un ajuste empírico, su validez se restringe al intervalo de humedad evaluado.

3. Resultados

3.1 Propiedades físicas del material granular

Los resultados de la caracterización física muestran que las curvas granulométricas 2 y 3 se ubican dentro de los límites de la graduación No. 3 de la norma ASTM D1241 (Figura 8, Tabla 1). En la muestra 1, el porcentaje que pasa la malla No. 200 (5.779%) excede el máximo de 5% especificado, por lo que esta muestra no cumple con dicho requisito. Cabe precisar que la evaluación se limitó al criterio granulométrico y no incluyó otras propiedades exigidas por la norma (límites de Atterberg), por lo que los resultados son válidos únicamente para las muestras y condiciones ensayadas. A partir de un total de 1,057 partículas medidas, los sólidos se clasificaron en intervalos de 0.05 mm² para generar un diagrama de frecuencia y distribución (Figura 9). Se observó una mayor concentración de partículas con áreas menores a 0.2 mm², lo cual es consistente con los resultados obtenidos en las curvas granulométricas.

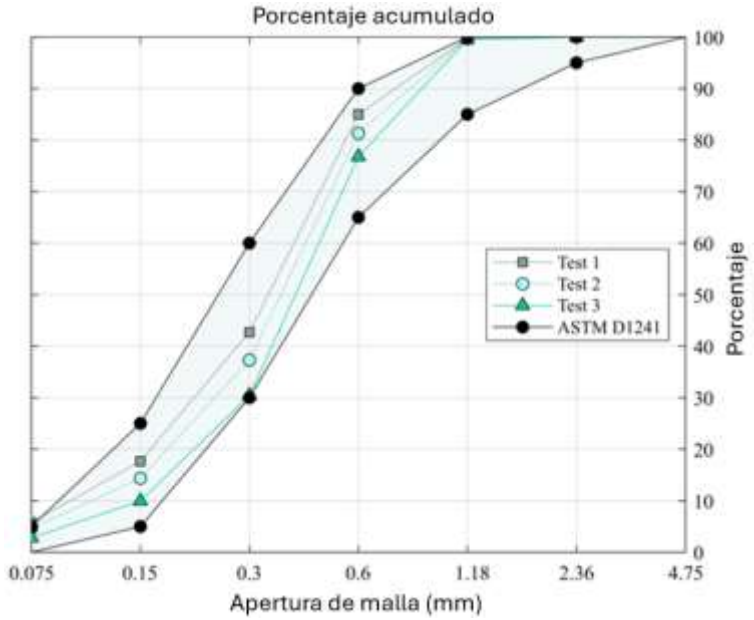


Figura 8. Curva granulométrica de material de estudio.

Tabla 1. Retención por tamaño de partícula.

Malla	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	ASTM D1241	
				Min	Max
4.75 mm (No. 4)	100	99.9	100	100	100
2.36 mm (No. 8)	99.9	99.9859	99.9950	95	100
1.18 mm (No. 16)	99.7379	99.6671	99.5309	85	100
600 µm (No. 30)	85.00	81.33	76.79	65	90
300 µm (No. 50)	42.6950	37.2987	30.4258	30	60
150 µm (No. 100)	17.6559	14.3642	9.9621	5	25
75 µm (No. 200)	5.7790	4.6711	2.7978	0	5

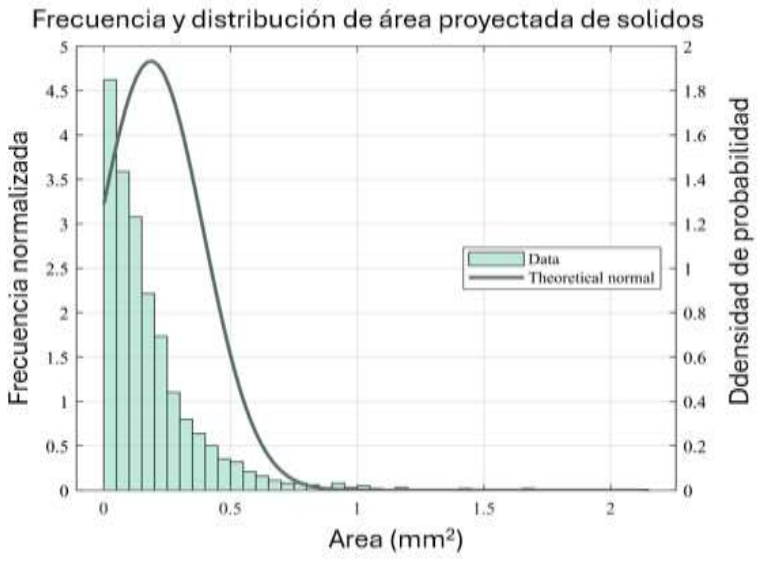


Figura 9. Distribución de área de sólidos.

Se utilizó ImageJ para ajustar el contraste y la saturación, con el fin de mejorar la visualización de los contornos de la arena. Los perfiles obtenidos se presentan junto con la representación gráfica del ángulo de reposo (φ) y sus valores correspondientes (Figura 10, Tabla 2). En la determinación del ángulo de reposo, los ensayos se realizaron por triplicado, obteniéndose un rango de variación de 1.3° y un valor promedio de 29.58°. Este resultado es comparable con el valor reportado en la referencia [22], con una diferencia de 4.42°.

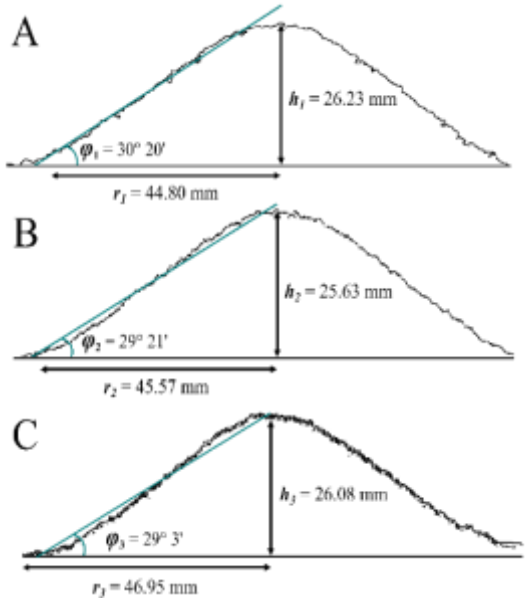


Figura 10. Perfiles en caída libre de área para determinación de ángulo de reposo.

Tabla 1. Radio, Altura y Angulo de reposo φ.

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Radio (mm)	44.805	45.57	46.95
Altura (mm)	26.23	25.63	26.08
φ (°)	30.35	29.35	29.05

3.2 Análisis de las mediciones del sensor

Una vez obtenidos los 70,000 datos provenientes de los 10 sensores, se realizó el análisis estadístico. En primer lugar, se compararon las distribuciones de las cinco repeticiones para cada sensor. Como se muestra en la Figura 11, las medias se ubicaron en un rango de 3054.0 a 3143.43, con una diferencia máxima de 89.4, lo que representa menos del 2.5% del valor máximo registrado (4095).

Asimismo, los resultados indican que el filtrado de datos mediante distintos niveles de confianza no modifica significativamente los valores medios (Figura 12, Tablas 3–5). En particular, las diferencias entre las medias de las cinco repeticiones para cada sensor individual fueron inferiores al 0.254% del rango total de medición, lo que evidencia una alta consistencia en las mediciones. Cabe aclarar que las 200 lecturas consecutivas que conforman cada una de estas repeticiones no se interpretan como observaciones estadísticamente independientes, sino como una serie temporal de una misma unidad experimental. Esto debido a la autocorrelación en el retardo 1 (*lag*-1) de las 200 lecturas: el valor promedio fue de 0.05 (rango −0.16 a 0.34), y en 8 de las 50 corridas superó el umbral de significancia ($\pm 1.96/\sqrt{200} \approx 0.14$). Además, se detectó una tendencia lineal significativa ($p < 0.05$) en 23 de 50 corridas, con una deriva mediana de 1.2 cuentas en 200 lecturas.

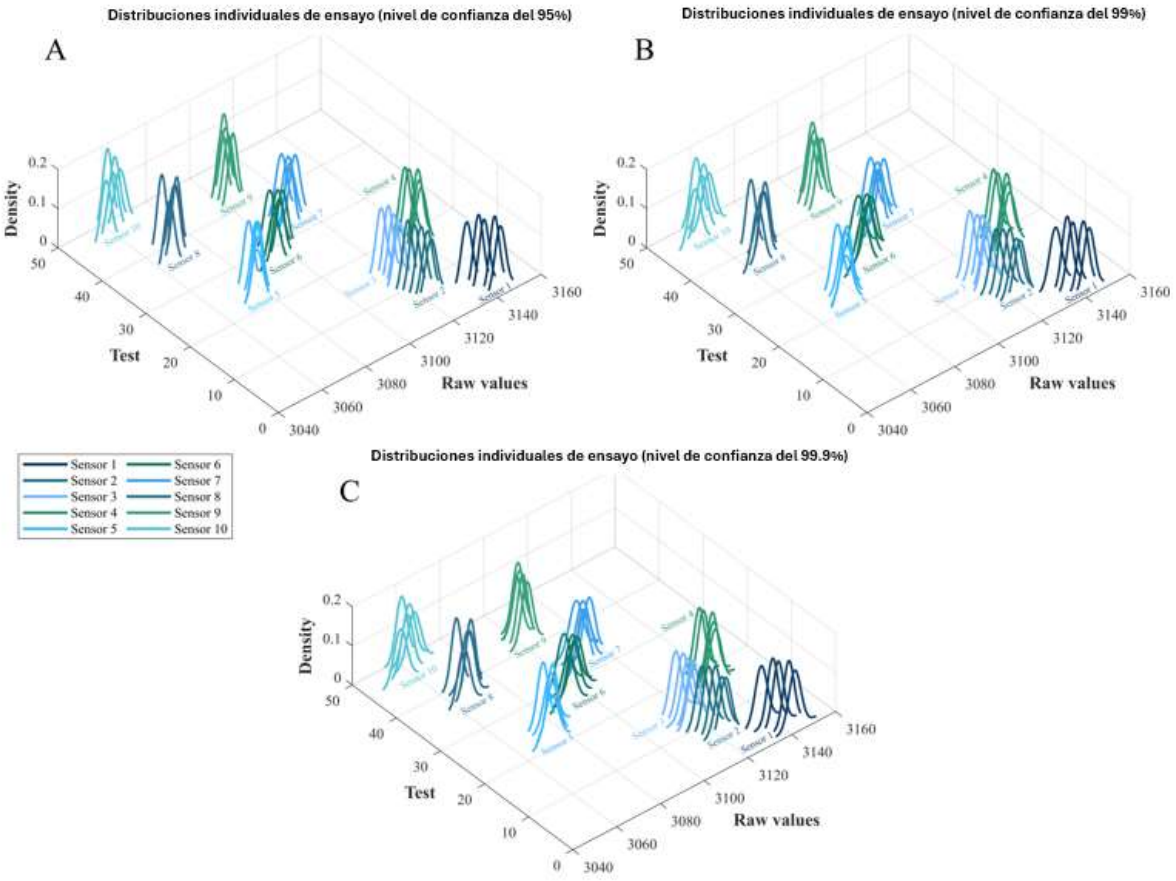


Figura 11. Distribuciones de densidad para cada ensayo en diferentes niveles de confianza: (A) 95%, (B) 99% y (C) 99.9%.

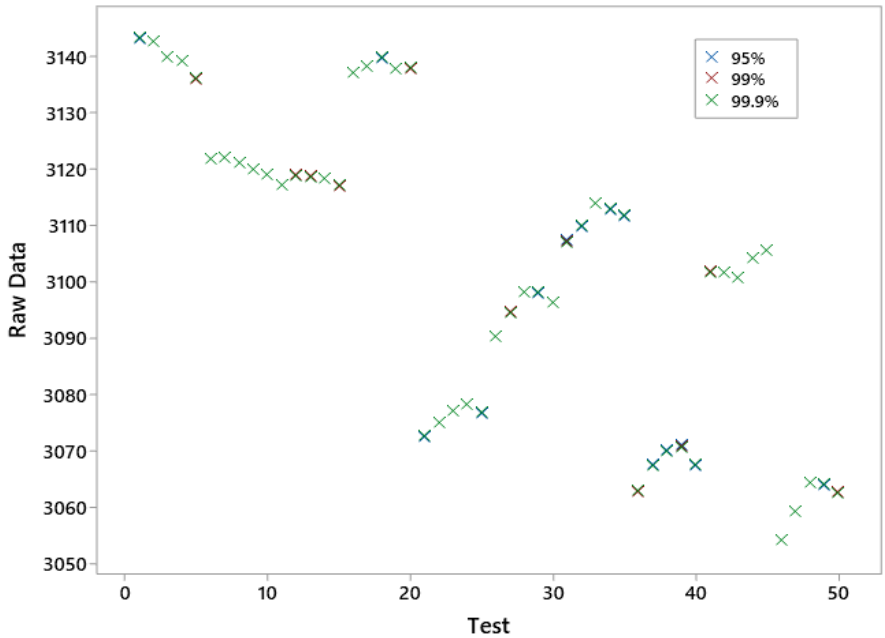


Figura 12. Comparación de las medias entre las cinco repeticiones de cada uno de los diez sensores en niveles de confianza del 95%, 99% y 99.9%.

3.3 Pruebas de normalidad

El análisis estadístico de las señales crudas (*Raw Data*) obtenidas por los diez sensores SEN0193 muestra que la aproximación a la distribución gaussiana depende de la prueba aplicada y del criterio de filtrado empleado. Se aplicaron cinco pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk, Jarque–Bera, Anderson–Darling, Lilliefors y D'Agostino), con α = 0.05, a 50 subgrupos de 200 lecturas por criterio (5 corridas por sensor, 10,000 lecturas en total), para analizar cómo el filtrado de valores atípicos basado en el Z-score influye en la representatividad de la muestra. El umbral Z-95% ($|z| > 1.96$) excluyó el 4.2% de los datos y produjo las menores tasas de aceptación (80% en Jarque–Bera y 38% en D'Agostino), lo que sugiere que un umbral tan restrictivo trunca las colas y altera la forma de la distribución. Con Z-99% (1.24% de datos excluidos) las tasas fueron de 98% y 80%, y con Z-99.9% (0.45% excluido) de 94% y 92%, valores cercanos al 95% esperado bajo normalidad, por lo que este último fue el criterio que menos alteró la distribución original.

Sin filtrar, las tasas de aceptación fueron de 54% en Jarque–Bera y 56% en D'Agostino, frente a 94% y 92% con Z-99.9%, por lo que el filtrado de valores extremos mejora la aproximación a la normalidad en asimetría y curtosis.

Sin embargo, Shapiro–Wilk, Anderson–Darling y Lilliefors rechazaron la normalidad en 98–100 % de los subgrupos con todos los criterios de filtrado. En consecuencia, los datos son consistentes con una distribución gaussiana en términos de asimetría y curtosis, pero no puede afirmarse normalidad estricta, un resultado que podría atribuirse en parte a la resolución discreta del convertidor analógico-digital.

Dentro de cada corrida, las lecturas digitales presentan fluctuaciones de baja amplitud (σ de aproximadamente 2.2–3.3 cuentas del ADC; coeficientes de variación por corrida de 0.07 a 0.11 %) y una asimetría y curtosis compatibles con una distribución aproximadamente gaussiana, aunque esto no se confirmó en todas las pruebas de normalidad. Este comportamiento es consistente con ruido aleatorio de medición (posible error de cuantización del ADC). Por otro lado, las medias por corrida de un mismo sensor variaron hasta 10.3 cuentas, lo cual sugiere una componente de deriva o variabilidad entre corridas, y se refleja en coeficientes de variación por sensor de 0.09 a 0.16 %. Estos valores indican repetibilidad de cada dispositivo en condición de 0% de humedad, aunque la desviación estándar entre sensores fue de 28 cuentas (diferencia máxima ≈ 80), frente a 3–5 cuentas dentro de cada sensor.

La diferencia entre las pruebas se explica por lo que evalúa cada una. Jarque–Bera y D'Agostino se basan únicamente en la asimetría y la curtosis, por lo que fueron las que más aceptaron la normalidad (94% y 92% con Z-99.9%). En cambio, Shapiro–Wilk, Anderson–Darling y Lilliefors comparan la forma completa de la distribución con la de una normal y son más sensibles a desviaciones en el centro y en las colas, así como a la discretización de las lecturas, por lo que rechazaron la normalidad en 98–100 % de los subgrupos con todos los criterios. Con una resolución de una cuenta y σ de aproximadamente 2.5 cuentas, la función de distribución empírica de las lecturas del ADC es escalonada, lo que puede producir rechazos aun cuando el ruido subyacente sea gaussiano. Por su parte, el umbral Z-95% ($|z| > 1.96$) descarta por construcción cerca del 5% de los datos incluso en una distribución normal, lo que trunca las colas y altera la forma de la distribución; por ello fue el criterio con las menores tasas de aceptación (80% en Jarque–Bera y 38% en D'Agostino).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para los ensayos al 0% de humedad (nivel de significancia α de 0.05).

Test	OL	μ	M	σ^2	σ	CV	Shapiro-Wilk			Jarque-Bera		Anderson-Darling		Lilliefors		D'Agostino		
							h	p	W	h	p	h	p	h	p	h	p	K^2
Y11	6	3143.31	3143	5.92	2.43	0.00077	⊗	0.00267	0.977	✓	0.188	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0845	4.94
Y21	9	3142.72	3143	4.79	2.19	0.00070	⊗	0.00027	0.969	✓	0.205	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1041	4.52
Y31	6	3139.89	3140	5.26	2.29	0.00073	⊗	0.00053	0.971	✓	0.229	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1859	3.37
Y41	6	3139.39	3139	4.95	2.23	0.00071	⊗	0.00011	0.966	✓	0.062	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0017	12.76
Y51	9	3136.01	3136	6.07	2.46	0.00079	⊗	0.00038	0.970	✓	0.112	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0373	6.58
Y12	3	3121.79	3122	6.90	2.63	0.00084	⊗	0.00006	0.964	⊗	0.030	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	24.24
Y22	10	3122.14	3122	6.00	2.45	0.00078	⊗	0.00057	0.971	✓	0.151	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1170	4.29
Y32	4	3121.20	3121	5.63	2.37	0.00076	⊗	0.00112	0.974	✓	0.169	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0696	5.33
Y42	6	3120.06	3120	5.57	2.36	0.00076	⊗	0.00086	0.973	✓	0.138	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0424	6.32
Y52	12	3119.15	3119	5.28	2.30	0.00074	⊗	0.00008	0.963	✓	0.066	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0189	7.94
Y13	7	3117.29	3117	6.44	2.54	0.00081	⊗	0.00016	0.967	⊗	0.043	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0003	16.01
Y23	4	3118.98	3119	6.40	2.53	0.00081	⊗	0.00045	0.971	✓	0.088	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0109	9.04
Y33	6	3118.76	3119	5.81	2.41	0.00077	⊗	0.00046	0.971	✓	0.099	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0136	8.60
Y43	14	3118.33	3118	4.90	2.21	0.00071	⊗	0.00016	0.966	✓	0.050	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0004	15.84
Y53	8	3117.02	3117	5.56	2.36	0.00076	⊗	0.00038	0.970	✓	0.166	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1064	4.48
Y14	7	3137.23	3137	6.80	2.61	0.00083	⊗	0.00257	0.977	✓	0.141	⊗	0.0015	⊗	0.002	✓	0.0506	5.97
Y24	7	3138.40	3138	6.14	2.48	0.00079	⊗	0.00113	0.974	✓	0.088	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0086	9.51
Y34	7	3139.84	3140	5.16	2.27	0.00072	⊗	0.00061	0.972	✓	0.100	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0154	8.35
Y44	6	3137.79	3138	5.25	2.29	0.00073	⊗	0.00063	0.972	✓	0.106	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0179	8.05
Y54	5	3137.98	3138	5.54	2.35	0.00075	⊗	0.00016	0.967	✓	0.056	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0009	13.97
Y15	14	3072.45	3073	7.68	2.77	0.00090	⊗	0.00112	0.973	✓	0.109	⊗	0.0008	⊗	0.001	⊗	0.0188	7.95
Y25	14	3075.01	3075	6.14	2.48	0.00081	⊗	0.00007	0.962	⊗	0.045	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0039	11.11
Y35	6	3077.01	3077	4.69	2.17	0.00070	⊗	0.00001	0.954	⊗	0.026	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	27.12
Y45	15	3078.14	3078	5.31	2.30	0.00075	⊗	0.00184	0.975	✓	0.405	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3777	1.95
Y55	7	3076.64	3077	5.43	2.33	0.00076	⊗	0.00009	0.965	✓	0.051	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0009	14.00
Y16	8	3090.22	3090	7.88	2.81	0.00091	⊗	0.00156	0.975	✓	0.219	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1508	3.78
Y26	7	3094.56	3095	6.41	2.53	0.00082	⊗	0.00208	0.976	✓	0.294	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.2809	2.54
Y36	10	3098.16	3098	6.19	2.49	0.00080	⊗	0.00041	0.970	✓	0.088	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0120	8.85
Y46	9	3097.96	3098	6.73	2.59	0.00084	⊗	0.00187	0.975	✓	0.148	⊗	0.0009	⊗	0.001	✓	0.0567	5.74
Y56	9	3096.27	3096	7.13	2.67	0.00086	⊗	0.00144	0.974	✓	0.476	⊗	0.0012	⊗	0.001	✓	0.4842	1.45
Y17	10	3107.34	3107	5.09	2.26	0.00073	⊗	0.00003	0.960	⊗	0.036	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	21.39
Y27	8	3109.80	3110	7.13	2.67	0.00086	⊗	0.00015	0.966	⊗	0.047	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0003	16.19
Y37	7	3113.94	3114	5.98	2.44	0.00078	⊗	0.00197	0.976	✓	0.298	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2348	2.90
Y47	11	3112.86	3113	6.77	2.60	0.00084	⊗	0.00028	0.968	✓	0.071	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0044	10.84
Y57	10	3111.74	3112	6.66	2.58	0.00083	⊗	0.00010	0.964	✓	0.123	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0678	5.38
Y18	10	3062.71	3063	5.50	2.35	0.00077	⊗	0.00013	0.966	✓	0.075	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0037	11.18
Y28	9	3067.38	3068	4.45	2.11	0.00069	⊗	0.00003	0.960	✓	0.050	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0233	7.52
Y38	7	3069.99	3070	4.27	2.07	0.00067	⊗	<0.00001	0.952	⊗	0.025	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	23.42
Y48	10	3070.87	3071	6.21	2.49	0.00081	⊗	0.00018	0.967	⊗	0.050	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0004	15.90
Y58	8	3067.24	3067	4.39	2.10	0.00068	⊗	0.00005	0.962	✓	0.128	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0529	5.88
Y19	10	3101.77	3102	4.59	2.14	0.00069	⊗	0.00026	0.968	✓	0.145	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0972	4.66
Y29	3	3101.70	3102	5.33	2.31	0.00074	⊗	0.00095	0.974	✓	0.432	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4333	1.67
Y39	9	3100.65	3100	5.07	2.25	0.00072	⊗	0.00006	0.963	✓	0.097	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0336	6.78
Y49	6	3104.31	3104	5.68	2.38	0.00076	⊗	0.00004	0.962	⊗	0.036	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	21.59
Y59	12	3105.64	3105.5	4.37	2.09	0.00067	⊗	0.00044	0.970	✓	0.293	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2659	2.65
Y110	14	3053.91	3054	5.89	2.43	0.00079	⊗	0.00056	0.970	✓	0.072	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0050	10.59
Y210	6	3059.05	3059	6.10	2.47	0.00080	⊗	0.00014	0.966	✓	0.085	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0079	9.67
Y310	7	3064.24	3065	7.49	2.74	0.00089	⊗	0.00017	0.967	⊗	0.044	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0004	15.90
Y410	10	3063.88	3064	5.43	2.33	0.00076	⊗	0.00231	0.976	✓	0.350	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2922	2.46
Y510	12	3062.59	3063	4.57	2.14	0.00069	⊗	0.00017	0.966	✓	0.081	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0162	8.24

Nota: los símbolos "✓" y "⊗" indican no rechazo y rechazo de normalidad de pruebas, respectivamente; "OL" indica la cantidad de *outliers*; W es el estadístico de prueba de Shapiro-Wilk; K^2 es el estadístico ómnibus de D'Agostino-Pearson; el número de test 'Y' es designado como corrida + sensor.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para los ensayos al 0% de humedad (nivel de significancia α de 0.01).

Test	OL	μ	M	σ^2	σ	CV	Shapiro-Wilk			Jarque-Bera		Anderson-Darling		Lilliefors		D'Agostino		
							h	p	W	h	p	h	p	h	p	h	p	K^2
Y11	4	3143.38	3143	6.32	2.51	0.00080	⊗	0.00727	0.9802	✓	0.3479	⊗	0.0007	⊗	0.001	✓	0.3529	2.0833
Y21	3	3142.77	3143	5.55	2.36	0.00075	⊗	0.00317	0.9777	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5209	1.3043
Y31	3	3139.86	3140	5.72	2.39	0.00076	⊗	0.00295	0.9775	✓	0.4077	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4645	1.5338
Y41	4	3139.39	3139	5.21	2.28	0.00073	⊗	0.00078	0.9730	✓	0.1106	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0220	7.6296
Y51	2	3136.10	3136	7.25	2.69	0.00086	✓	0.01596	0.9828	✓	0.5000	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.6723	0.7940
Y12	1	3121.85	3122	7.22	2.69	0.00086	⊗	0.00017	0.9681	✓	0.0372	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0001	17.8169
Y22	1	3122.11	3122	7.70	2.78	0.00089	✓	0.01517	0.9827	✓	0.5000	⊗	0.0011	⊗	0.001	✓	0.6852	0.7561
Y32	2	3121.20	3121	6.00	2.45	0.00078	✓	0.01040	0.9815	✓	0.4354	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.4382	1.6500
Y42	1	3120.10	3120	6.46	2.54	0.00081	✓	0.01329	0.9823	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.6146	0.9735
Y52	3	3118.98	3119	6.84	2.62	0.00084	⊗	0.00057	0.9720	✓	0.0644	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0855	4.9182
Y13	2	3117.31	3117	7.17	2.68	0.00086	⊗	0.00254	0.9771	✓	0.0962	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0205	7.7784
Y23	1	3118.95	3119	6.85	2.62	0.00084	⊗	0.00374	0.9785	✓	0.1610	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.0636	5.5115
Y33	4	3118.75	3119	6.26	2.50	0.00080	⊗	0.00500	0.9791	✓	0.4723	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4980	1.3944
Y43	3	3118.42	3118	6.47	2.54	0.00082	✓	0.01166	0.9818	✓	0.3844	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.4256	1.7083
Y53	5	3117.05	3117	6.03	2.46	0.00079	⊗	0.00231	0.9765	✓	0.2871	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2917	2.4641
Y14	1	3137.24	3137	7.88	2.81	0.00089	✓	0.02245	0.9839	✓	0.3844	⊗	0.0061	⊗	0.003	✓	0.3866	1.9006
Y24	4	3138.37	3138	6.76	2.60	0.00083	✓	0.01401	0.9823	✓	0.3565	⊗	0.0009	⊗	0.001	✓	0.3549	2.0718
Y34	3	3139.91	3140	5.88	2.42	0.00077	⊗	0.00744	0.9804	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6304	0.9228
Y44	2	3137.80	3138	5.95	2.44	0.00078	⊗	0.00981	0.9813	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5797	1.0904
Y54	3	3137.98	3138	5.85	2.42	0.00077	⊗	0.00101	0.9740	✓	0.1179	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0263	7.2759
Y15	3	3072.49	3073	9.69	3.11	0.00101	✓	0.01406	0.9824	✓	0.3194	⊗	0.0067	⊗	0.002	✓	0.2523	2.7547
Y25	1	3074.93	3075	8.36	2.89	0.00094	⊗	0.00681	0.9803	✓	0.4415	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.5091	1.3501
Y35	1	3077.09	3077	5.25	2.29	0.00074	⊗	0.00030	0.9701	✓	0.0889	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0096	9.2967
Y45	4	3078.10	3078	7.18	2.68	0.00087	✓	0.01648	0.9827	✓	0.5000	⊗	0.0013	⊗	0.001	✓	0.9305	0.1441
Y55	2	3076.72	3077	6.03	2.46	0.00080	⊗	0.00151	0.9755	✓	0.1185	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0270	7.2229
Y16	3	3090.17	3090	9.10	3.02	0.00098	✓	0.01471	0.9825	✓	0.5000	⊗	0.0024	⊗	0.001	✓	0.8913	0.2302
Y26	3	3094.56	3095	7.22	2.69	0.00087	✓	0.01861	0.9832	✓	0.5000	⊗	0.0016	⊗	0.001	✓	0.6375	0.9005
Y36	2	3098.08	3098	7.55	2.75	0.00089	✓	0.01281	0.9822	✓	0.5000	⊗	0.0028	⊗	0.003	✓	0.5331	1.2582
Y46	4	3098.08	3098	7.82	2.80	0.00090	⊗	0.00753	0.9804	✓	0.2217	⊗	0.0022	⊗	0.001	✓	0.2859	2.5039
Y56	2	3096.24	3096	8.58	2.93	0.00095	✓	0.02708	0.9844	✓	0.5000	⊗	0.0028	⊗	0.002	✓	0.9797	0.0410
Y17	2	3107.12	3107	6.06	2.46	0.00079	⊗	0.00046	0.9714	✓	0.0927	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0215	7.6830
Y27	3	3109.90	3110	7.90	2.81	0.00090	⊗	0.00097	0.9739	✓	0.0669	⊗	0.0006	⊗	0.001	⊗	0.0052	10.5095
Y37	2	3113.96	3114	6.87	2.62	0.00084	✓	0.01037	0.9815	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.8821	0.2508
Y47	2	3113.01	3113	8.32	2.89	0.00093	⊗	0.00782	0.9807	✓	0.3631	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.3191	2.2847
Y57	5	3111.91	3112	7.61	2.76	0.00089	⊗	0.00072	0.9726	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6653	0.8152
Y18	3	3062.68	3063	6.70	2.59	0.00085	⊗	0.00646	0.9800	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6803	0.7704
Y28	3	3067.31	3068	5.34	2.31	0.00075	⊗	0.00046	0.9713	✓	0.0996	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1370	3.9761
Y38	1	3069.89	3070	4.88	2.21	0.00072	⊗	0.00019	0.9684	✓	0.1147	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0264	7.2661
Y48	1	3070.65	3071	7.65	2.77	0.00090	⊗	0.00257	0.9773	✓	0.1175	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0823	4.9954
Y58	1	3067.41	3067	5.06	2.25	0.00073	⊗	0.00073	0.9732	✓	0.3172	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2568	2.7186
Y19	5	3101.79	3102	5.30	2.30	0.00074	⊗	0.00574	0.9794	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6997	0.7143
Y29	1	3101.64	3102	5.60	2.37	0.00076	⊗	0.00279	0.9775	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6207	0.9539
Y39	2	3100.67	3100	5.96	2.44	0.00079	⊗	0.00076	0.9731	✓	0.2946	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2765	2.5713
Y49	2	3104.26	3104	6.15	2.48	0.00080	⊗	0.00049	0.9716	✓	0.0590	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0013	13.2534
Y59	3	3105.61	3105	5.57	2.36	0.00076	⊗	0.00257	0.9771	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.9850	0.0303
Y110	3	3053.95	3054	7.85	2.80	0.00092	✓	0.02814	0.9844	✓	0.4789	⊗	0.0039	⊗	0.001	✓	0.5540	1.1812
Y210	2	3059.05	3059	6.70	2.59	0.00085	⊗	0.00157	0.9756	✓	0.2025	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1067	4.4753
Y310	2	3064.22	3065	8.50	2.91	0.00095	⊗	0.00674	0.9802	✓	0.1971	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1174	4.2849
Y410	2	3063.96	3064	6.94	2.63	0.00086	✓	0.02803	0.9844	✓	0.5000	⊗	0.0017	⊗	0.001	✓	0.6929	0.7337
Y510	2	3062.53	3062.5	5.95	2.44	0.00080	⊗	0.00532	0.9795	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.8665	0.2866

Tabla 5. Estadísticos descriptivos para los ensayos al 0% de humedad (nivel de significancia α de 0.001).

Test	OL	μ	M	σ^2	σ	CV	Shapiro-Wilk			Jarque-Bera		Anderson-Darling		Lilliefors		D'Agostino		
							h	p	W	h	p	h	p	h	p	h	p	K^2
Y11	1	3143.43	3143	7.51	2.74	0.00087	✓	0.00181	0.9748	✓	0.0221	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.0234	7.5069
Y21	1	3142.70	3143	5.95	2.44	0.00078	✓	0.00508	0.9794	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.7718	0.5181
Y31	2	3139.90	3140	6.03	2.45	0.00078	✓	0.00584	0.9790	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.9677	0.0657
Y41	1	3139.35	3139	5.99	2.45	0.00078	✓	0.00353	0.9773	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5841	1.0755
Y51	1	3136.14	3136	7.62	2.76	0.00088	✓	0.02239	0.9839	✓	0.5000	✓	0.0015	⊗	0.001	✓	0.8508	0.3232
Y12	1	3121.85	3122	7.22	2.69	0.00086	⊗	0.00017	0.9681	✓	0.0372	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0001	17.8169
Y22	0	3122.07	3122	7.99	2.83	0.00091	✓	0.02076	0.9835	✓	0.4122	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.4321	1.6782
Y32	2	3121.20	3121	6.00	2.45	0.00078	✓	0.01040	0.9815	✓	0.4354	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.4382	1.6500
Y42	1	3120.10	3120	6.46	2.54	0.00081	✓	0.01329	0.9823	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.6146	0.9735
Y52	3	3118.98	3119	6.84	2.62	0.00084	⊗	0.00057	0.9720	✓	0.0644	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0855	4.9182
Y13	1	3117.28	3117	7.40	2.72	0.00087	✓	0.00440	0.9790	✓	0.1266	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.0685	5.3633
Y23	0	3118.92	3119	7.05	2.66	0.00085	✓	0.00861	0.9811	✓	0.2688	✓	0.0017	✓	0.002	✓	0.1805	3.4242
Y33	1	3118.70	3119	7.37	2.72	0.00087	✓	0.00155	0.9742	✓	0.0443	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0592	5.6553
Y43	2	3118.46	3118	6.81	2.61	0.00084	✓	0.01264	0.9821	✓	0.2997	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.3407	2.1533
Y53	3	3117.14	3117	6.69	2.59	0.00083	✓	0.00173	0.9744	✓	0.0531	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0541	5.8321
Y14	1	3137.24	3137	7.88	2.81	0.00089	✓	0.02245	0.9839	✓	0.3844	✓	0.0061	✓	0.003	✓	0.3866	1.9006
Y24	3	3138.42	3138	7.19	2.68	0.00085	✓	0.01196	0.9814	✓	0.5000	✓	0.0018	✓	0.001	✓	0.7491	0.5778
Y34	2	3139.95	3140	6.18	2.49	0.00079	✓	0.00488	0.9792	✓	0.3970	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4227	1.7221
Y44	2	3137.80	3138	5.95	2.44	0.00078	✓	0.00981	0.9813	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5797	1.0904
Y54	2	3138.03	3138	6.15	2.48	0.00079	✓	0.00205	0.9764	✓	0.4404	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4821	1.4592
Y15	0	3072.54	3073	10.63	3.26	0.00106	✓	0.08119	0.9877	✓	0.5000	✓	0.0135	✓	0.006	✓	0.7579	0.5544
Y25	1	3074.93	3075	8.36	2.89	0.00094	✓	0.00681	0.9803	✓	0.4415	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.5091	1.3501
Y35	0	3077.06	3077	5.41	2.33	0.00076	⊗	0.00095	0.9741	✓	0.1385	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0444	6.2280
Y45	0	3078.20	3078	8.55	2.92	0.00095	✓	0.00518	0.9788	✓	0.0879	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1290	4.0958
Y55	1	3076.68	3077	6.23	2.50	0.00081	✓	0.00374	0.9785	✓	0.1868	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1074	4.4630
Y16	1	3090.26	3090	9.79	3.13	0.00101	✓	0.03625	0.9853	✓	0.5000	✓	0.0026	⊗	0.001	✓	0.7665	0.5318
Y26	1	3094.55	3095	7.97	2.82	0.00091	✓	0.01752	0.9829	✓	0.2733	✓	0.0019	✓	0.001	✓	0.2714	2.6081
Y36	0	3098.08	3098	8.29	2.88	0.00093	✓	0.03713	0.9854	✓	0.5000	✓	0.0050	✓	0.001	✓	0.7915	0.4677
Y46	1	3098.13	3098	8.92	2.99	0.00096	✓	0.00954	0.9808	✓	0.1374	✓	0.0023	⊗	0.001	✓	0.1466	3.8404
Y56	1	3096.28	3096	8.92	2.99	0.00096	✓	0.03811	0.9855	✓	0.5000	✓	0.0029	✓	0.006	✓	0.8143	0.4107
Y17	0	3107.05	3107	6.58	2.56	0.00083	⊗	0.00068	0.9730	✓	0.1307	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1764	3.4702
Y27	0	3109.94	3110	8.75	2.96	0.00095	✓	0.01545	0.9829	✓	0.2891	✓	0.0024	⊗	0.001	✓	0.3188	2.2865
Y37	1	3113.92	3114	7.16	2.67	0.00086	✓	0.01137	0.9819	✓	0.5000	✓	0.0010	⊗	0.001	✓	0.9092	0.1905
Y47	1	3112.96	3113	8.79	2.96	0.00095	✓	0.01288	0.9823	✓	0.5000	✓	0.0013	⊗	0.001	✓	0.7427	0.5949
Y57	0	3111.95	3112	9.48	3.08	0.00099	✓	0.00181	0.9749	✓	0.1261	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1975	3.2441
Y18	0	3062.79	3063	7.47	2.73	0.00089	✓	0.00933	0.9808	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5532	1.1839
Y28	2	3067.36	3068	5.69	2.39	0.00078	⊗	0.00076	0.9713	✓	0.3675	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3598	2.0445
Y38	1	3069.89	3070	4.88	2.21	0.00072	⊗	0.00019	0.9684	✓	0.1147	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0264	7.2661
Y48	0	3070.61	3071	7.99	2.83	0.00092	✓	0.00367	0.9785	✓	0.1230	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1610	3.6527
Y58	0	3067.38	3067	5.24	2.29	0.00075	✓	0.00322	0.9781	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5655	1.1402
Y19	0	3101.69	3102	6.42	2.53	0.00082	✓	0.00359	0.9775	✓	0.1283	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1388	3.9498
Y29	1	3101.64	3102	5.60	2.37	0.00076	✓	0.00279	0.9775	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6207	0.9539
Y39	1	3100.71	3100	6.20	2.49	0.00080	✓	0.00191	0.9763	✓	0.3146	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3768	1.9521
Y49	0	3104.18	3104	6.77	2.60	0.00084	✓	0.00124	0.9750	✓	0.2693	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3329	2.2000
Y59	1	3105.53	3105	6.09	2.47	0.00079	✓	0.00353	0.9773	✓	0.3531	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3352	2.1858
Y110	0	3054.00	3054	8.70	2.95	0.00097	✓	0.04676	0.9862	✓	0.4878	✓	0.0045	⊗	0.001	✓	0.4912	1.4217
Y210	0	3059.05	3059	7.13	2.67	0.00087	✓	0.00741	0.9807	✓	0.4620	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4649	1.5320
Y310	0	3064.22	3065	9.22	3.04	0.00099	✓	0.02638	0.9844	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.8146	0.4102
Y410	0	3063.96	3064	7.60	2.76	0.00090	✓	0.01679	0.9828	✓	0.3366	✓	0.0014	⊗	0.001	✓	0.3534	2.0804
Y510	1	3062.49	3062	6.20	2.49	0.00081	✓	0.00638	0.9801	✓	0.5000	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.8468	0.3326

Por otro lado, para comparar la caracterización de datos filtrados y no filtrados, en la Tabla 6 se resumen las tasas de aceptación para diferentes criterios.

Tabla 6. Tasas de aceptación de la normalidad según el criterio de filtrado de valores atípicos ($\alpha = 0.05$; nivel de 0 % GWC).

Criterio de filtrado	Datos excluidos (%)	Tasa de aceptación de la normalidad (%)				
		Shapiro–Wilk	Jarque–Bera	Anderson–Darling	Lilliefors	D'Agostino
Sin filtrar	0.00	4	54	0	0	56
Z-95 % ($\|z\| \leq 1.96$)	4.20	0	80	0	0	38
Z-99 % ($\|z\| \leq 2.58$)	1.24	0	98	0	0	80
Z-99.9 % ($\|z\| \leq 3.29$)	0.45	2	94	0	0	92

Nota: La tasa de aceptación es el porcentaje de las 50 corridas (10 sensores × 5 corridas de 200 lecturas) en que no se rechazó la normalidad con $\alpha = 0.05$. El valor z se calculó con la media y la desviación estándar muestral de cada corrida. Las pruebas se aplicaron a cada corrida por separado.

El criterio de Z-99.9% (intervalo $\pm 3.29\sigma$) se eligió como umbral de referencia para la depuración de valores atípicos utilizado en los estadísticos descriptivos y en el ajuste de los modelos de calibración. Esta elección se realizó debido a que un umbral más estricto, como Z-95% ($\pm 1.96\sigma$), excluye por definición cerca del 5% de una distribución gaussiana, removiendo variabilidad natural de la señal de los sensores en lugar de anomalías reales de los instrumentos. En el conjunto analizado (nivel de 0% de humedad, n = 10,000), el criterio Z-99% eliminó el 1.24% de las observaciones, frente a solo 0.45% bajo Z-99.9%; pese a la diferencia moderada en el total de datos removidos, el filtrado más agresivo (Z-95%) distorsionó la simetría de la distribución y redujo las tasas de aceptación de normalidad, mientras que Z-99.9% mantuvo una estructura más estable con el comportamiento esperado de la variación normal del sistema. El conjunto filtrado bajo este último criterio fue el utilizado en el ajuste de los modelos de calibración.

3.4 Estadísticos descriptivos entre sensores (S1–S10)

El análisis de los diez sensores, sin eliminación de *outliers*, mostró valores medios entre 3060.8 y 3140.3 (Tabla 7), con desviaciones estándar de 2.90 a 4.77. Los coeficientes de variación fueron bajos (0.09–0.16 %), lo que indica una mínima variabilidad relativa. En conjunto, estos resultados evidencian un comportamiento homogéneo y estable del sistema, donde las diferencias entre sensores son despreciables frente al rango total de medición.

Tabla 7. Estadística descriptiva de los 10 sensores con 0% GWC, sin filtrar.

Variable	Media	D.E.	Varianza	C.V. (%)	Min	Mediana	Max
S1	3140.3	3.80	14.5	0.12	3126.0	3141.0	3159.0
S2	3120.9	3.04	9.23	0.10	3109.0	3121.0	3140.0
S3	3118.1	2.90	8.40	0.09	3102.0	3118.0	3128.0
S4	3138.3	2.98	8.87	0.09	3119.0	3138.0	3152.0
S5	3075.9	3.45	11.9	0.11	3064.0	3076.0	3087.0
S6	3095.5	4.22	17.8	0.14	3082.0	3096.0	3111.0
S7	3111.1	3.80	14.4	0.12	3095.0	3111.0	3122.0
S8	3067.6	3.77	14.2	0.12	3056.0	3068.0	3085.0

S9	3102.7	3.18	10.1	0.10	3089.0	3103.0	3122.0
S10	3060.8	4.77	22.7	0.16	3046.0	3061.0	3075.0

La media global de los diez sensores fue de 3103.1, con valores entre 3060.8 y 3140.3, lo que indica una baja dispersión entre dispositivos. La desviación estándar fue de 28.0 y el coeficiente de variación de 0.90%, evidenciando una baja variabilidad relativa y un comportamiento consistente del sistema.

Como se muestra en las Figuras 13 y 14, las medias de los sensores se concentran en un rango estrecho (3060.75 a 3140.34), con baja variabilidad interna en cada uno (variabilidad intradispositivo, CV de 0.07 a 0.11 % por corrida). Sin embargo, entre diferentes sensores la desviación estándar fue de 28 cuentas, con una diferencia máxima de 80 cuentas entre el sensor de mayor y el de menor lectura. Este *offset* equivale a 0.16% GWC en cercanía al 0% y hasta 1.6% GWC entre 10 y 20 %, donde la sensibilidad de la curva es menor.

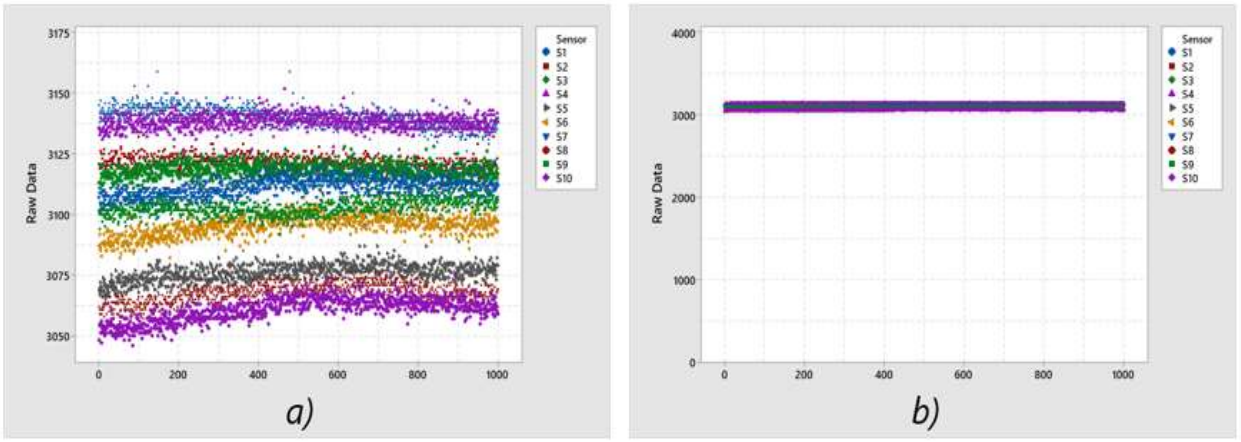


Figura 13. Diagramas de dispersión con escalado del eje *y* para (a) valores mínimos y máximos y (b) el rango completo de 0–4095.

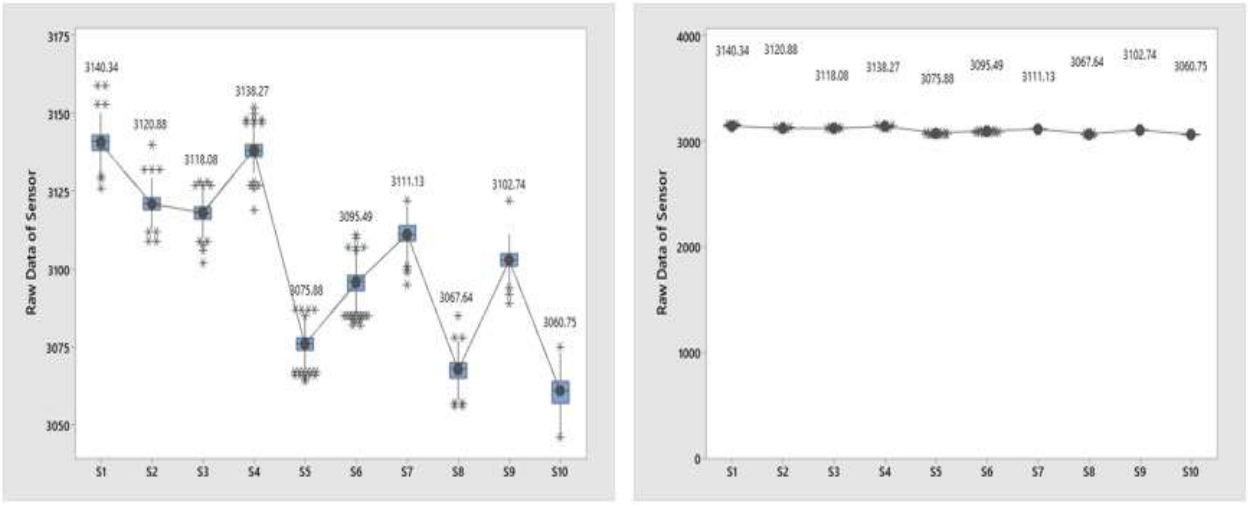


Figura 14. Diagramas de caja (*boxplot*) con escalado del eje *y* valores mínimos y máximos (izquierda) y el rango completo de 0–4095 (derecha).

3.5 Ajuste de modelos no lineales

Para obtener la curva de calibración se ajustaron cuatro modelos no lineales a la lectura promedio de los diez sensores en función del contenido gravimétrico de agua (GWC): polinomios de tercer y cuarto orden, un modelo exponencial simple y un modelo exponencial doble.

La respuesta del sensor mostró un comportamiento no lineal, con una relación inversa entre el contenido de humedad y los valores digitales registrados. La sensibilidad fue mayor a baja humedad: la pendiente promedio disminuyó de aproximadamente 178 cuentas·%$^{-1}$ entre 0 y 5 % a 17 cuentas·%$^{-1}$ entre 20 y 25 %. Entre 25 y 30 % la tendencia se invirtió en los diez sensores (incremento medio de 5.4 ± 3.6 cuentas, media ± desviación estándar), por lo que el ajuste se restringió al rango de 0–25 % (Figura 15).

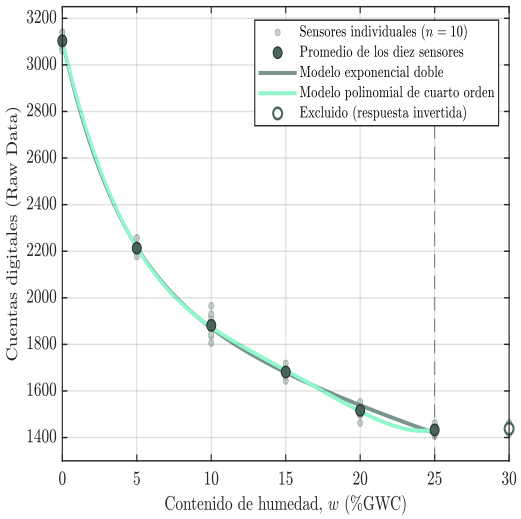


Figura 15. Curvas de ajuste del modelo polinomial de cuarto orden y del modelo exponencial doble, junto con los valores promedio y crudos de los datos experimentales.

Debido al número reducido de niveles ($n = 6$), R^2 tiende a valores cercanos al 100% incluso con modelos poco robustos, por lo que este se reporta únicamente como medida de ajuste. El desempeño predictivo se evaluó mediante validación dejando un sensor fuera: la curva se ajustó con los promedios de nueve sensores, se invirtió para estimar la humedad a partir de las lecturas del sensor omitido y el procedimiento se repitió con los diez sensores. Los errores se expresan en puntos porcentuales de GWC (Tabla 8).

Tabla 8. Ajuste y validación (dejando un sensor fuera) de los modelos de calibración en el rango de 0–25 % GWC (n = 6 niveles).

Modelo	Parámetros	Grados de libertad (GDL)	R^2 (%)	RMSE de ajuste (cuentas)	RMSE (% GWC)	MAE (% GWC)	Error máx. (% GWC)
Polinomial de 3.er orden	4	2	99.58	63.80	1.19	0.82	3.98
Polinomial de 4.º orden	5	1	99.99	11.80	1.0	0.65	3.38
Exponencial simple	3	3	99.59	51.30	1.13	0.71	5.00
Exponencial doble	4	2	99.96	20.70	0.87	0.57	3.30

Nota: el RMSE de ajuste es √(SSE/GDL) sobre la curva promedio. Las métricas de validación se calcularon sobre 60 predicciones (10 sensores × 6 niveles). Las lecturas fuera del rango de la curva se asignaron al extremo más cercano, lo cual ocurrió en 8 a 18 de las 60 predicciones según el modelo.

4. Conclusiones

La evaluación experimental del sensor capacitivo SEN0193 y la caracterización física del agregado fino, realizadas en condiciones controladas de laboratorio, indican que el sistema estudiado presenta resultados prometedores para el monitoreo de humedad en materiales granulares similares al evaluado, dentro del rango de 0-25 % GWC. Su aplicación en condiciones de campo, con otras granulometrías o rangos de humedad, requeriría validación adicional. Las curvas granulométricas se ubicaron dentro de los límites de la graduación No. 3 de la norma ASTM D1241, con la excepción de la fracción que pasa la malla No. 200 (75 μm). Asimismo, la distribución de áreas fue coherente con las curvas granulométricas, mientras que se reportó un ángulo de reposo promedio de 29.58° para describir la fricción del material.

En términos de desempeño estadístico, el análisis de las señales crudas de los diez sensores mostró buena repetibilidad de cada dispositivo, con CV de entre 0.07 a 0.11 % por corrida y de 0.09 a 0.16 % por sensor. Esto indica una baja dispersión para un sensor de bajo costo. Por otro lado, se registró una variabilidad en las medias de cada sensor de aproximadamente 10 cuentas.

Respecto a la distribución, la aproximación a una distribución gaussiana fue dependiente del tipo de prueba y filtrado respecto a la confiabilidad α. Con Z-95% ($|z| \leq 1.96$) las tasas fueron las menores (80% y 38%); con Z-99.9%, 94% y 92% ($\alpha = 0.05$). Las pruebas de normalidad Shapiro-Wilk, Anderson-Darling y Lilliefors rechazaron la normalidad en 98-100 % de los subgrupos sintetizados en las Tablas 3 a 5 bajo todos los criterios, lo cual respalda la consistencia de una variación simétrica de los valores centrales.

Los resultados coinciden con otras investigaciones (Radi et al., 2018; Pereira et al., 2022; Orangi et al., 2019; Strypsteen et al., 2026), quienes también reportan una respuesta capacitiva no lineal y calibraciones específicas por material, aunque con mayor variabilidad entre sensores (CV = 3.27–17.84 %) que la observada aquí (CV entre sensores de 0.9 a 2.61 % en el rango de 0 a 25 % GWC). En los estudios previamente mencionados se han evaluado sensores capacitivos de bajo costo similares (distintos al SEN0193) en ocho tipos de suelo, donde se incorporó validación de campo independiente frente a sensores de referencia (WET, ThetaProbe, gravimetría), alcanzando RMSE de 0.005–0.036 m^3/m^3.

Finalmente, el modelado matemático confirmó la naturaleza no lineal de la respuesta del sensor, con una sensibilidad máxima en rangos de baja humedad (aproximadamente 178 cuentas·$\%^{-1}$ entre 0 y 5 % frente a 17 cuentas entre 20 y 25 %) y una inversión en la tendencia por encima de 25% GWC en los diez sensores, por lo que la calibración se acotó al rango de 0 a 25 %. En ese rango, el modelo exponencial doble (empírico, monótono y de cuatro parámetros) obtuvo el menor error en la validación dejando un sensor fuera (RMSE = 0.87% GWC, MAE = 0.57% GWC y error máximo de 3.30% GWC), frente a 1.0% del polinomio de cuarto orden y 1.13% del exponencial simple; su R^2 (99.96%) se interpreta únicamente como medida de ajuste. Estos resultados respaldan el potencial del SEN0193 como herramienta de bajo costo para estimar humedad en el material evaluado, con un error esperado de aproximadamente 0.9% GWC para un sensor nuevo con una curva común. Su exactitud requiere, sin embargo, validación frente a un método de referencia, con otros materiales y en condiciones de campo (temperatura y compactación).

5. Agradecimientos

Se hace constar que los autores reconocen y agradecen el apoyo económico de SECIHTI a través del Programa SNII y Programa de Estancias Posdoctorales por México, así como al Programa de becas para estudio de Posgrado Nacionales.

6. Referencias

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7.ª ed.). Cengage Learning.

ASTM International. (2007). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort* (ASTM D698).

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1995a). *Moisture-density relations of soils using a 4.54-kg (10-lb) rammer and a 457-mm (18-in.) drop* (AASHTO T 180).

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1995b). *Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 2.5-kg (5.5-lb) rammer and a 305-mm (12-in.) drop* (AASHTO T 99).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2003). *Manual MMP: Métodos de muestreo y prueba de materiales. Parte 1: Suelos y materiales para terracerías*.

Contreras Ferreyra, D. U., Chávez Negrete, C., & Pastor Gómez, N. (2024). Utilization of low-cost water content sensors in compaction tests. *Ingeniería Investigación y Tecnología, 25*(3), 1–7. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.020

Vaz, C. M. P., Jones, S., Meding, M., & Tuller, M. (2013). Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. *Vadose Zone Journal, 12*(2), 1–16. https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160

Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. *Sensors, 25*(2), 343. https://doi.org/10.3390/s25020343

Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. *Sensors, 20*(12), 3585. https://doi.org/10.3390/s20123585

Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. *Sensors, 20*(2), 363. https://doi.org/10.3390/s20020363

Hidayat, M. N., Hazarika, H., & Kanaya, H. (2024). Calibration and performance evaluation of cost-effective capacitive moisture sensor in slope model experiments. *Sensors, 24*(24), 8156. https://doi.org/10.3390/s24248156

Fernandes Genovez, J. G., Gripp, A. R., Pinto Duque, A. C. L., Felix, R. W., Esteves, F. A., & Martins, R. L. (2025). Enhancing the accuracy of the low-cost capacitive soil moisture sensor SEN0193 for Internet of Things applications. *Brazilian Archives of Biology and Technology, 68*. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2025240380

Radi, Murtiningrum, Ngadisih, Muzdrikah, F. S., Nuha, M. S., & Rizqi, F. A. (2018). Calibration of capacitive soil moisture sensor (SKU:SEN0193). En *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528624

Pereira, R. M., Sandri, D., & da Silva Júnior, J. J. (2022). Evaluation of low-cost capacitive moisture sensors in three types of soils in the Cerrado, Brazil. *Revista Engenharia na Agricultura, 30*, 262–272. https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.14017

Kulmány, I. M., Bede-Fazekas, Á., Beslin, A., Giczi, Z., Milics, G., Kovács, B., Kovács, M., Ambrus, B., Bede, L., & Vona, V. (2022). Calibration of an Arduino-based low-cost capacitive soil moisture sensor for smart agriculture. *Journal of Hydrology and Hydromechanics, 70*(3), 330–340. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0014

Al-Rawi, M. A. M. (2024). Low-cost soil moisture sensors' assessment for their accuracy after calibration through the gravimetric method. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics, 56*(1), 353–369. https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.32

Agustirandi, B., Inayah, I., Aminah, N. S., & Budiman, M. (2024). Analysis comparison, calibration, and application of low-cost soil moisture in smart agriculture based on Internet of Things. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control, 22*(5), 1221–1230. https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v22i5.25703

Rahman, M. M. (2017). *Relationships between moisture content and dielectric constant for subgrade and subbase of pavement courses* [Tesis de maestría, Universiti Teknologi Malaysia].

Schwamback, D., Persson, M., Berndtsson, R., Bertotto, L. E., Kobayashi, A. N. A., & Wendland, E. C. (2023). Automated low-cost soil moisture sensors: Trade-off between cost and accuracy. *Sensors, 23*(5), 2451. https://doi.org/10.3390/s23052451

Nagahage, E. A. A. D., Nagahage, I. S. P., & Fujino, T. (2019). Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. *Agriculture, 9*(7), 141. https://doi.org/10.3390/agriculture9070141

ASTM International. (2015). *Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses* (ASTM D1241).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Materiales para subbases* (N·CMT·4·02·001/16). Instituto Mexicano del Transporte.

Geldart, D., Abdullah, E. C., Hassanpour, A., Nwoke, L. C., & Wouters, I. (2006). Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. *China Particuology, 4*(3–4), 104–107. https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60247-4

Arduino. (2026, 15 de septiembre). *Arduino Due: User manual*. https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000062-datasheet.pdf

Triola, M. F. (2009). *Estadística* (10.ª ed.). Pearson Educación.

Al-Hashemi, H. M. B., & Al-Amoudi, O. S. B. (2018). A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology, 330*, 397–417. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003

Orangi, A., Narsilio, G. A., & Ryu, D. (2019). A laboratory study on non-invasive soil water content estimation using capacitive based sensors. *Sensors, 19*(3), 651. https://doi.org/10.3390/s19030651

Strypsteen, G., Persson, M., Miroshnychenko, M., & Rakonjac, N. (2026). Field performance and calibration strategies for low-cost capacitive soil moisture sensors. *Sensors, 26*(11), 3291. https://doi.org/10.3390/s26113291