



DTA-Agrícola

---

**PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN  
Sondas agrometeorológicas DTA-SHT4x  
(Diseño experimental)**

---



2025

## Objetivo y alcance

- **Objetivo principal:** Calibrar las sondas DTA-SHT4x, basada en el sensor capacitivo HW-390, relacionando su salida analógica con el contenido volumétrico de agua del suelo ( $\theta_v$ ), determinado únicamente con volúmenes de suelo y agua medidos con recipientes graduados.
- **Alcance práctico:** Método rápido, económico y portable, con control mínimo de variables clave (densidad aparente, temperatura, salinidad, voltaje) y procedimientos claros para técnicos.

---

**Enfoque:** cero horno ni balanza, todo por volúmenes conocidos, drenaje como referencia práctica de capacidad de campo, y curvas de calibración con mezclas a porcentajes definidos. Experimento profesional y ligero, optimizado para replicabilidad y documentación en campo.

---

## Fundamentos y definiciones

- Contenido volumétrico de agua:

$$\theta_v = \frac{V_{agua}}{V_{suelo}}$$

- **Capacidad de campo (referencia práctica en mini-columna):** Punto en el que cesa el drenaje visible tras un periodo estandarizado de espera, usando aportes por incrementos pequeños y registro del drenado.
- **Porcentaje de humedad objetivo:**

$$\% \text{ agua} = 100 * \theta_v$$

- **Relación mediciones–lecturas:** Crear curva  $V_{out}$  o ADC vs  $\theta_v$  y su inversa para estimar humedad a partir del sensor.

---

## Materiales y montaje

- **Recipientes de suelo:**
  - **Vasos rígidos perforados:** Ø 6–8 cm, 3 orificios de 2–3 mm en fondo.
  - **Papel filtro o tela no tejida:** Evita pérdida de finos.
- **Medición de agua:**

- **Jarras/pipetas/jeringas graduadas:** Incrementos de 1–10 mL.
- **Copa colectora de drenaje:** Graduada para medir volumen drenado.
- **Sensor y electrónica:**
  - **HW-390 + microcontrolador:** ADC estable.
  - **Fuente regulada:** 5.0 V o 3.3 V estable; masa común; cables cortos (<30 cm).
- **Control básico:**
  - **Termómetro:** Suelo/agua.
  - **Medidor EC/TDS:** Salinidad del agua.
  - **Regla/calibre:** Altura de columna y profundidad del sensor.
- **Montaje del mini-sistema:**
  - **Forrado:** Fondo del vaso con papel filtro; opcional capa fina de grava.
  - **Sensor:** Insertar HW-390 al centro, profundidad fija (p. ej. 4 cm), sin tocar el fondo.
  - **Estabilidad:** Evitar vibraciones; mantener cables cortos; registrar temperatura y EC.

## Diseño experimental

### Tratamientos y replicación

- **Suelos y volúmenes:**
  - **Texturas:** Idealmente 2 (ej. franco-arenoso y franco-arcilloso).
  - **Volúmenes:** 100 mL (solo prueba de hipótesis), 300 mL, 400 mL, 500 mL.
  - **Replicación:** 3–5 repeticiones por combinación suelo–volumen.
- **Series de humedad objetivo (mezclas):**
  - **Curva principal:** 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, saturado.
  - **Validación fina:** 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%.
  - **Checks en días distintos:** Repetir 10%, 30%, 50% para verificar estabilidad.
- **Aleatorización:**
  - **Orden de medición:** Aleatorio para reducir sesgos por temperatura/voltaje.

### Procedimiento práctico por fases

#### *Fase A. Determinar “capacidad de campo” en mini-columna*

1. **Preparación de suelo:**
  - **Homogeneidad:** Romper terrones, retirar raíces/piedras.
  - **Carga del volumen:** Llenar el vaso al volumen objetivo  $V_{suelo}$  (usar marca interna o control por altura).
  - **Asentamiento estándar:** Tres golpes ligeros en la pared del vaso para uniformidad.
2. **Aporte por incrementos y drenaje:**
  - **Incrementos pequeños:** Añadir agua destilada a temperatura ambiente en pasos de 5–10 mL, distribuyendo uniforme.
  - **Observación de drenaje:** Tras cada incremento, esperar 2–5 min. Cuando aparezca goteo, continuar hasta que el goteo cese y mantener 10 min sin goteo.
3. **Registro volumétrico:**

- **Volumen aplicado total:**  $V_{aplicado}$ .
- **Volumen drenado total:**  $V_{drenado}$  medido en la copa colectora.
- **Agua retenida a CC:**

$$V_{cc} = V_{aplicado} - V_{drenado}$$

- **Contenido volumétrico a CC:**

$$\theta v, cc = \frac{V_{cc}}{V_{suelo}}$$

**Consistencia entre volúmenes:**

- **Comparativa:** Repetir en 300, 400 y 500 mL; comparar  $\theta v, cc$ . La variación esperada por volumen debe ser baja si el método es estable.

#### Fase B. Preparar mezclas a porcentajes objetivos

##### 5. Cálculo directo de agua a añadir:

- Para cada objetivo  $\theta v$ :

$$V_{agua\ objetivo} = \theta v * V_{suelo}$$

- **Ejemplo:** Para 400 mL de suelo y 30%:  $V_{agua} = 0.30 * 400 = 120$  mL.

##### 6. Mezcla y reposo:

- **Homogeneización:** Añadir el agua en 2–3 porciones, mezclar por capas y plegados suaves.
- **Reposo:** 10–15 min para distribución; evitar charcos superficiales.

#### Fase C. Medición con HW-390

##### 7. Lecturas por punto:

- **Estabilización:** 2–3 min por muestra; registrar 3 lecturas de  $V_{out}$  o ADC.
- **Condiciones:** Registrar temperatura del suelo, EC del agua usada y voltaje en bornes del HW-390.

##### 8. Repetición y orden aleatorio:

- **Replicas:** 3–5 por punto.
- **Orden:** Aleatorizar los porcentajes para reducir deriva.

---

#### Control de calidad y mejoras clave

- **Uniformidad de densidad aparente:**

- **Etiqueta:** Documentar técnica de llenado y golpes; mantener igual entre réplicas. Diferencias de compactación afectan  $\Theta v$  y la respuesta capacitiva.
- **Temperatura:**
  - **Meta:** 20–25 °C. Si varía >2 °C entre puntos, anotar para corrección post-hoc.
- **Salinidad/EC:**
  - **Agua de baja EC:** Preferir destilada o filtrada; anotar EC. Salinidad puede desplazar la curva capacitiva.
- **Voltaje estable:**
  - **Medición directa:** Registrar el voltaje real en cada sesión; variaciones cambian  $V_{out}$ .
- **Tiempo a “capacidad de campo”:**
  - **Estándar reproducible:** 10 min sin goteo visible tras el último incremento. Registrar  $V_{drenado}$ .
- **Posición del sensor:**
  - **Profundidad constante:** Fijar a 4 cm (o la elegida) para todas las mediciones.

## Registro de datos

- **Hoja por punto de medición:**
  - **Identificación:** Fecha, suelo (textura), volumen  $V_{suelo}$ , técnica de asentamiento.
  - **Condiciones:** Temperatura, EC del agua, voltaje.
  - **Capacidad de campo:**  $V_{aplicado}$ ,  $V_{drenado}$ ,  $V_{cc}$ ,  $\Theta v, cc$ .
  - **Muestra objetivo:**  $\Theta v$  objetivo,  $V_{agua}$  calculado, notas de homogeneidad.
  - **Sensor:** Tres lecturas de  $V_{out}$ /ADC, media y desviación estándar.

## Análisis y curva de calibración

- **Ajuste por suelo (y densidad similar):**
  - **Modelo lineal inicial:**

$$V_{out} = a + b * \Theta v$$

- **Modelo cuadrático opcional:**

$$V_{out} = a + b * \Theta v + c * \Theta v^2$$

- **Selección:** Elegir el más parsimonioso con residuos aleatorios y buen ( $R^2$ ).
- **Validación cruzada:**
  - **Checks de 10%, 30%, 50% en días distintos:** Error dentro de ±3–5 puntos porcentuales es razonable para uso operativo.
- **Ecuación inversa (operativa):**
  - **Estimación en campo:**

$$\theta v = f^{-1}(V_{out})$$

- **Bandas:** Publicar rango con menor error (ej. 10–50%).
- **Correcciones prácticas:**
  - **Temperatura:** Si se observa dependencia,

$$V_{out\ corr} = V_{out} - k_T * (T - 25)$$

- **Salinidad:** Si EC alta desplaza la curva, definir factor corrector o curva alternativa.

---

### Checklist rápido para hoy

- **Preparación:**
    - **Suelo:** Homogeneizar y retirar restos.
    - **Vasos:** Tres volúmenes (300, 400, 500 mL) con filtro.
    - **HW-390:** Profundidad fija; fuente estable; medir voltaje.
    - **Condiciones:** Medir temperatura y EC del agua.
  - **Capacidad de campo:**
    - **Incrementos:** Añadir agua (5–10 mL), registrar ( $V_{aplicado}$ ), colectar  $V_{drenado}$ .
    - **Cálculo:**  $\theta v, cc = (V_{aplicado} - V_{drenado}) / V_{suelo}$ .
  - **Curva principal:**
    - **Mezclas:** Preparar 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, saturado.
    - **Lecturas:** 3 por punto, con condiciones registradas.
  - **Validación:**
    - **Fina:** 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%.
    - **Checks en otro momento:** Repetir 10%, 30%, 50%.
- 

### Pequeñas mejoras que elevan la precisión sin complicar

- **Marcadores internos de volumen:** Trazar líneas dentro del vaso para asegurar  $V_{suelo}$  consistente.
- **Distribución del agua:** Usar jeringa para repartir en anillos y evitar canales preferentes.
- **Reposo corto estándar:** 10–15 min tras mezclar, antes de medir el sensor.
- **Plantilla impresa:** Tabla de cálculo rápida para  $V_{agua}$  por cada  $V_{suelo}$  y porcentaje objetivo.
- **Blindaje ligero del sensor:** Laca protectora en zonas no sensibles para reducir interferencias por salpicado y humedad superficial.