
183 (A cumplimentar por la Organización)-2025

Comunicación científico-técnica

Estudio comparativo de sondas de humedad de suelo. Calidad de la medida, precisión e importancia del uso en la toma de decisiones en riego.

Comparative study of soil moisture sensors: measurement quality, accuracy, and the importance of their use in irrigation decision-making

Sánchez de Ribera González, Alejandro¹, Rodríguez Fernández, Diego², González García, Abel², Cervantes Díaz-Toledo, Alfonso²; Madurga del Cura, Cristina²; Muñoz Sopeña, Daniel²; Garrido Garrido, Carlos³

1 Ingeniero Agrónomo, TRAGSA – CENTER, asanche4@tragsa.es

2 Equipo Técnico de TRAGSA – CENTER

3 MAPA - CENTER

Resumen: El uso de sondas de humedad del suelo se ha consolidado como una herramienta fundamental en la modernización del regadío, ya que permiten obtener información en tiempo real sobre el contenido de agua disponible en el suelo. Este tipo de tecnología facilita la toma de decisiones por parte de agricultores y comunidades de regantes, optimizando los momentos y las dosis de riego aplicadas. Además, su integración en sistemas avanzados de gestión del riego permite automatizar procesos y avanzar hacia una agricultura más precisa, eficiente y sostenible.

Sin embargo, la creciente variedad de sondas disponibles en el mercado —con diferentes principios de funcionamiento, formatos, profundidades de lectura y tecnologías de transmisión de datos— ha generado dudas en el sector sobre su fiabilidad, precisión y utilidad real en condiciones de campo. A esto se suma la variabilidad de resultados observada en determinadas situaciones, especialmente cuando no se garantiza una correcta instalación o mantenimiento.

Con el objetivo de aportar claridad técnica en este ámbito, el Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), perteneciente al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, ha desarrollado un estudio comparativo de sondas de humedad del suelo. Para ello, se ha habilitado una parcela experimental con riego por goteo subterráneo, en la que se han instalado diez modelos distintos de sondas capacitivas y TDR (Reflectometría de Dominio Temporal), tanto de

lectura única como multinivel, bajo condiciones homogéneas de suelo (franco/franco limoso) y riego.

El estudio se ha estructurado en tres líneas principales de comparación: la repetibilidad de la medida entre sondas del mismo modelo instaladas en condiciones idénticas, la coherencia de los datos entre modelos distintos bajo las mismas condiciones, y la precisión de las lecturas frente a los resultados obtenidos mediante análisis gravimétrico en laboratorio, siguiendo la norma UNE-EN ISO 17892-1.

Los resultados muestran una alta variabilidad entre modelos, tanto en la respuesta a eventos de riego como en la lectura de contenido hídrico. El 40 % de las sondas presentaron algún tipo de fallo durante el ensayo, y un 20 % fueron descartadas por problemas técnicos graves. Las diferencias de lectura entre modelos alcanzaron hasta 20 puntos porcentuales, y en la comparación con el método gravimétrico solo un modelo ofreció lecturas cercanas a los valores reales medidos en laboratorio.

Estas conclusiones ponen de manifiesto la importancia de realizar una elección informada y técnica de los sensores de humedad, así como la necesidad de contar con personal cualificado para su instalación, mantenimiento e interpretación de datos. En un contexto de transición hacia la agricultura 5.0, la calidad del dato es clave para lograr una gestión hídrica más eficiente, sostenible y tecnológicamente integrada.

Palabras clave: Suelo agrícola, Tecnología de riego, Medición de humedad, Ahorro de agua, Gestión del riego, Sensorización, Agricultura de precisión, Calibración de sensores, Riego inteligente, Datos agronómicos

Abstract:

The use of soil moisture sensors has become a key tool in the modernization of irrigation systems, as they provide real-time information about the amount of water available in the soil. This technology supports farmers and irrigation communities in making more accurate and efficient decisions about when, how, and how much to irrigate. Moreover, the integration of sensors into advanced irrigation management systems opens the door to partial or full automation, paving the way for more precise, efficient, and sustainable agriculture.

However, the growing variety of sensors available on the market—with different working principles, formats, installation depths, and data communication technologies—has raised concerns about their reliability, accuracy, and usefulness under real field conditions. Additional uncertainty stems from the variability in performance, especially when proper installation and maintenance are not guaranteed.

To bring clarity to this issue, the National Centre for Irrigation Technology (CENTER), which belongs to the Spanish Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, has conducted a comparative study of soil moisture probes. A test plot with subsurface drip irrigation was set up, where ten

different commercial models (capacitive and TDR (Time Domain Reflectometer), single-depth and multi-depth) were installed under uniform soil (loam/silty loam) and irrigation conditions.

The study focused on three main comparisons: repeatability of measurements among same sensors installed under the same conditions, consistency of readings across different models, and sensor accuracy compared to laboratory gravimetric measurements following the UNE-EN ISO 17892-1 standard.

The results showed significant variability among models, especially in response to irrigation events and water content readings. Around 40% of the sensors experienced issues at some point during the trial, and 20% were discarded due to serious technical problems. Reading discrepancies among models reached over 20 percentage points, and only one model gave readings close to the laboratory reference values.

These findings highlight the importance of making informed, technically sound choices when selecting soil moisture sensors. They also underscore the need for trained and qualified people to handle installation, maintenance, and data interpretation. In the context of agriculture 5.0, where digitalization and artificial intelligence are gaining ground, high-quality data is essential for improving water use efficiency and achieving a more productive and sustainable agricultural model.

Keywords: Agricultural soil, Irrigation technology, Moisture measurement, Water saving, Irrigation management, Smart irrigation.

1. Introducción

El uso de sondas para monitorizar la humedad del suelo está en aumento, impulsado por los avances tecnológicos y por los requisitos de las instituciones financiadoras en los proyectos de modernización del regadío. Estas herramientas permiten obtener datos en tiempo real sobre el estado hídrico del suelo, lo que ayuda a regantes y comunidades de regantes a tomar decisiones más informadas y eficientes sobre cuándo, cómo y cuánto regar.

Además, la incorporación de estas sondas en sistemas avanzados de gestión del riego, especialmente cuando se combinan con otros sensores, abre la posibilidad de automatizar total o parcialmente la toma de decisiones, mejorando la eficiencia hídrica y energética en la producción agrícola.

Sin embargo, la amplia variedad de sondas disponibles en el mercado, con distintos principios de funcionamiento y niveles de precisión, hace imprescindible evaluar su comportamiento en condiciones reales. La experiencia acumulada en el Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), adscrito al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), trabajando con diferentes tipos de sondas de humedad del suelo, ha puesto de manifiesto que no siempre los datos obtenidos son válidos o utilizables, ya sea por errores de instalación, falta de calibración, problemas técnicos o diferencias entre equipos.

Ante esta situación, y considerando la creciente importancia de estas tecnologías en la gestión del riego, desde el CENTER se ha puesto en marcha un estudio experimental que permita comparar de forma objetiva el rendimiento de distintos modelos de sondas.

El objetivo de este trabajo es analizar comparativamente distintos modelos de sondas de humedad del suelo, evaluando la calidad de la medida, su fiabilidad, precisión y robustez en condiciones reales, así como su utilidad en la toma de decisiones sobre el riego. Con este fin, se han instalado sondas capacitivas y TDR en una parcela experimental con condiciones iniciales homogéneas de suelo y riego, y se están recogiendo datos a lo largo de varios ciclos, considerando también como variable el modo de instalación, por su influencia directa en la lectura de los sensores.

2. Materiales y métodos

Para el estudio se ha creado una parcela con un sistema de riego por goteo subterráneo autocompensante de 2 l/h y separación entre goteros de 75 cm, que previamente se ha ensayado, para comprobar sus características, en el banco de ensayo de emisores del Laboratorio Central para Ensayo de Materiales y Equipos de Riego del CENTER.

Las tuberías emisoras se han enterrado a una profundidad de 20 cm, con una colocación de los goteros en disposición cuadrada como se muestra en la figura 1, con el objetivo de instalar de manera precisa y en igualdad de condiciones, a los equipos objeto de estudio. De esta forma, se puede

aportar, cuando sea necesario, la cantidad de agua equivalente a todos ellos y homogeneizar el contenido de humedad en el suelo.

Los riegos están controlados por un sistema de telecontrol que regula y mide las dosis aportadas y los tiempos de cada uno. Mediante un pluviómetro se controlan los eventos de lluvia, aunque también se cotejan con la estación del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) que posee el CENTER.

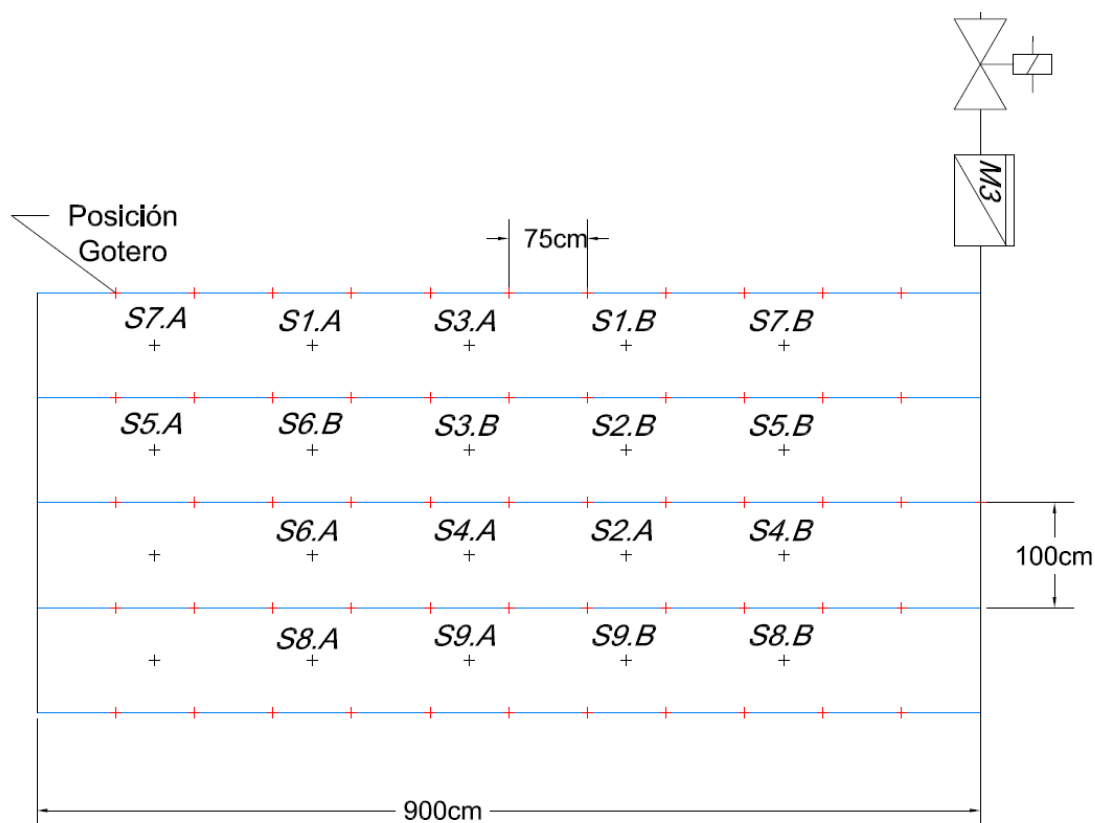


Figura 1. Plano parcela estudio.

Para el estudio se han seleccionado 10 modelos de sondas comerciales tanto multisensor, a varias profundidades, como de un solo horizonte. En este último caso la profundidad de instalación es para todas de 30 cm.

Todas ellas, salvo un modelo TDR, son sondas capacitivas y con comunicación estándar SDI-12 para poder facilitar la captura de las lecturas. Para ello, se ha contado con la instalación de varios dataloggers multicanal que permiten la descarga simultánea de cada equipo. Este punto es importante a la hora de la elección de una sonda de humedad.

Tabla 1. Características de los equipos.

Sonda	Horizontes	Características
S1.AB	1 Nivel	H, t ^a , CE
S2.AB	1 Nivel	H, t ^a , CE
S3.AB	1 Nivel	H, t ^a
S4.AB	1 Nivel	H, t ^a , CE
S5.AB	Multinivel	H, t ^a
S6.AB	Multinivel	H, t ^a
S7.AB	Multinivel	H, t ^a
S8.AB	1 Nivel	H, t ^a , CE
S9.AB	Multinivel	H, t ^a
S10.AB	Multinivel	H, t ^a

En la tabla 1 se muestran las características generales de los modelos de sondas objeto del estudio.

Aunque se pueden introducir muchos elementos de comparación, este estudio se ha centrado en la calidad del dato que se obtiene de este tipo de sensores de manera que se ha realizado una comparativa basándonos en tres aspectos:

1. Calidad de la lectura de cada modelo de sonda comparándola con una sonda gemela. Para este caso, la parcela de estudio cuenta, por cada modelo, con dos sondas iguales instaladas de la misma manera siguiendo la recomendación dada por el fabricante.
2. Calidad de la lectura de un modelo de sonda con respecto a los demás modelos instalados. Para este caso se han instalado, como se ha dicho anteriormente, diez modelos de sonda distintos, seleccionados de modelos comerciales e instalados en las mismas condiciones y siguiendo, para cada caso, las recomendaciones de cada fabricante.
3. Calidad de la lectura de las sondas comparada con una muestra de suelo obtenida de acuerdo con el método establecido en la norma UNE-EN ISO 17892-1. A lo largo del tiempo que se lleva realizando el estudio, se han realizado ensayos periódicos de humedad en laboratorio, analizando las muestras recogidas en campo a la profundidad de estudio. Las muestras se han secado mediante estufa a 108 °C y la humedad en suelo obtenida según la fórmula:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_c} \times 100 = \frac{m_w}{m_d} \times 100$$

Donde:

w es la humedad (%);

m₁ es la masa del recipiente (y la tapa si se usa) y la muestra de ensayo húmeda (g);

m₂ es la masa del recipiente (y la tapa si se usa) y la muestra de ensayo seca (g);

m_c es la masa del recipiente (y la tapa si se usa) (g);

m_w es la masa de agua (g);

m_d es la masa de la muestra de ensayo seca (g).

3. Resultados y discusión

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos, se muestra algún ejemplo que puede reflejar de forma clara las conclusiones obtenidas.

De las 20 sondas incluidas en el estudio, el 40% han dado problemas de lectura en algún momento, quedando descartadas el 20 % del total, por diversos problemas como daños durante la instalación, errores de lectura, consumos excesivos de batería, etc.

Concretamente se han eliminado los modelos S9 y S10, los dos modelos multinivel, por problemas de comunicación y de instalación, respectivamente. Del resto, se muestra a continuación un resumen de lo obtenido hasta ahora:

1. Centrados en la comparación de un modelo de sonda con su gemela, en general las muestran reflejan datos muy parecidos, pero en eventos de riego o precipitaciones estos comportamientos no los reflejan de la misma manera.

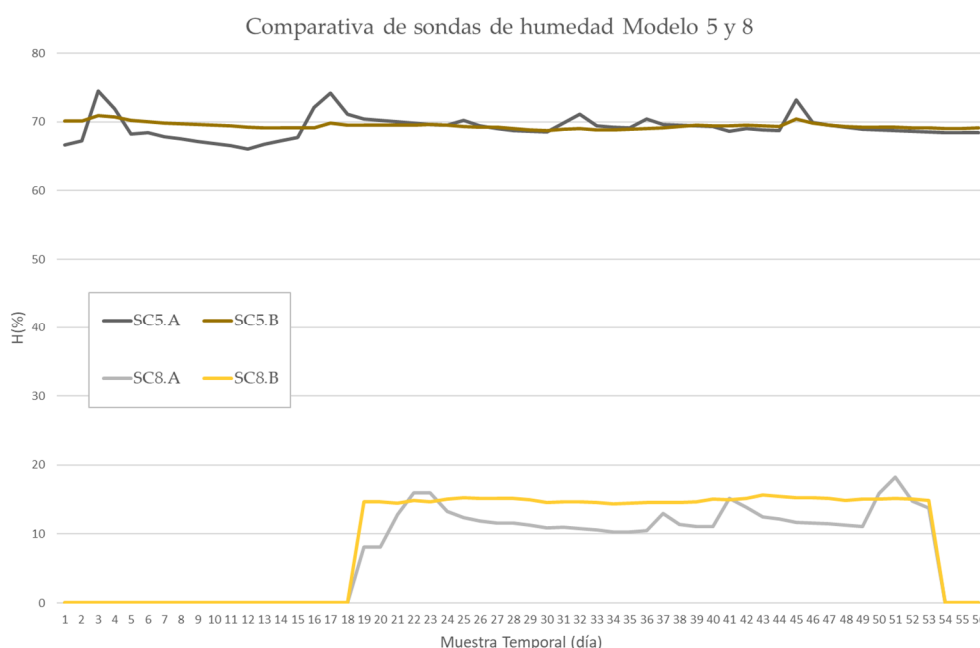


Figura 2. Ejemplos de lectura de sondas de humedad.

La figura 2 muestra dos modelos de sondas de humedad distintos con sus gemelas donde se puede visualizar que los datos medidos no distan mucho en valor y son parecidos, pero los eventos que suceden en el tiempo, que en este caso son eventos de lluvia, no son reflejados de igual manera por las sondas.

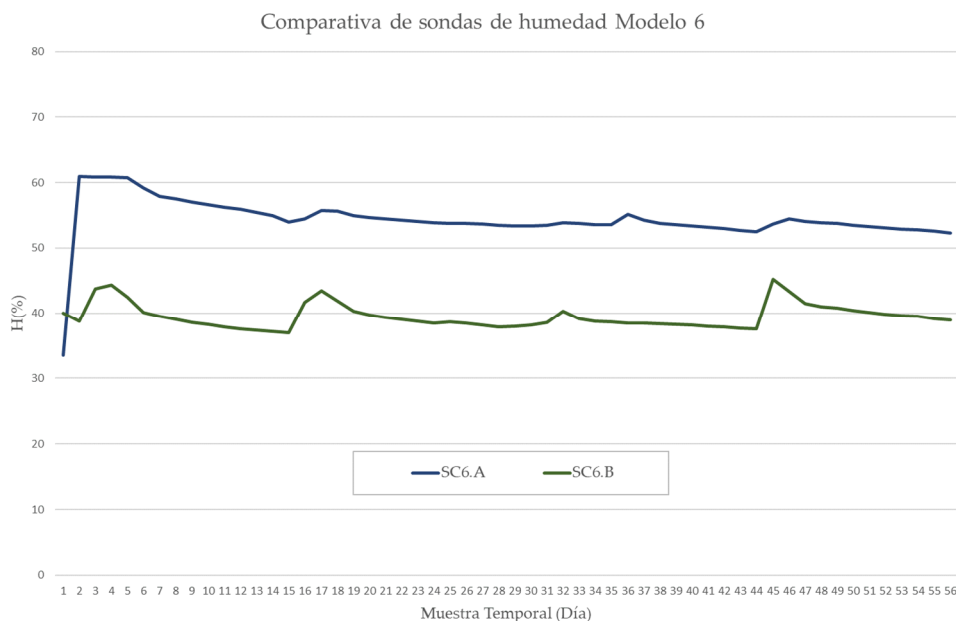


Figura 3. Ejemplos de lectura de sondas de humedad.

La figura 3 muestra un modelo de sonda con su gemelo donde se puede visualizar que los datos medidos distan mucho entre ellos llegando a diferencias de más del 15 % de humedad.

Un ejemplo de todos los equipos en un periodo del estudio realizado se refleja a continuación:

Tabla 2. Ejemplo datos de humedad medio en los ensayos realizados en cada sonda de humedad.

Ensayo	S1.A	S1.B	S2.A	S2.B	S3.A	S3.B	S4.A	S4.B	S5.A	S5.B	S6.A	S6.B	S7.A	S7.B	S8.A	S8.B
36	33,2	35,2	29,7	28,8	30,8	33,1	32,3	32,3	70,5	69,0	55,2	38,4	38,1	37,5	10,5	14,5
37	33,1	32,0	29,1	29,0	30,8	32,2	32,4	32,4	69,7	69,2	54,3	38,4	38,4	37,5	12,9	14,6
38	33,1	31,6	26,4	28,3	30,9	32,0	32,4	32,4	69,5	69,4	53,8	38,4	38,7	37,7	11,4	14,6
39	33,0	31,5	25,9	27,9	30,9	31,8	32,4	32,5	69,5	69,5	53,6	38,3	38,7	37,9	11,0	14,7
40	32,9	32,1	25,7	27,6	30,8	31,6	32,2	32,4	69,3	69,5	53,4	38,1	38,6	37,7	11,0	15,1
41	32,8	31,9	25,5	27,4	30,7	31,4	32,1	32,4	68,7	69,5	53,2	38,0	38,5	37,8	15,1	15,0
42	32,6	31,7	25,4	27,3	30,6	31,3	32,0	32,3	69,0	69,5	53,0	37,8	38,4	37,8	13,9	15,2
43	32,4	31,5	25,3	27,1	30,5	31,1	31,8	32,3	68,9	69,4	52,7	37,7	38,1	37,6	12,5	15,6
44	32,3	31,3	25,2	27,0	30,4	31,0	31,7	32,2	68,7	69,3	52,5	37,6	38,2	37,6	12,1	15,5
45	32,2	37,4	27,9	30,0	30,3	31,9	31,7	32,7	73,2	70,4	53,7	45,3	38,8	38,7	11,7	15,3
46	32,3	34,4	30,8	31,1	30,4	32,5	31,5	34,1	69,9	69,9	54,5	43,4	38,8	39,0	11,6	15,2
47	32,3	33,3	28,0	28,7	30,4	32,0	31,8	32,8	69,5	69,6	54,1	41,5	38,7	38,1	11,5	15,2
48	32,3	33,0	27,3	28,3	30,4	31,8	31,7	32,6	69,2	69,4	53,9	41,0	38,5	37,8	11,3	14,9
49	32,3	32,2	27,0	28,0	30,4	31,7	31,7	32,5	69,0	69,2	53,8	40,8	38,7	37,8	11,1	15,1
50	32,3	31,8	26,6	27,8	30,4	31,5	31,7	32,4	68,9	69,2	53,5	40,4	38,9	37,7	15,9	15,1
51	32,3	31,7	26,4	27,6	30,4	31,3	31,6	32,4	68,8	69,2	53,2	40,1	38,9	37,7	18,2	15,2
52	32,3	31,5	26,4	27,5	30,3	31,2	31,6	32,3	68,6	69,1	53,1	39,8	38,8	37,5	14,7	15,1
53	32,2	31,3	26,3	27,4	30,2	31,0	31,5	32,2	68,6	69,1	52,9	39,6	38,9	37,4	13,7	14,8

En la tabla 2 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos de cada sonda, para poderlos comparar con su gemela. Los datos totales resumidos se encuentran en la tabla 3 donde se muestran los valores medios, máximos y mínimos de todos los eventos descargados. En general, se observa una correlación entre los datos de sondas gemelas, salvo en algún caso como el modelo 6 que excede en 15 puntos porcentuales en datos medios.

Tabla 3. Datos globales de diferencia entre sondas de humedad gemelas.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Dif. media	1,2	2,0	1,2	0,8	1,2	15,1	2,6	3,1
Dif. mínima	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	6,5	0,1	0,2
Dif. máxima	5,2	6,0	3,8	5,2	4,3	22,2	12,5	6,6

- Centrados ahora en la comparación del dato de los distintos modelos estudiados, caso 2, nos encontramos que los datos obtenidos son mucho más dispares que en el caso de estudio 1, comparativa de los datos entre sondas gemelas.

En la figura 4 se puede observar que en los rangos de humedad para el evento mostrado se encuentran varias diferencias representativas para distintas muestras, llegando a máximos de más de 58 % de humedad.

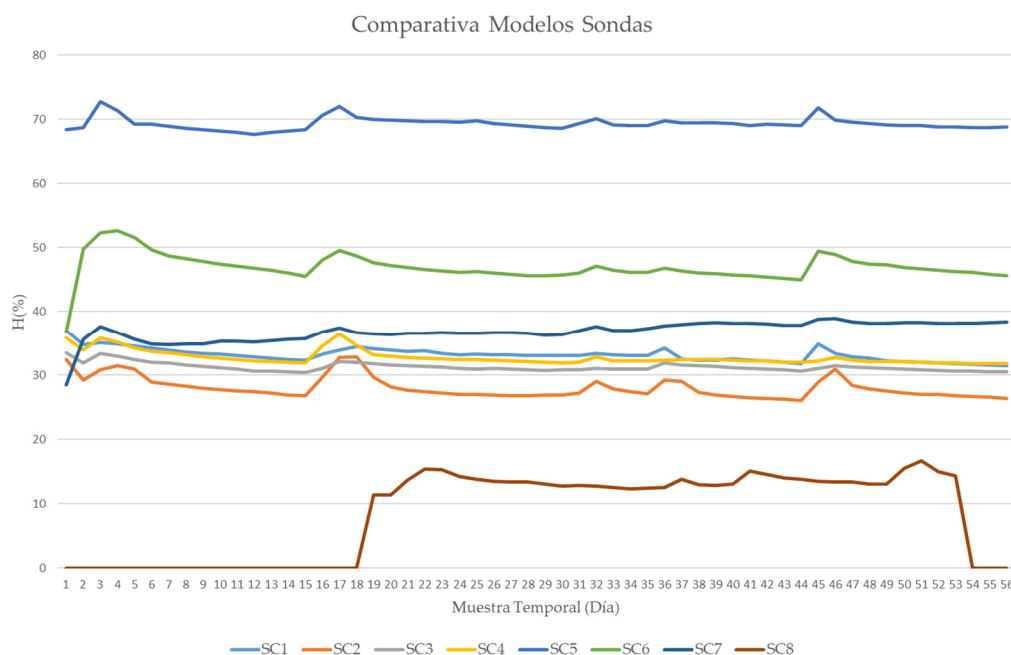


Figura 4. Ejemplo de eventos por modelo de sonda de humedad.

En la tabla 4 se muestra una parte de los datos medios obtenidos por modelo del ejemplo mostrado en la figura 4.

Tabla 4. Ejemplo datos de humedad medio por modelo de sonda de humedad.

Ensayo	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
19	34,1	29,7	31,7	33,2	70,0	47,7	36,4	11,4
20	33,9	28,1	31,6	32,9	69,9	47,2	36,4	11,4
21	33,7	27,7	31,5	32,8	69,8	46,9	36,5	13,6
22	33,8	27,4	31,3	32,7	69,7	46,6	36,5	15,4
23	33,4	27,2	31,2	32,6	69,6	46,4	36,7	15,3
24	33,2	27,0	31,0	32,4	69,5	46,1	36,6	14,2
25	33,3	27,0	30,9	32,4	69,8	46,2	36,6	13,8
26	33,2	26,9	31,0	32,3	69,3	46,1	36,7	13,5
27	33,2	26,8	30,9	32,2	69,2	45,9	36,6	13,4
28	33,1	26,8	30,9	32,1	68,9	45,7	36,6	13,4
29	33,1	26,9	30,7	32,0	68,7	45,6	36,2	13,1
30	33,1	26,9	30,8	31,9	68,6	45,8	36,3	12,7
31	33,1	27,2	30,8	32,0	69,4	46,0	37,0	12,8
32	33,4	29,0	31,0	32,9	70,1	47,1	37,7	12,7
33	33,2	27,8	30,9	32,2	69,2	46,5	37,0	12,6
34	33,1	27,4	30,9	32,2	69,0	46,2	37,0	12,3
35	33,1	27,1	30,9	32,2	69,0	46,1	37,3	12,4
36	34,2	29,3	31,9	32,3	69,7	46,8	37,8	12,5
37	32,6	29,1	31,5	32,4	69,4	46,4	38,0	13,8
38	32,4	27,3	31,4	32,4	69,5	46,1	38,2	13,0
39	32,3	26,9	31,4	32,4	69,5	45,9	38,3	12,9
40	32,5	26,7	31,2	32,3	69,4	45,8	38,1	13,1
41	32,3	26,5	31,1	32,2	69,1	45,6	38,1	15,1
42	32,2	26,3	31,0	32,2	69,2	45,4	38,1	14,5
43	32,0	26,2	30,8	32,0	69,1	45,2	37,8	14,1
44	31,8	26,1	30,7	31,9	69,0	45,0	37,9	13,8
45	34,8	28,9	31,1	32,2	71,8	49,5	38,8	13,5
46	33,4	30,9	31,4	32,8	69,9	48,9	38,9	13,4
47	32,8	28,4	31,2	32,3	69,5	47,8	38,4	13,3
48	32,7	27,8	31,1	32,1	69,3	47,5	38,2	13,1
49	32,3	27,5	31,0	32,1	69,1	47,3	38,2	13,1
50	32,1	27,2	31,0	32,1	69,0	46,9	38,3	15,5
51	32,0	27,0	30,9	32,0	69,0	46,7	38,3	16,7
52	31,9	27,0	30,7	31,9	68,9	46,5	38,2	14,9
53	31,8	26,8	30,6	31,9	68,8	46,2	38,1	14,3

En la tabla 4 se muestran los datos medios obtenidos de uno de los eventos representativos del estudio donde se pueden ver las diferencias que se han mencionado anteriormente.

Los datos que en la figura 4 son cero proceden de los errores de lectura que eventualmente muestran algunos modelos, debido a problemas de instalación y gasto excesivo de las baterías y que serán incluidos en las conclusiones.

3. Centrados ahora en el caso 3, se comparan los resultados obtenidos de las sondas en un momento concreto en el que se realiza la medida de la humedad en laboratorio de una muestra de suelo de la parcela de estudio. En la tabla siguiente se muestran los valores obtenidos.

Tabla 5. Ejemplo datos de humedad comparados con datos obtenidos en laboratorio.

	H%	S1.A	S2.A	S3.A	S4.A	S5.A	S6.A	S7.A	S8.A	S1.B	S2.B	S3.B	S4.B	S5.B	S6.B	S7.B	S8.B
1	14,9	32,3	25,6	30,3	31,6	67,7	54,0	37,3	8,1	0,0	27,9	30,5	32,0	69,2	37,0	34,0	14,1
2	15,7	33,9	27,0	30,8	33,1	70,1	54,7	38,0	12,1	0,0	29,3	32,3	32,5	69,4	39,7	34,2	15,1
3	17,4	33,3	26,2	30,6	32,2	69,7	54,2	38,1	11,2	0,0	28,2	31,7	32,4	69,5	38,7	34,6	14,8
4	14,3	33,1	26,1	30,4	32,3	69,1	53,7	37,8	10,6	0,0	28,7	31,4	31,9	68,7	38,8	35,9	14,5
5	14,6	32,4	26,6	30,3	31,6	68,9	53,7	38,6	0,0	31,8	27,9	31,4	32,3	69,0	40,4	37,3	0,0
6	14,1	32,0	25,9	30,1	31,3	68,4	52,5	38,8	0,0	30,9	27,0	30,7	32,0	69,0	38,9	37,4	0,0

Se puede observar en la tabla 5 los valores medidos por cada sonda en cada ensayo realizado, para poderlos comparar posteriormente con la muestra recogida y medida en laboratorio para obtener las diferencias en cada caso. Este punto se muestra en la tabla 6.

En la figura 5 se muestran gráficamente los resultados obtenidos para la serie A de todos los modelos de sondas, para reflejar gráficamente la situación.

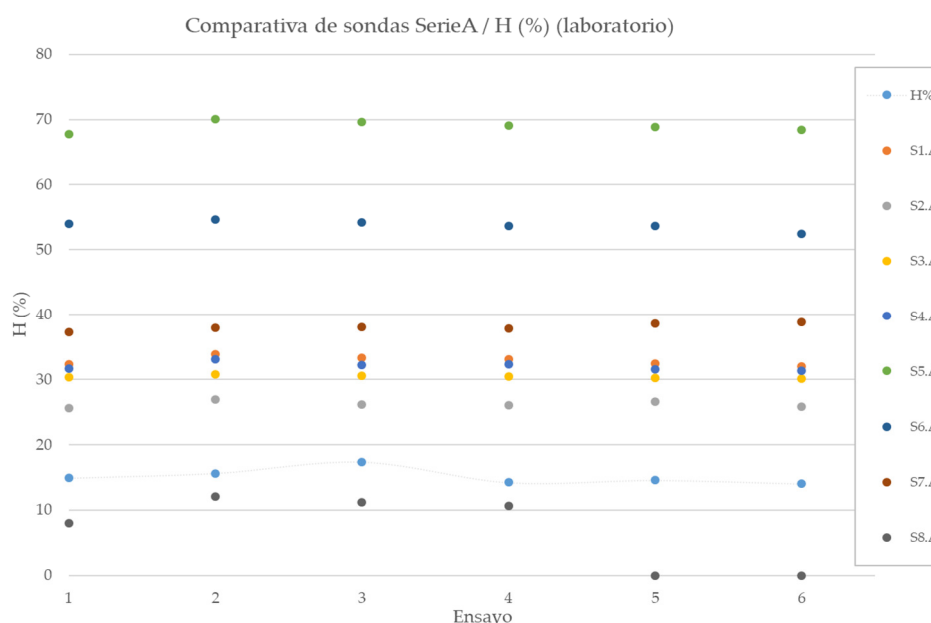


Figura 5. Representación de una serie de los distintos modelos de sondas de humedad.

Para reflejar la diferencia real de las medidas se adjunta la siguiente tabla que muestra la diferencia absoluta de las mediciones entre las sondas y la humedad obtenida en laboratorio.

Tabla 6. Diferencias de lectura Sondas-Ensayo laboratorio.

	S1.A	S1.B	S2.A	S2.B	S3.A	S3.B	S4.A	S4.B	S5.A	S5.B	S6.A	S6.B	S7.A	S7.B	S8.A	S8.B
1	17,4	14,9	10,7	12,9	15,4	15,6	16,7	17,1	52,8	54,2	39,1	22,1	22,4	19,1	6,9	0,9
2	18,2	15,7	11,3	13,6	15,1	16,6	17,4	16,9	54,4	53,7	39,0	24,1	22,3	18,5	3,6	0,6
3	15,9	17,4	8,8	10,8	13,2	14,3	14,8	15,0	52,3	52,1	36,8	21,3	20,7	17,2	6,2	2,6
4	18,9	14,3	11,9	14,4	16,2	17,1	18,0	17,6	54,8	54,4	39,4	24,5	23,5	21,6	3,6	0,3
5	17,8	17,2	12,0	13,3	15,7	16,8	17,0	17,7	54,2	54,4	39,1	25,8	24,0	22,7	5,1	1,1
6	18,0	16,8	11,8	13,0	16,0	16,6	17,2	18,0	54,3	54,9	38,4	24,9	24,7	23,3	5,1	1,1
Media	17,7	16,0	11,1	13,0	15,3	16,2	16,9	17,1	53,8	54,0	38,6	23,8	23,0	20,4	5,1	1,1
Min	15,9	14,3	8,8	10,8	13,2	14,3	14,8	15,0	52,3	52,1	36,8	21,3	20,7	17,2	3,6	0,3
Max	18,9	17,4	12,0	14,4	16,2	17,1	18,0	18,0	54,8	54,9	39,4	25,8	24,7	23,3	6,9	2,6

Al final de la tabla 6 se muestra la media de las diferencias y los valores mínimos y máximos de las diferencias de esos ensayos, para hacerse una idea clara de las diferencias existentes.

4. Conclusiones

Basándonos exclusivamente en los datos obtenidos durante este estudio y considerando que las sondas de humedad fueron instaladas en un suelo franco/franco limoso —tipo de suelo para el que los fabricantes recomiendan su uso—, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Existe una notable variabilidad entre modelos de sondas, incluso cuando se instalan en condiciones homogéneas y según las recomendaciones del fabricante. Las diferencias observadas entre sondas gemelas en eventos de riego o lluvia revelan que no todas responden con la misma sensibilidad ni temporalidad ante cambios en la humedad del suelo.
- Un porcentaje significativo de los dispositivos presentaron problemas técnicos: el 40 % de las sondas mostraron fallos de lectura en algún momento del ensayo, y el 20 % quedaron descartadas por errores graves como lecturas erráticas, daños durante la instalación o alto consumo energético. Esto subraya la importancia de la robustez del equipo en condiciones reales de campo.
- Las discrepancias entre sondas de distintos modelos fueron superiores a las observadas entre sondas gemelas, con diferencias máximas de lectura que, en algunos casos, superaron los 20 puntos porcentuales. Esta dispersión puede inducir a errores importantes en la interpretación del estado hídrico del suelo si no se cuenta con una calibración adecuada o una validación frente a métodos estándar.

- La comparación con medidas de laboratorio (método gravimétrico, norma UNE-EN ISO 17892-1) reveló grandes desviaciones, con diferencias medias superiores al 15 % en la mayoría de las sondas. Solo un modelo (Sonda 8) presentó valores cercanos a los obtenidos en laboratorio, lo que demuestra la necesidad de contrastar los sensores con métodos de referencia para confirmar su fiabilidad.
- La instalación, el mantenimiento y la interpretación de los datos requieren personal técnico cualificado. El uso de sondas de humedad no debe entenderse como una solución inmediata o universal, sino como una herramienta de apoyo que necesita conocimiento técnico específico para aprovechar todo su potencial.
- La calidad del dato es un requisito fundamental en el camino hacia una agricultura 5.0. Solo con sensores fiables, correctamente instalados e integrados en sistemas inteligentes, será posible automatizar con precisión la toma de decisiones en riego, mejorar la eficiencia en el uso del agua y avanzar hacia una agricultura más sostenible y competitiva.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la confianza puesta por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y en especial a la dirección del CENTER por la confianza puesta en el equipo técnico para poder seguir realizando estudios y proyectos que son de gran utilidad para el sector del regadío.

También agradecer a los compañeros implicados por estar siempre dispuestos a echar una mano cuando es necesario.

Referencias:

1. **AENOR (2015).** *UNE-EN ISO 17892-1:2015. "Geotecnia. Ensayos de laboratorio para suelos. Parte 1: Determinación del contenido de agua en masa"*. Asociación Española de Normalización.
2. **Directrices científico-técnicas para el establecimiento de sistemas de monitorización por sensores del contenido de humedad del suelo.** Departamento Riego CEBAS-CSIC: Emilio Nicolás Nicolás, Cristina Romero Trigueros y Departamento Suelo y Agua, Grupo RAMA. EEAD-CSIC: Nery Zapata Ruíz, José Manuel Miras Ávalos