

PROGRAMACIÓN DE RIEGOS EN PARCELA BASADO EN LA UTILIZACIÓN DE SENSORES CAPACITIVOS DE MEDIDA DE AGUA EN EL SUELO



PROGRAMA DE FORMACIÓN PARA REGANTES

Octubre 2025

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Fundamentos	2
2.1. Contenido de agua en el suelo	2
2.2. Demanda hídrica de los cultivos	3
2.2.1. Agua almacenada en el suelo.....	3
2.2.2. La lluvia efectiva	4
2.2.3. El riego	4
2.3. Influencia de las condiciones meteorológicas	4
3. Equipos de medición de agua en el suelo	6
4. Componentes y arquitectura.....	11
4.1. Componentes de un punto de control tipo	11
4.1.1. Sensores.....	11
4.1.2. Dataloggers.....	12
4.1.3. Contador volumétrico.....	12
4.2. Tecnologías de comunicación: <i>Internet of things</i>	13
5. Estación de control o medida.....	18
5.1. Elección de la ubicación.....	18
5.2. Instalación de los sensores en el perfil del suelo	19
5.3. Activación de los puntos de control	20
5.4. Plataformas y acceso a los datos.....	21
5.5. Mantenimiento.....	21
5.6. Beneficios de los sensores de humedad en el suelo	22
6. Interpretación de los datos para el pilotaje del riego	22
6.1. Conceptos previos	22
6.2. Como regar	27
7. Resumen.....	29

1. Introducción

En España, el 70 % del agua utilizada tiene como destino la agricultura. Las grandes extensiones agrícolas de España suelen encontrarse en zonas de clima semiárido con un balance hídrico natural negativo. Para ello, se requiere del aporte de agua de riego para obtener unos rendimientos de los cultivos óptimos. El cambio climático, con la situación de calentamiento global y unos patrones de precipitaciones alterados, han dificultado las condiciones para la agricultura en España. El incremento de temperatura modifica los ciclos de los cultivos, en algunos casos alargándolos, e incrementa las necesidades hídricas instantáneas de los cultivos para realizar sus funciones fisiológicas. Dicho incremento de las necesidades hídricas para la agricultura va acompañado de una disminución de las reservas hídricas. Los eventos prolongados de sequía, la disminución de las reservas de agua en forma de nieve, la no gestión de unos bosques cada vez más demandantes, la sobreexplotación y el descontrol de los acuíferos, la competencia por el recurso con otros sectores económicos y los requerimientos de mantenimiento de los medios acuáticos ha provocado una disminución significativa de la calidad y disponibilidad del agua en los reservorios donde la almacenamos para los diferentes usos: los embalses y los acuíferos.

Por ello, la utilización eficaz y eficiente del agua en el sector del regadío es clave para poder mantener la producción de alimentos y el medio natural vinculado al agua en buen estado ecosistémico, adaptando el sector a una menor disponibilidad de agua provocada por el cambio climático y los demás usos.

Las tecnologías digitales permiten mejorar procesos y gestiones propias de las explotaciones agrícolas. Actualmente, existe una amplia gama comercial de tecnologías digitales con un alto grado de madurez que permiten gestionar e incluso controlar de manera eficaz y con un coste cada vez menor el riego en parcela. Dichas tecnologías permiten incrementar la eficiencia en el uso del agua, el recurso más crítico en la agricultura de zonas con escasez. Estas tecnologías permiten a los agricultores optimizar sus recursos hídricos, mejorando la productividad de los cultivos y reduciendo el impacto que la actividad agraria pueda ocasionar sobre el medio ambiente.

En este documento del programa de formación para agricultores del proyecto *Smart Green Water* se expondrán conceptos fundamentales para aprender a gestionar los riegos a nivel de parcela en base a la utilización de sensores digitales de medida del contenido de agua en el suelo. Estos sensores permiten programar el riego minimizando las pérdidas de agua y manteniendo la zona radicular con una hidratación óptima que no comprometa el rendimiento del cultivo.

2. Fundamentos

2.1. Contenido de agua en el suelo

En este capítulo se explicarán algunos conceptos fundamentales relacionados con la humedad del suelo. Los términos que se introducen son clave para entender el equilibrio hídrico del suelo y el momento oportuno para aplicar riego, garantizando así el desarrollo saludable de los cultivos y el uso responsable del recurso hídrico.

Capacidad de campo (CC): contenido máximo de agua que es capaz de retener un suelo sin drenaje. En este punto, el suelo está húmedo, pero no saturado. Corresponde aproximadamente al contenido de agua que retiene una muestra de suelo saturada y luego sometida a una tensión de -33 kPa.

Punto de marchitez permanente (PMP): es el nivel de humedad del suelo en el que las plantas ya no pueden extraer suficiente agua, por lo que comienzan a marchitarse de forma irreversible. Habitualmente corresponde a una tensión de -1500 kPa.

Agua disponible para las plantas (ADP): es la fracción de agua presente en el suelo que puede ser efectivamente absorbida y utilizada por las raíces de las plantas para llevar a cabo sus funciones vitales. Este valor se calcula como la diferencia entre CC y PMP. Fuera de este rango, o bien hay demasiada agua o bien hay tan poca que la planta no puede absorberla.

Agua fácilmente aprovechable (AFD) para las plantas: es la parte de ADP que su uso no supone ningún esfuerzo ni estrés para los cultivos.

Por lo tanto, el objetivo principal del manejo del riego es mantener el contenido de agua en el suelo dentro de la franja ADP. Este concepto será de gran importancia a la hora de interpretar los datos de los sensores de agua en el suelo y la toma de decisiones en la programación de riegos (Figura 1).

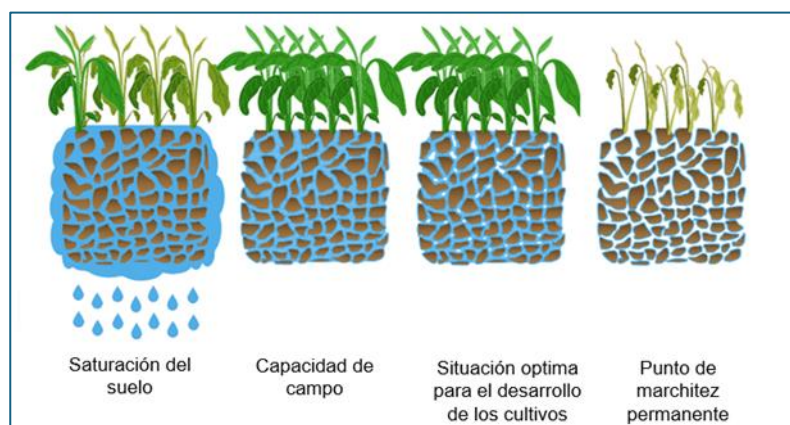


Figura 1: Diferentes niveles de agua contenida en el suelo y sus consecuencias.

2.2. Demanda hídrica de los cultivos

Para determinar cuánta agua realmente necesita un cultivo en función de las condiciones climáticas y de su etapa de desarrollo, es fundamental comprender los conceptos de evapotranspiración de referencia (ET_0), evapotranspiración del cultivo (ET_c) y el coeficiente del cultivo (K_c).

ET_0 : representa la cantidad de agua que utilizaría una superficie vegetal de referencia por los procesos combinados de evaporación y transpiración, bajo condiciones atmosféricas estándar.

ET_c : es la demanda hídrica específica de un cultivo determinado, obtenida multiplicando la ET_0 por un factor llamado K_c .

K_c : coeficiente que varía según el tipo de cultivo, el desarrollo del mismo y su fase fenológica (inicio, crecimiento, floración, madurez, etc.), permitiendo ajustar con precisión las necesidades de riego.

Es importante tener claro que la demanda hídrica de los cultivos se puede satisfacer por tres vías diferentes no excluyentes entre sí:

2.2.1. Agua almacenada en el suelo

El suelo es un depósito de agua que no está siempre vacío. Por lo tanto, conocer el estado de hidratación del suelo antes de la siembra, en los casos de los cultivos extensivos, o de la brotación en el caso de los frutales de hoja caduca, nos permite definir el momento óptimo de inicio de los riegos.

Para los cultivos extensivos de verano y los frutales, en años de primaveras lluviosas, esta cantidad de agua almacenada en el suelo puede ser importante, dependiendo de la capacidad de retención de agua disponible en el suelo y suele considerarse que el suelo empieza a capacidad de campo (el depósito lleno) a inicio de campaña. Por el contrario, en años con inviernos y primaveras secas, el agua almacenada en el suelo puede estar significativamente por debajo de capacidad de campo lo que implica que el cultivo empiece el ciclo en condiciones de estrés hídrico, con la consiguiente reducción del vigor y del potencial productivo. A medida que la campaña avanza, el cultivo utiliza el agua del suelo (vacía el depósito), esta agua se restituirá total (a capacidad de campo) o parcialmente mediante lluvias o riego. En este contexto, la presencia de sensores de agua en el suelo proporciona información del agua almacenada en el suelo y de la variación de esta, lo que evita el exceso de riego (por encima de capacidad de campo) o un déficit hídrico no deseado.

2.2.2. La lluvia efectiva

La lluvia que resulta aprovechable por el cultivo se conoce como lluvia efectiva. Lluvias poco abundantes (<3 mm) se consideran no efectivas al mojar solamente la zona superficial del suelo y ser muy probablemente evaporada. Lluvias muy abundantes en periodos cortos favorecen la escorrentía superficial, y resultan muy difíciles de estimar. Lluvias muy abundantes en un período de tiempo largo se consideran capaces de llenar efectivamente el perfil del suelo hasta alcanzar la capacidad de campo, en el suelo explorable por las raíces del cultivo, que es un depósito finito. La incorporación de sensores de humedad en el suelo permite obtener información precisa sobre la cantidad de lluvia realmente disponible para la planta, así como sobre la cantidad de agua que se pierde por drenaje.

2.2.3. El riego

La dosis de riego es la cantidad de agua que debemos aportar al suelo para compensar la evapotranspiración del cultivo y la ineficiencia del propio sistema de riego. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$DR = \frac{ETc - Pe}{Eff} \pm \Delta SWC$$

Dónde:

DR = Dosis de riego (mm)

ETc = evapotranspiración del cultivo (mm) calculada como $ETc = ETo * kc$

ETo = evapotranspiración de referencia obtenida de una estación meteorológica cercana

kc = coeficiente de cultivo obtenido de tablas de referencia

Pe = precipitación efectiva (mm)

Eff = eficiencia del sistema de riego (aproximadamente 0.9 para riego localizado; 0.8 para riego por aspersión; 0.6 para riego superficial)

ΔSWC = sobrante o déficit del evento de humectación anterior. Dicho valor se puede estimar mediante el análisis de las pendientes de los valores mínimos de los sensores de humedad en el suelo

Conceptualmente, la evapotranspiración del cultivo (ETc) se compone de dos componentes principales: la transpiración, que es la difusión de agua desde la planta a través de las hojas hacia la atmósfera, y la evaporación, que corresponde a la difusión de agua desde el suelo hacia la atmósfera.

2.3. Influencia de las condiciones meteorológicas

Días con mayor insolación y temperaturas elevadas incrementan la evapotranspiración, lo que se traduce en mayores necesidades hídricas para el cultivo. Por este motivo, considerar las

condiciones meteorológicas actuales, y especialmente las previsiones para la zona, permite tomar decisiones fundamentadas, ya sean basadas en datos pasados, en tiempo real o anticipándose a situaciones futuras.

Como se verá más adelante, muchos sistemas de gestión del riego cuentan con la capacidad de integrar los datos meteorológicos de una estación cercana para ajustar sus cálculos, reduciendo la cantidad de agua aplicada si se prevén lluvias, o incrementándola en caso de olas de calor u otras condiciones que aumenten la demanda hídrica.

3. Equipos de medición de agua en el suelo

Hay diferentes formas de programar el riego. Se puede hacer de manera constante durante toda la campaña, basarse en la experiencia del agricultor sin datos muy precisos, utilizar un método científico confiable llamado balance hídrico, emplear tecnologías avanzadas que facilitan la toma de decisiones o la combinación de los diferentes métodos y tecnologías.

A nivel técnico, podemos estimar las necesidades de riego de un cultivo a partir únicamente del balance hídrico del suelo. Esta estimación se basa en calcular el agua que el cultivo utiliza a través de la evapotranspiración, un proceso natural y necesario para las plantas, y compararla con el agua disponible, que proviene de la lluvia, el riego y el agua disponible en el suelo. Aunque el método del balance hídrico es bastante fiable, suele presentar algunos errores. Entre los errores más comunes está la sobrestimación de la evapotranspiración, lo que suele provocar un riego excesivo y el alejamiento de agua de la zona radicular por percolación profunda o escurrimiento superficial, así como la infravaloración de la cantidad de lluvia. Contrariamente, mediante el método del balance de agua también se pueden subestimar las necesidades hídricas de los cultivos provocando el desecamiento del suelo y la entrada en zona de estrés hídrico del cultivo, con la consecuente disminución de rendimiento.

Con la información que dan los sensores de humedad del suelo, se puede ajustar el método del balance hídrico y mantener el cultivo en una zona de confort hídrico. Mediante dicha información se pueden analizar los patrones de absorción de agua por las plantas, así como las pérdidas por percolación profunda ayudándonos así a determinar cuándo (frecuencia) y cuanto (cantidad) regar, evitando un exceso o un déficit en el riego. Generalmente, el uso de sensores de agua en el suelo para regar comporta una mayor eficiencia en el uso del agua reduciendo el volumen de riego sin alterar el rendimiento del cultivo. Además, al reducirse el volumen de agua de riego se disminuyen los costes del riego en forma de energía, coste directo del agua o lixiviación de fertilizante pudiendo ser económicamente rentables para una explotación a medio plazo.

El uso de equipos que permiten determinar el contenido de agua en el suelo facilita monitorizar el estado hídrico del suelo prácticamente a tiempo real. Por lo tanto, nos aportan inmediatez en la información lo que agiliza la toma de decisiones acertadas. Estas herramientas no solo registran los datos si no que los envían a la nube, mediante la tecnología del *Internet of Things* (*IoT*), facilitando la consulta y el análisis posterior desde un ordenador o móvil, sin necesidad de desplazarse a la parcela. Además de monitorizar el estado hídrico del suelo, los equipos de sensores pueden alertar sobre fallos de funcionamiento del sistema de riego antes de que

sea demasiado tarde. Los equipos están preparados para estar a la intemperie y durar largas temporadas en el campo sin necesidad de supervisión. Son robustos y su diseño está pensado para optimizar el consumo de energía (habitualmente se usan pilas convencionales, pero también en algunos casos funcionan con pequeños paneles solares).

Resumiendo, como se muestra a lo largo de este documento, estos sistemas, ubicados en los sitios adecuados y representativos de una parcela, pueden aportar información precisa, fiable, inmediata y accesible remotamente. Esta información resulta de alto valor para mejorar la toma de decisiones en la programación del riego, incrementando la eficiencia en el uso del agua en las parcelas.

Aunque existen diversos tipos de sensores de humedad del suelo -como los dieléctricos, de resistencia y tensiómetros-, este documento se centra en los sensores dieléctricos, debido a su coste moderado, bajo mantenimiento, alta fiabilidad, rápida respuesta en parcelas de regadío y larga durabilidad. Estos sensores miden la capacidad del suelo para almacenar carga eléctrica (o dieléctrica) con el fin de estimar su contenido de humedad. El dieléctrico del aire y del suelo es mucho menor que el del agua, por lo que cambios en el dieléctrico del suelo se pueden asumir como variaciones en su contenido de agua.

Existen diferentes tipos de sensores dieléctricos:

Sensores con tecnología FDR (*Frequency Domain Reflectometry*): Utilizan el suelo como condensador para medir la frecuencia resonante máxima en el circuito eléctrico y relacionar la frecuencia resonante con el contenido de agua (Figura 2).



Figura 2: Sensor FDR, 10HS ECHO Decagon

Sensores con tecnología TDR (*Time Domain Reflectometry*): Un sensor TDR mide el tiempo de viaje de una onda reflejada de energía eléctrica a lo largo de una línea de transmisión. El tiempo de viaje está relacionado con la capacidad de almacenamiento de carga del suelo y el contenido volumétrico de agua.

Los sensores TDR son más caros que los FDR; por este motivo, los primeros se utilizan más en parcelas experimentales, y los segundos, quizá más en campos comerciales.

Sensores de capacitancia: Utiliza el suelo como elemento condensador y emplea la capacidad de almacenamiento de carga del suelo para calibrar el contenido de agua (Figura 3). Se trata de unos sensores muy fiables y con bajo efecto del tipo de suelo, la densidad aparente y la salinidad en las medidas. Los sensores capacitivos están diseñados para ser fáciles de instalar siempre que se realice con minuciosidad. Requieren un mantenimiento mínimo, lo que los hace convenientes para su uso en una amplia gama de entornos agrícolas. Eso facilita una instalación por parte del propio usuario si fuera necesario, aunque en la mayoría de los casos son servicios que ya contemplan e incorporan las propias empresas.

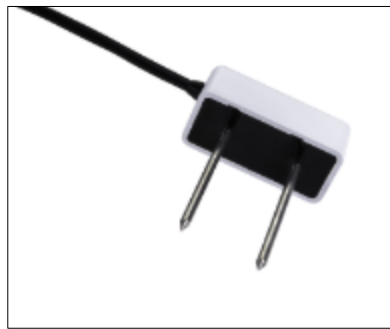


Figura 3: Sensor de capacitancia TEROS 10 de METEK

La instalación de estos sensores en campo es un punto crítico. Es indispensable un muy buen contacto con la matriz del suelo y si puede ser sin compactaciones ni alteraciones en los puntos de medición. Existen dos tipos de sensor o sondas de sensores que difieren en su instalación. Las sondas tubulares y los sensores modulares:

Sondas tubulares: contienen una serie de sensores distribuidos en la vertical a distancias entre sí ya determinadas, a lo largo de un tubo. Dichas sondas se instalan con una barrena y se insertan verticalmente (Figura 4). La ventaja es su fácil instalación y su desventaja es que su distribución viene determinada por el proveedor y se deben instalar fuera del alcance de la maquinaria agrícola.



Figura 4: Imagen de un sensor tubular y su instalación.

Sensores modulares: se pueden instalar individualmente cavando un hoyo con pala intentando alterar lo mínimo la superficie del suelo en que se van a insertar horizontalmente los sensores o con barrena (Figura 5), evitando en ambos casos las posibles vías preferentes de agua. Una vez instalados los sensores, se debe compactar el suelo a medida que se rellena el hoyo sin una fuerza excesiva.



Figura 5: Instalación de sensores modulares.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo (Tabla 1) que resume las tipologías más comunes y sus ventajas y desventajas.

Tabla 1: Resumen de tipología de sensores.

Tecnología	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
FDR	Mide la constante dieléctrica del suelo mediante señales de alta frecuencia	Rápido y preciso Buena sensibilidad Bajo consumo energético	Requiere calibración específica por tipo de suelo Puede ser afectado por salinidad
TDR	Mide el tiempo que tarda un pulso electromagnético en reflejarse en el suelo	Alta precisión Independiente de la salinidad Muy estable	Costoso Equipos más complejos y delicados
Capacitiva	Similar a FDR, miden la capacitancia que cambia con el contenido de agua	Económicos Fácil instalación Bajo consumo energético	Menos precisos que TDR Afectados por tipo de suelo y salinidad

4. Componentes y arquitectura

En este capítulo se describen los principales componentes que conforman un sistema típico de medición de humedad del suelo.

4.1. Componentes de un punto de control tipo

Aunque hay muchos modelos y opciones diferentes e incluso muchas empresas diferentes que ofrecen este tipo de productos, los puntos de control habitualmente contarán con unas características más o menos comunes. Cada uno de estos puntos consta principalmente de 3 partes: (1) los sensores de humedad del suelo, (2) el datalogger que registra los datos y, en algunos casos y recomendado, los envía a la nube y, en la mayoría de los casos y altamente recomendable, (3) un contador de riego. Muchos de los sistemas que pueden enviar datos remotamente van ligados a programas o aplicaciones de móvil con interfaces que facilitan la interpretación la información generada por los datos de los sensores al regante.

4.1.1. Sensores

La tipología de sensores existentes en el mercado ya se ha abordado en el capítulo anterior. La instalación de éstos en la vertical, siguiendo el perfil del suelo a diferentes profundidades, es una configuración muy común. Por ejemplo, en frutales con poca profundidad radicular y riego de alta frecuencia, se suelen colocar 3 sondas a 20, 40 y 60 cm de profundidad. Esto permite ver la dinámica del agua de riego o lluvia a lo largo del perfil del suelo en la zona de absorción radicular y por debajo de ella. En cambio, en cultivos con riego de soporte y alta capacidad de penetración radicular, esta distribución de sensores puede no ser la más adecuada. En cambio, en cultivos extensivos u hortícolas con raíces poco profundas también es habitual utilizar de 2 a 3 sensores, pero a menudo a menor profundidad (15, 30 y 45 cm) ya que no tendría sentido monitorizar a más profundidad si el sistema radicular del cultivo no se desarrolla en esa zona.

Además de tener en cuenta la ubicación en función del cultivo, la ubicación en función del sistema de riego también es de gran importancia (no es lo mismo una parcela de frutales por goteo que un campo de maíz por aspersión). En un sistema de riego por goteo, unos sensores situados justo debajo del gotero darán información de la zona saturada del suelo mientras que a medida que los desplazamos (siempre dentro de la superficie húmeda), proporcionarán una información detallada de cómo se expande y reduce el bulbo húmedo en cada evento de riego.

4.1.2. Dataloggers

Los datos recogidos por los sensores se registran en el datalogger. Estos sistemas monitorean y almacenan los datos y se encargan de enviarla a la nube (o no dependiendo de la tecnología escogida) a través de diferentes métodos: puede ser directamente desde el datalogger o mediante un gateway o concentrador (lo que se llama un envío en forma de estrella o de malla). Las cajas donde se conectan los sensores (Figura 6), funcionan habitualmente con pilas (aunque también hay modelos que funcionan con paneles solares o baterías), y permiten configurar con qué frecuencia queremos registrar datos o enviar estos datos, entre otros aspectos. A mayor frecuencia de medida y de envío, más consumo de energía por parte del datalogger, pero mayor precisión en los datos. La necesidad de estar largas temporadas en la intemperie, lluvia, y otras inclemencias, obligan a los dataloggers a tener un funcionamiento robusto y estanco que se identifica con las normas IP (mínimo IP65).



Figura 6: Vista frontal de un datalogger Em500 alimentado por pilas con un contador de agua por pulsos en un campo de manzanos.

4.1.3. Contador volumétrico

El contador volumétrico de riego permite conocer el agua aplicada en la parcela. Habitualmente se instala al inicio de una hilera de riego en el caso de frutales con riego por goteo o en un aspersor individual en el caso del riego por aspersión. Con la información del

contador y la superficie de riego que monitoriza dicho contador podemos conocer el riego de la parcela en m³/ha o mm. El contador permite verificar si el riego se ajusta a la programación establecida, lo que facilita la detección de posibles desviaciones. Además, la lectura simultánea de contadores y sensores de humedad del suelo en un mismo datalogger simplifica considerablemente la interpretación de los datos de los sensores (Figura 7), al permitir visualizar la llegada del frente húmedo y distinguir entre eventos de riego y lluvias.

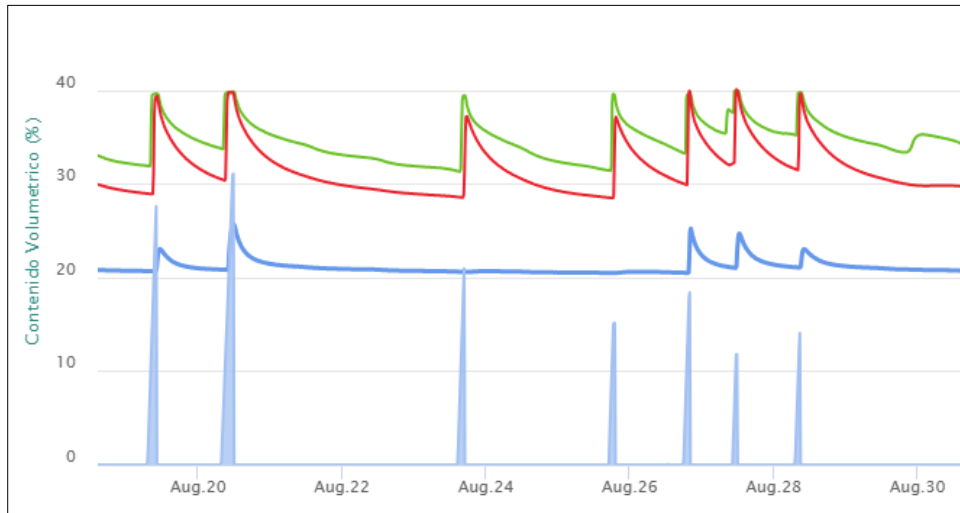


Figura 7: Vista de los datos de 3 sensores de humedad a diferentes profundidades (verde a 20 cm, rojo a 40 cm y azul a 60 cm) con caudalímetro instalado en la línea de gotero (triángulos azules).

4.2. Tecnologías de comunicación: *Internet of things*

Hace unos años, la falta de conectividad a internet en los dispositivos registradores de datos (sensores y dataloggers instalados en parcelas agrícolas), obligaba a almacenar la información localmente, lo que requería desplazarse físicamente al campo para descargar los datos con un ordenador. Esto limitaba fuertemente la inmediatez de la información y, por tanto, ralentizaba la toma de decisiones y generaba una fuerte dependencia de personal para la recolección manual de datos. Actualmente, la mayoría de los *dataloggers* ya incorporan un sistema de transmisión de datos a la nube por diferentes vías y con la periodicidad configurable, aunque hay un coste por este servicio. A continuación, se presentan los principales sistemas de comunicación disponibles, las tecnologías usadas y sus ventajas e inconvenientes.

El paradigma del IoT (Internet of Things) ofrece la posibilidad de conectar a internet una gran cantidad de dispositivos (máquinas, sensores o 'cosas') de bajo consumo desde cualquier ubicación gracias al uso de tarjetas SIM. Tienen una capacidad de transmisión de datos y una

periodicidad limitada, lo que garantiza una gran autonomía y gastos de conectividad reducidos (debido al coste aplicado por MByte recibido o enviado, tal y como conocemos ahora con las redes 3G/4G/5G).

La Tabla 2 muestra un resumen de las ventajas, desventajas y requisitos generales que podemos encontrar en una red IoT aplicada en una parcela agrícola.

Tabla 2: ventajas, desventajas y requisitos generales de una red IoT.

Ventaja	Desventaja	Requisitos
Bajo mantenimiento	Baja velocidad de transmisión de datos	Cobertura de operador móvil
Permite conexiones por cable o inalámbricas entre múltiples dispositivos de una finca	Alcance limitado en las conexiones inalámbricas debido al tipo de terreno	Los dispositivos deben estar bien protegidos para 'sobrevivir' al exterior
Conectividad a internet		Tarjeta SIM (la cantidad dependerá del tipo de red instalada)
Precios de infraestructura asequibles		Alimentación mediante placa solar/pilas
Bajo consumo de batería		
Bajo consumo de datos (SIM)		

De cara a montar una red podemos aplicar (y combinar) diferentes tecnologías IoT, como por ejemplo el conocido 3G, NB-IoT (NarrowBand IoT), LTE-M, LoRa, WiFi o BLE (Bluetooth) diseñadas para ofrecer bajo consumo energético, mejor alcance y tarifas optimizadas para pequeños volúmenes de datos.

A continuación, se describe una breve lista de características y ejemplo de uso con cada una de estas comunicaciones inalámbricas:

2G/3G/4G/5G

- Tipología de redes más conocidas habitualmente.
- Requiere que cada dispositivo tenga una tarjeta SIM.
- La conexión depende de la cobertura del operador móvil (Vodafone, Movistar, Orange, etc.).
- Permite transmisión de grandes volúmenes de datos (imagen, vídeo, etc.) a alta velocidad y tiempo real. La velocidad y la cobertura depende de la tecnología que se encuentre disponible:
 - o 2G: de 30 a 50 kbps (actualmente en desuso).
 - o 3G: de 5 a 8 Mbps, entre 3 y 11 km de cobertura.
 - o 4G: de 50 a 80 Mbps, unos 8 km de cobertura.

- 5G: de 50 Mbps a 5 Gbps, entre 300 y 450 m de cobertura.
- La alta frecuencia y velocidad de transmisión de datos implica un consumo de energía alto, por lo que es poco adecuado para dispositivos alimentados a batería (puede tener una durabilidad de horas o pocos días).
- Usos típicos: conectar a internet dispositivos con alta demanda de transmisión de datos (teléfonos móviles, cámaras de vídeo, etc.)

NarrowBand-IoT

- Requiere que cada dispositivo tenga una tarjeta SIM.
- La conexión también depende del operador.
- Menor consumo de batería (las baterías pueden llegar a durar años)
- Menor velocidad de transmisión de datos (hasta 250 Kbps).
- Optimizado para programar el envío de datos a intervalos regulares de tiempo (no en tiempo real).
- Pensado para comunicar dispositivos estáticos. Al cambiar de ubicación puede tardar en reconectarse.
- Cobertura amplia gracias al uso de bandas de radio de largo alcance, de hasta 10 km.
- Usos típicos: conectar a un servidor web diferentes sensores de humedad, estaciones meteorológicas, etc.

LTE-M

- Requiere que cada dispositivo tenga una tarjeta SIM.
- La conexión también depende del operador.
- Red orientada a dispositivos móviles, ya que al encontrarse en movimiento puede cambiar de antena sin perder la conexión, ofreciendo una conectividad más estable.
- Consumo de energía ligeramente superior a NB-IoT (las baterías duran meses).
- Transmisiones de hasta 1 Mbps alcanzando hasta 10km en condiciones favorables.
- Permite enviar datos en tiempo casi real, incluso audio o localización frecuente.
- Usos típicos: rastreo de tractores ganado, drones, etc.

LoRa

- Los dispositivos no incluyen una tarjeta SIM, por lo que una red 'puramente LoRa' no tiene conexión a internet.
- Las redes LoRa son privadas (ya que no están conectadas a ninguna otra red), por lo que requiere que alguien haga la instalación de dispositivos emisores y receptores 'desde cero'.
- Requiere que los dispositivos tengan un chip LoRa para poder comunicarse entre sí.

- Necesita incluir otro dispositivo (habitualmente conocido como Gateway) con acceso a internet para cumplir con el paradigma IoT, permitiendo así pagar incluso por una única SIM. Esto reduce significativamente el coste de transmisión de datos.
- Comunicación de radio de largo alcance (típicamente entre 5 y 15km dependiendo de las irregularidades del terreno).
- Muy bajo consumo de batería (puede durar años).
- Menor velocidad, entre 0.3 y 50 Kbps. No alcanza la comunicación en tiempo real.
- Usos típicos: sensores distribuidos en fincas extensas (humedad, válvulas, estaciones meteorológicas).

WiFi

- Red inalámbrica convencional. Requiere que los dispositivos con chip WiFi se conecten a un router de la finca que tenga conexión a internet.
- Fácil de instalar si la finca ya dispone previamente de red WiFi.
- Gran velocidad de transmisión de datos (ideal para transmisión de imágenes y vídeos en tiempo real). Puede variar dependiendo de la banda del router instalado, por ejemplo:
 - o 2.4 GHz: hasta 100 Mbps, con un alcance de hasta 100m en condiciones ideales en entornos rurales.
 - o 5 GHz: hasta 1 Gbps, con un alcance de entre 30 a 60m en condiciones ideales en entornos rurales.
- Alto consumo de energía (por tanto, no es adecuado para dispositivos alimentados por batería).
- Usos típicos: cámaras de videovigilancia, sensores en entornos controlados o conectados a la corriente.

Bluetooth Low Energy (BLE)

- Variante Low Energy del tradicional Bluetooth.
- Corto alcance, hasta 10m (dependiendo de las características del terreno).
- Muy bajo consumo (las baterías podrían durar años).
- Velocidad muy reducida, hasta 1 Mbps.
- Los dispositivos BLE deben conectarse a un HUB o teléfono móvil (dispositivos receptores) cercano para tener acceso a internet.
- Uso típico: sensores cuyas lecturas pueden obtenerse con el teléfono móvil, o sensores ubicados dentro de un invernadero.

A continuación, en la Tabla 3 se encuentra un resumen de las características de cada tecnología.

Tabla 3: Comparación de las características entre diferentes tecnologías IoT

Características	3G/4G/5G	NB-IoT	LTE-M	LoRa	WiFi	BLE
Velocidad	Entre 5 Mbps y 5 Gbps	Hasta 250 Kbps	Hasta 1 Mbps	Hasta 50 Kbps	De 100 Mbps a 1 Gbps	Hasta 1 Mbps
Alcance	Entre 300m y 11km	Hasta 10 km	Hasta 10 km	Entre 5 y 15 km	Entre 30 y 100 m	Hasta 10 m
Duración de la batería	Muy baja (días)	Muy alta (años)	Alta (meses)	Muy alta (años)	Muy baja (días)	Muy alta (años)
Requiere SIM en cada dispositivo	SI	SI	SI	NO	NO	NO
Requisitos o Limitaciones	Disponibilidad del operador móvil	Envíos puntuales de datos	Disponibilidad del operador	Gateway	Router	HUB

5. Estación de control o medida

5.1. Elección de la ubicación

Tomar la decisión de donde instalar cada punto de control es una de las decisiones más trascendentes. No se puede tener una gran cantidad de equipos por parcela ya que se corre el riesgo de bajar la rentabilidad de la explotación debido al coste de la instrumentación. Si bien las empresas especializadas suelen detectar los mejores puntos de control, nadie como el propio agricultor conoce las particularidades de su finca. Su conocimiento del terreno es clave para una correcta ubicación de los puntos de control.

El primer aspecto por considerar es la variabilidad del terreno y la distribución de los sectores de riego. En algunas fincas, el suelo puede tener un comportamiento homogéneo, incluso abarcando varios sectores de riego. En estos casos, uno o pocos puntos de control pueden ser suficientes para representar adecuadamente toda la finca. Sin embargo, en fincas con mayor complejidad (ya sea por la orografía o por la tipología de suelos), la variabilidad puede ser elevada, incluso dentro de un solo sector de riego. En estos casos, puede ser recomendable instalar varios puntos de control por finca o incluso por sector, o bien tomar una decisión basada en el tipo de suelo y el relieve que minimice el error si se desea gestionar el riego en base a los datos obtenidos por los sensores.

En cualquiera de estas situaciones, la experiencia del agricultor y los conocimientos de los técnicos deben ser suficientes para elegir el número de sensores ideal y sus ubicaciones en la finca. Dentro de cada parcela o sector de riego, una vez iniciamos la instalación también, es conveniente elegir un punto representativo donde en general los cultivos tengan un aspecto homogéneo y con un buen vigor. Es de gran utilidad el uso de imágenes satelitales pasadas con algún indicador de vigor de los cultivos para determinar aquellas zonas más representativas o que se quieran utilizar como referencia. También es importante comprobar que el sistema de riego funciona bien en ese punto, ya que esto puede generar errores si no es así. Para ello, se debe hacer un análisis de la uniformidad del riego.

Se aconseja tomar muestras del suelo (muchas empresas ya lo tienen en el protocolo) para poder realizar un análisis de las características físicas y texturales del suelo, conocer su comportamiento hidráulico y poder ajustar los valores de capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y definir las curvas características que relacionan la tensión con la que el suelo retiene el agua con el contenido volumétrico de agua en el suelo.

5.2. Instalación de los sensores en el perfil del suelo

La correcta instalación de los sensores de humedad en el perfil del suelo es un factor determinante para obtener datos fiables y representativos del estado hídrico del cultivo. Una instalación deficiente puede provocar lecturas erróneas, pérdida de contacto entre el sensor y el suelo, o daños en el equipo. Por ello, es fundamental realizar la colocación siguiendo las recomendaciones del fabricante, utilizando herramientas adecuadas para evitar la alteración de la estructura del suelo y garantizando un buen contacto entre el sensor y el suelo.

La profundidad de instalación debe definirse en función del tipo de cultivo, el sistema radicular y los objetivos del monitoreo. En cultivos con raíces profundas, como frutales o cultivos extensivos, es habitual instalar sensores a diferentes profundidades (por ejemplo, 20, 40 y 60 cm) para captar la dinámica de humedad en todo el perfil activo. En cultivos hortícolas o de raíces más superficiales, bastará con uno o dos puntos de medición. Es importante también considerar la textura del suelo, ya que esta influye en la retención de agua y, por tanto, en la interpretación de los datos. En el caso de las sondas modulares, la profundidad de instalación de cada sonda es un factor que no viene determinado por la configuración de la sonda. Sin embargo, en el caso de las sondas tubulares o multiprofundidad, el usuario debe tener clara la configuración de la sonda a instalar ya que ésta viene determinada por parte del fabricante.

Para garantizar una instalación óptima, se recomienda realizar la colocación de la sonda cuando el suelo esté con un contenido de humedad óptimo, ya que esto ayuda a evitar el derrumbamiento del suelo y a minimizar la formación de espacios de aire y grietas que pueden aparecer posteriormente al secarse el suelo. Para minimizar los daños a las raíces de los cultivos, se recomienda instalar los sensores cuando los cultivos no están activos. Es importante evitar zonas excesivamente pedregosas, ya que dificultan la perforación con la broca o pala, pueden dejar cavidades de aire alrededor del sensor o interferencias por la proximidad de piedras grandes, lo que puede distorsionar las lecturas. Normalmente, las sondas tubulares se instalan con broca o barrena. En este tipo de sondas, es importante añadir parte del suelo extraído en estado de humedad de saturación una vez instalada la sonda en el agujero alrededor de la sonda para evitar que queden bolsas de aire atrapadas alrededor de la sonda que alterarían las lecturas. Durante la perforación, se debe mantener un ángulo de 90° con la superficie del suelo para asegurar una inserción vertical y precisa. Las sondas modulares pueden instalarse con barrena o con una pala. En este caso, durante la perforación o excavación del hoyo, se debe retirar cuidadosamente el suelo extraído para su restitución, preferiblemente respetando las capas del suelo original, cuando se entierre la sonda, procurando la alteración mínima de las condiciones naturales del terreno. Además, es fundamental considerar las labores agrícolas previstas en las cercanías del punto de

instalación y proteger el cableado cuando sea necesario, para evitar daños por maquinaria o pisoteo. La instalación de los sensores es un punto crítico, por lo que es altamente recomendable asesorarse por técnicos especialistas en instalación de sondas o incluso pedir la instalación a empresas de sondas de humedad para obtener resultados fiables.

Aunque siempre puede haber excepciones según el tipo de cultivo, el sistema de riego y las características del suelo, en riego localizado y aspersión se aconseja seguir estos criterios de instalación (Figura 8):

- ✦ Instalar el dispositivo en la zona intermedia entre la vertical de un gotero y el límite del área húmeda en superficie.
- ✦ Profundidad del sensor siempre dentro de la zona radicular del cultivo. El sensor más profundo en la zona límite (para detectar flujos de lixiviación), el sensor intermedio en la zona de más densidad radicular (para detectar las máximas extracciones del cultivo) y el sensor superficial a media distancia entre el sensor intermedio y la superficie del suelo (para detectar la pluviometría efectiva).

Por ejemplo, en manzanos intensivos (2.000 árboles/ha) es habitual que estén colocados a 15, 30 y 45 cm de profundidad.

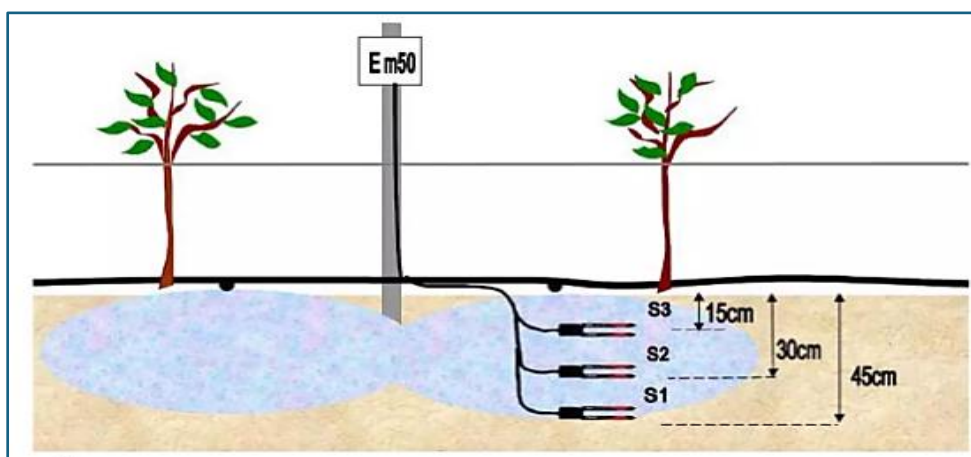


Figura 8: Esquema de instalación de sensores modulares en una plantación de cultivos leñosos (original de SAF Sampling Water)

5.3. Activación de los puntos de control

Una vez el punto de control está instalado y se activa el envío de datos, estos empiezan a registrarse de inmediato. A menudo, podría ser conveniente hacer un riego abundante después de la instalación de los sensores con el objetivo de asentar el suelo y asegurarse

que los sensores detectan el frente húmedo y los datos se envían correctamente. Este riego o lluvia abundante puede servir como dato de referencia para determinar la capacidad de campo en cada sensor y, así, calibrar las medidas en función de este valor.

Cabe tener en cuenta que cada sensor está en un entorno diferente (presencia de piedras, raíces, textura del suelo, compacidad...) y que un mismo valor para diferentes sensores no indica un mismo estado de humedad del suelo. Para ello, es recomendable calibrar cada sensor por su valor de referencia.

La empresa instaladora nos proveerá la información necesaria para la consulta de datos como las ubicaciones, las credenciales para poder consultar los datos en la web o plataforma y los demás detalles necesarios.

5.4. Plataformas y acceso a los datos

Una vez finalizada la instalación y con acceso a la plataforma, podremos visualizar toda la información que proporcionan los sensores. Generalmente, esto incluye un mapa con la ubicación de los sensores dentro de las parcelas (en muchos casos editable), la lista de puntos de control dados de alta y, lo más importante, un visor con las gráficas de humedad del suelo correspondientes a cada sensor o punto de control. En un apartado posterior se explica en detalle cómo interpretar estas gráficas y cómo utilizarlas para ajustar la programación del riego de forma más eficiente.

A nivel de servicio, lo habitual es mantener una cuota anual con la empresa proveedora, ya que esta suele cubrir el envío y almacenamiento de los datos, así como el acceso a la plataforma del proveedor.

5.5. Mantenimiento

El esfuerzo de mantenimiento por parte del regante que requiere un punto de control suele ser bajo. Normalmente se limita a cambiar las baterías en caso de que se agoten y de tener cuidado con las tareas de campo que puedan afectar a los equipos. La ventaja de tener un contrato de membresía con la empresa proveedora de los equipos y del servicio del visor, es que en algunos casos se hacen cargo del mantenimiento mínimo y de la resolución de incidencias no forzadas. Cabe prever, pero, la presencia de animales salvajes que puedan dañar los equipos, especialmente el cableado, y las labores que puedan hacer saltar alguna piedra (p. ej. segadoras) y proteger los equipos adrede.

5.6. Beneficios de los sensores de humedad en el suelo

Sea cual sea la fuente del agua que llega al suelo (lluvia, riego, etc.), las sondas proporcionan un valor representativo y prácticamente en tiempo real del estado de la humedad del suelo, del movimiento del frente húmedo, de la pérdida de agua por percolación profunda, de las dinámicas de humectación y desecación del bulbo húmedo...en un punto representativo de la parcela. Es comparable a disponer de una radiografía del suelo a diferentes profundidades, que permite estudiar el comportamiento del perfil hídrico durante el riego. Estos sistemas ofrecen una gran cantidad de información lo que facilita un análisis detallado para una adecuada gestión del recurso hídrico.

6. Interpretación de los datos para el pilotaje del riego

La interpretación de la información más fácil es a partir de la transformación gráfica de la evolución de los sensores en periodos de una o dos semanas, donde se obtienen gráficos similares a la Figura 9.

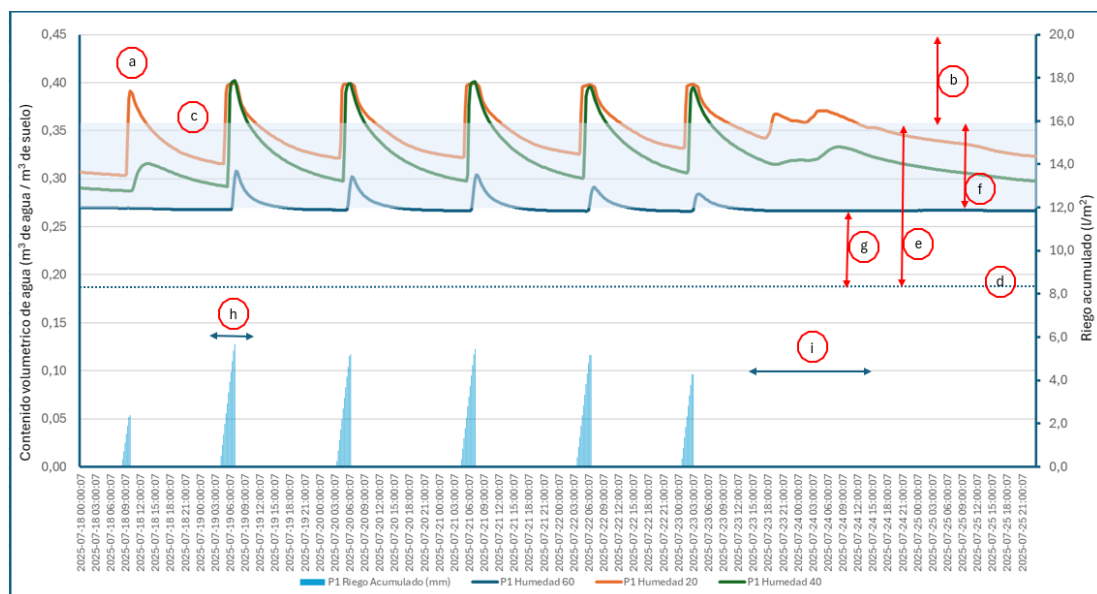


Figura 9.- Gráfica tipo realizada a partir de información de sensores de humedad en el suelo (eje izquierdo), colocados a 20, 40 y 60cm de profundidad en un cultivo leñoso intensivo en goteo, con contador volumétrico del agua de riego (eje derecho).

6.1. Conceptos previos

A continuación, se describen los aspectos más relevantes para la interpretación de los datos de los sensores contenidos en la Figura 9 y algunas figuras auxiliares.

(Figura 9a) FRENTE HÚMEDO. Después de una lluvia (i.-) o un riego (j.-) los sensores suelen responder incrementando significativamente (cerca a una línea vertical) su valor hasta llegar a un pico. Eso significa que han detectado el frente húmedo, o sea, el movimiento repentino de agua en el suelo debido a un evento de humectación. Un patrón típico es que los sensores más cercanos al gotero (tanto vertical como horizontalmente) detecten antes el frente húmedo que aquellos más alejados.

(Figura 9b) ZONA DE SATURACIÓN. Después de un evento de humectación, el valor pico de los sensores causado por la llegada de un frente de humectación, baja rápidamente (pendiente muy negativa de la curva del sensor). En ausencia de un cultivo activo (fuera de campaña o por la noche), la práctica totalidad de la disminución de agua se debe al movimiento vertical del agua o drenaje. El área entre el frente húmedo y la estabilización de la curva de la lectura del sensor (cuando la pendiente empieza a tender a cero se conoce como la zona de saturación.

(Figura 9c) CAPACIDAD DE CAMPO (CC). Cuando efectuamos un riego o hay una lluvia abundante en ausencia de un cultivo activo, cuando la lectura del sensor se empieza a estabilizar (pendiente tendiendo a 0) un día o dos después del evento de humectación (siempre que se haya saturado el suelo) se puede considerar que el suelo retiene toda el agua disponible (Figura 10). Este punto se conoce como capacidad de campo del sensor y es utilizado como valor de referencia de suelo “lleno” y es muy importante a la hora de tomar decisiones de riego. Alternativamente, cuando hay cultivo se suele utilizar el punto de inflexión entre dos pendientes de la curva del sensor para determinar el punto de CC (Figura 11).

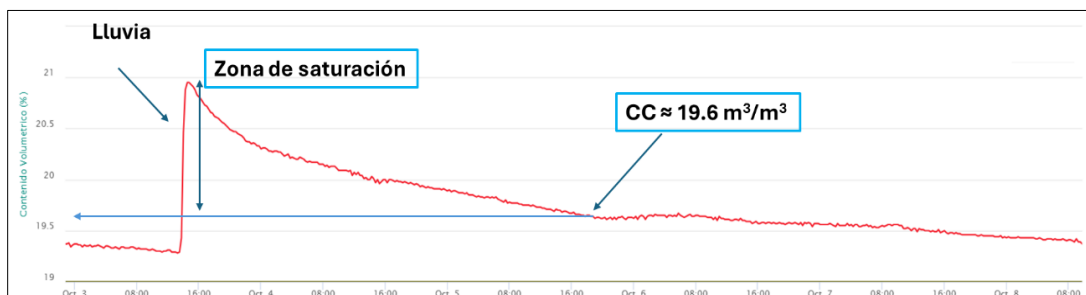


Figura 10.- Determinación de los puntos de capacidad de campo para los sensores mediante el método de saturación del suelo.

(Figura 9d) PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP). Se define como el punto mínimo de humedad en el suelo que la planta requiere para no marchitarse. Si la humedad del agua que tenemos en el suelo decrece hasta este punto o inferior, y no revertimos la situación, la planta no podrá recuperar la turgencia porque no podrá conseguir absorber agua

del suelo. Este punto suele estimarse en función de la textura del suelo y en referencia a la capacidad de campo del propio sensor. En el caso de la figura 9, se considera un valor de PMP de $0.27 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para todos los sensores. No es deseable acercarse al PMP.

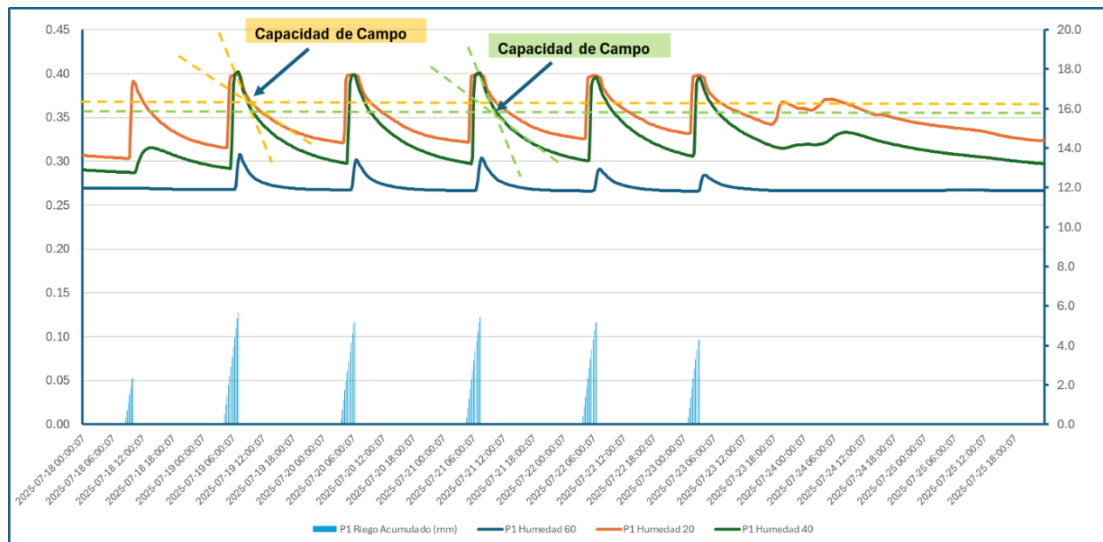


Figura 11.- Determinación de los puntos de capacidad de campo para los sensores colocados a 20 y a 40 de profundidad en un cultivo leñoso intensivo en goteo, con contador volumétrico del agua de riego (eje derecho).

(Figura 9e) AGUA DISPONIBLE (ADP). Es la diferencia entre el punto de Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP).

(Figura 9f) AGUA FACILMENTE APROVECHABLE. (AFD). Es el contenido de agua en el suelo en que los cultivos no entran en zona de estrés hídrico. Se define como la diferencia entre el punto de CC del sensor y el punto en que el agua deja ser fácilmente aprovechada, o sea, requiere un esfuerzo, por el cultivo. Dicho punto depende de las características de cada cultivo como la profundidad explorable por las raíces y la capacidad de absorción de agua y de la demanda hídrica de la atmósfera. Es un concepto empírico que suele ir desde el 50% de la ADT agotada en cultivos sensibles al estrés como el manzano, hasta el 65 % del agua disponible agotada en cultivos resistentes como el olivo para una ETo de 5 mm. En el caso de la figura 9 se considera un punto umbral de estrés del 50% del agua disponible.

Tabla 4.- Fracción de agotamiento del agua disponible en el suelo para condiciones sin estrés hídrico (FAO,2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO Riego y drenaje 56).

Cultivo	Fracción de agotamiento	Cultivo	Fracción de agotamiento
Lechuga	0.30	Patata	0.35
Almendro	0.40	Girasol	0.45

Melón	0.45	Lentejas	0.50
Manzano	0.50	Cítrico	0.50
Cebada / Trigo	0.55	Maíz	0.55
Alfalfa	0.55	Olivo	0.65

(Figura 9g) AGUA DIFÍCILMENTE APROVECHABLE (ADA). Es el agua que está disponible para la planta y su absorción requiere entrar en zona de estrés hídrico. Se define como la diferencia de agua restante entre ADT y el AFA por encima del PMP.

ZONA DE CONFORT (trama azul). Se define como aquella en que el regante asume como no estresante y sin riesgo de que el cultivo entre en estrés hídrico. Es por tanto un área entre el punto de CC y un punto arbitrario pero seguro (lo decide el técnico o el regante). Mediante el riego, se intentará no estar por debajo de la zona de confort. Se distingue de la AFA por ser una decisión del regante, aunque a veces pueda coincidir. Por algunos cultivos muy sensibles al estrés, a veces se asume el punto inferior de la zona de confort como el 90-80% del punto de CC.

(Figura 9h) RIEGO. Efectos del riego sobre los sensores de humedad del suelo colocados a 20, 40 y 60 cm de profundidad. El frente de humedad alcanza primero el sensor ubicado a 20 cm de profundidad y, poco después, el de 40 cm, mostrando ambos una respuesta similar. En cambio, el frente húmedo llega en menor medida al sensor de 60 cm, lo cual es deseable para minimizar el drenaje profundo y evitar pérdidas de agua.

(Figura 9i) LLUVIA. Efectos de la pluviometría sobre los sensores de humedad instalados. La lluvia efectiva tiene influencia sobre los sensores de 20 y 40 cm de profundidad, mientras que su frente húmedo no tiene influencia sobre el sensor colocado a 60 cm, por lo que no hay drenaje. La evolución de los sensores reflejando las extracciones de agua por parte del cultivo presentan una pendiente bastante menor comparadas con las aportaciones hídricas que provienen del riego.

ABSORCIÓN POR PARTE DE LA PLANTA. Durante las horas nocturnas se puede asumir que la planta no transpira por lo que una bajada de agua detectada por el sensor se atribuye a movimiento vertical de agua. En cambio, durante el día, si la lectura del sensor está por debajo de CC, una reducción del contenido de agua en el suelo se puede atribuir a la evapotranspiración del cultivo. Esta información es valiosa para determinar la zona de absorción radicular o incluso estimar el patrón diario de consumo de agua por parte del cultivo. Como ejemplo, en la figura 11 se aprecia como la máxima absorción de agua se realiza a los 20 y 40 cm de profundidad.

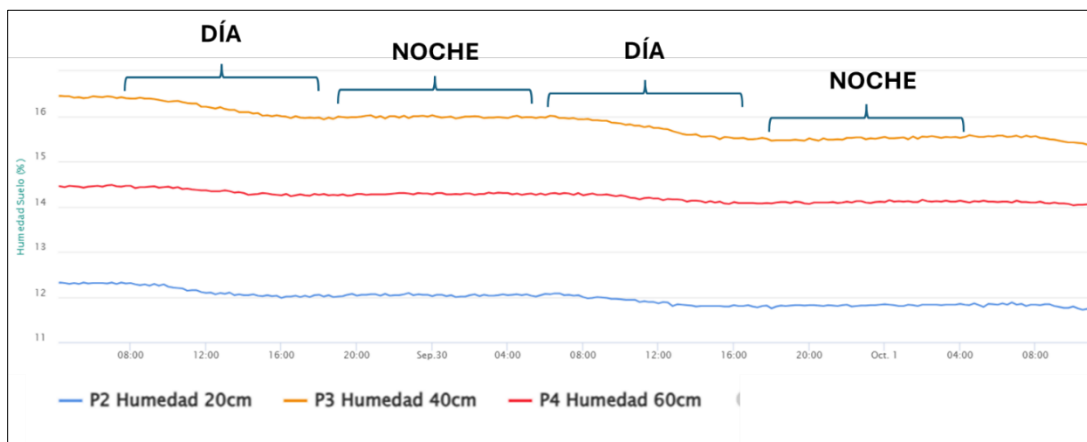


Figura 11.- Patrón típico de absorción radicular de agua por parte del cultivo detectado por los sensores.

A efectos prácticos es más recomendable no usar los datos directamente de los sensores (m^3/m^3) sino en porcentaje de agua disponible para las plantas (ADP). Cada sensor tiene un entorno (piedras, raíces, porosidad...) que condiciona los valores medidos. Para una mejor interpretación se relativizan los datos a capacidad de campo y punto de marchitez y el resultado se da en forma de % del agua disponible total. En la figura 12 se pueden apreciar datos relativizados con un criterio de zona de confort del 60 % del ADT. Es importante el soporte de un técnico especialista para relativizar los datos.

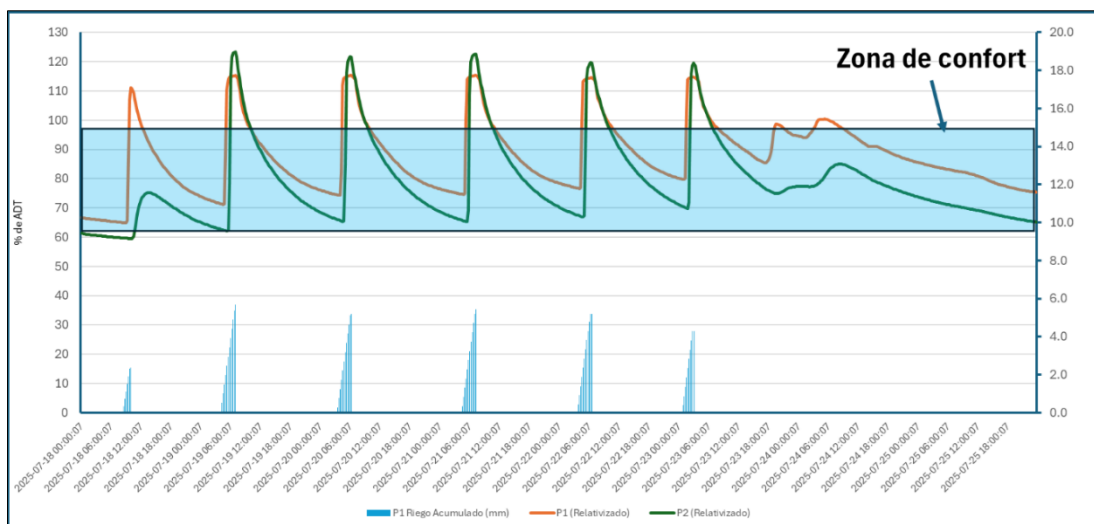


Figura 12.- Valores relativizados a CC y PMP para los sensores colocados a 20 y a 40 de profundidad en un cultivo leñoso intensivo en goteo, con contador volumétrico del agua de riego (eje derecho).

6.2. Como regar

Durante las horas diurnas, un cultivo activo transpira, o sea, absorbe agua líquida del suelo a través de las raíces y la moviliza hasta las hojas para ser evaporada. Por lo tanto, causa una bajada de humedad en el suelo detectada por los sensores, tal y como se observa entre los riegos de la gráfica. Si esta bajada se detecta más allá del punto de CC y sin eventos de humectación (riego o lluvia), se puede asumir que la totalidad de la reducción de contenido volumétrico de agua en el suelo es debido a la utilización por parte del cultivo.

El objetivo del riego basado en sensores de humedad del suelo es mantener el sensor representativo de la máxima densidad radicular del cultivo dentro de la zona de confort hídrico. Para ello, se procura que el sensor instalado a más profundidad no esté situado cerca de la zona de saturación.

Si se riega más de lo que el cultivo pueda absorber o el suelo puede almacenar (esto puede variar en función de la textura, la porosidad y el contenido en la materia orgánica del suelo), los sensores indicarán que se está en zona de saturación y, por lo tanto, el agua se mueve verticalmente. En una configuración de sensores vertical, instalar un sensor justo por debajo de la profundidad de enraizamiento del cultivo puede dar información de pérdidas por percolación profunda. Cuando dicho sensor se encuentra en zona de saturación, toda esa agua se pierde fuera de la zona radicular, lo que indica un exceso de agua, en caso de un evento de riego.

En caso de lluvias abundantes, la pérdida por percolación profunda puede ser inevitable y su detección indica que todo el perfil estará a capacidad de campo una vez se estabilice la curva de los sensores. En caso de utilizar aguas con cierta salinidad o trabajar en suelos con problemas de salinidad, es deseable un drenaje de lavado. En caso de utilizar fertilizantes químicos y/o fertirrigación, la percolación profunda también implica una pérdida de fertilizante.

El objetivo del riego es aportar el agua suficiente para mantener la humedad del suelo dentro de la zona de confort, evitando la percolación profunda (sobreriego) y estrés hídrico (déficit de riego). Para ello, habitualmente se tiene en cuenta la lectura de la sonda situada en la zona de mayor absorción radicular, que habitualmente es la intermedia (p. ej. 40 cm para el cultivo leñoso intensivo de la Figura 9).

Una excepción con complejidad añadida son los riegos deficitarios controlados. En las fases de déficit hídrico controlado se trabaja por debajo de la zona de confort estableciendo un umbral de déficit máximo según el cultivo (por ejemplo, reducir un 20 % del ADA). No obstante,

para el uso de este tipo de estrategias, es altamente recomendable usar medidas de estado energético del agua en el suelo (potencial hídrico) o medidas directas de indicadores de estrés hídrico en la planta y contar con asesoramiento de técnicos especialistas.

Aunque no efectuemos ningún riego, las precipitaciones nos pueden ayudar y aportar agua al cultivo, aunque la lluvia es un factor con gran variabilidad espacial. Para ello, es muy recomendable tomar datos manualmente o tener un pluviómetro conectado al datalogger de la finca. Sin ninguno de estos datos podremos visualizar la subida de los sensores (con más o menos intensidad en función de la lluvia) sin registrar ningún riego, pero no se podrá cuantificar.

7. Resumen

El presente documento forma parte de la documentación del programa de formación para regantes del proyecto *Smart Green Water*, para formar a los regantes en la tecnología digital de utilización de sensores capacitivos de medida de agua en el suelo para la programación del riego en parcela.

Consta de descripción de los fundamentos agronómicos del agua utilizable para el riego de los cultivos, los distintos equipos y componentes existentes en el mercado para la medición del contenido volumétrico del agua, los principales criterios y aspectos a tener en cuenta en la instalación en campo y la interpretación de los datos de forma gráfica para pilotar el riego en parcela.