

**DIRECTRICES CIENTÍFICO-TÉCNICAS PARA
ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS DE
MONITORIZACIÓN POR SENSORES DEL
CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.**

Octubre de 2023

ÍNDICE

1. Resumen ejecutivo	1
Introducción y objetivos.....	1
Descripción detallada de las medidas.....	2
1.1 Medida del estado energético de agua en suelo	2
1.2 Medida del contenido volumétrico de agua en suelo (CVAS).....	3
2. Introducción.....	7
3. Principios generales a aplicar	10
4. Catálogo de medidas	10
4.1 Estado energético de agua en suelo	10
4.2 Contenido volumétrico de agua en suelo	11
5. Descripción detallada de las medidas.....	12
5.1 Principios de diseño y viabilidad de las medidas.	12
5.2 Técnicas de establecimiento.	17
5.2.1 Instalación en sistemas de riego por goteo	18
5.2.2 Instalación en sistemas de riego por aspersión.....	20
5.3 Esquema de funcionamiento y mantenimiento.....	25
5.3.1 Especificaciones técnicas de los equipos a instalar:	25
5.3.1.1 Sensores del estado energético de agua en suelo.	25
5.3.1.2 Fundamentos de los sensores de contenido volumétrico de agua del suelo (CVAS).....	27
5.3.2 Recomendaciones para la instalación de los sensores.	38
5.3.3 Calibración de los sensores de permitividad.	39
5.3.4 Registro de la información procedente de los sensores.....	40

5.3.5 Protocolos de telecomunicación y uso de sensores de permitividad en el IoT (Internet of Things).....	44
5.4 Plan de seguimiento.....	49
5.4.1 Factores que afectan al rendimiento del sensor.	49
5.4.2 Metodología de lectura e interpretación de los datos y su aplicación.....	51
6. Arquitectura de medidas por actuaciones de los proyectos.....	54
7. Recursos.....	55
ANEXO I- TELECONTROL DE LA RED DE HIDRANTES.....	59
ANEXO II- ALTERNATIVA A LOS SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN	62

<p>Revisión 1: Octubre de 2023</p> <p>Apartados actualizados:</p>
<p>1. Resumen ejecutivo</p> <p>5.2 Técnicas de establecimiento</p> <p>5.3 Esquema de funcionamiento y mantenimiento</p> <p>6. Arquitectura de medidas por actuaciones de los proyectos</p>

1. Resumen ejecutivo

Introducción y objetivos:

El riego es el factor principal en la producción y calidad de cultivos en áreas de clima árido y semiárido. Su manejo adecuado es clave para reducir los costes de producción y los riesgos de contaminación, dado que riegos excedentarios suponen un incremento en el coste del agua y lavados de fertilizantes que contaminan los acuíferos por lixiviación. Para una gestión eficiente del agua en todo el perfil de suelo afectado por el riego (goteo/aspersión) es necesario, por tanto, el control del contenido de humedad en el suelo.

La finalidad de esta primera directriz es recoger las instrucciones científico-técnicas para la implantación de medidas relacionadas con los sistemas de monitorización por sensores de medida del contenido volumétrico y/o potencial matricial de agua en el suelo (sensores y unidad de telecontrol). Para su consecución se han definido los siguientes objetivos:

- i) Definir los requisitos de viabilidad en función del suelo y cultivos.
- ii) Diseñar el sistema a nivel de comunidades de regantes: distribución, número mínimo de sensores, etc.
- iii) Establecer las especificaciones técnicas de los equipos a instalar.
- iv) Explicar la metodología de lectura e interpretación de los datos y su aplicación.
- v) Determinar los contenidos para la formación en Buenas Prácticas Agrarias (BPA).

Las medidas recogidas en esta directriz contemplan el principio de “no causar perjuicio significativo al medio ambiente” (DNSH; de las siglas en inglés) dado que se enmarcan en los conceptos de “utilización y protección sostenibles de los recursos hídricos” y “prevención y control de la contaminación”, recogidos en el Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo (“Reglamento sobre taxonomía”) del que se deriva la necesidad de invertir en sistemas de riego más sostenibles y eficientes que requieran menos agua (dando lugar a una reducción de la escorrentía de nutrientes a las aguas subterráneas) y en la necesidad

de apoyar a los agricultores para que cambien a prácticas de gestión del fertirriego con menores necesidades de agua.

Descripción detallada de las medidas:

Se deben de distinguir dos conceptos fundamentales en términos de humedad del suelo: el *estado energético de agua en el suelo* (conocido como potencial matricial del suelo, PMS ó Ψ_s , expresado en cbar o kPa) el cual se mide, generalmente, con tensiómetros, y, por otro lado, el *contenido volumétrico de agua en el suelo* (CVAS ó θ , expresado en %vol, $100 \cdot m^3_{\text{agua}} \cdot m^{-3}_{\text{suelo}}$), que puede medirse con equipos de registro discontinuo como la sonda de neutrones (exige personal cualificado que debe superar un control médico anualmente debido a su radiactividad) o de forma continua con equipos de medida que están teniendo una gran expansión en los últimos años como son, por ejemplo, las sondas capacitivas o más precisas aún que éstas, según las últimas revisiones realizadas por la comunidad científica, las sondas basadas en la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).

Hay que subrayar que el control del contenido volumétrico de agua en el suelo exige una inversión económica muy superior en equipos de medida respecto a la requerida en el caso de los equipos para el control del estado energético de agua en suelo. Además, es muy importante la interpretación de los datos de PMS y CVAS para establecer umbrales de decisión para la gestión del riego en cada cultivo y situación específica.

En este sentido, las medidas a implantar por parte de las comunidades de regantes como actuaciones de mejora/modernización del regadío que se proponen en esta directriz se basan en ambos conceptos. Concretamente, se establecen dos tipos de medidas para el control de la humedad del suelo: una es la instalación de equipos para la medida del estado energético de agua en suelo para estimar el momento de aplicar un riego, y la otra es la instalación de sensores de medida del contenido volumétrico de agua en el suelo para estimar la dosis de agua a aplicar durante el riego. A continuación, se detallan cada una de las medidas:

- *Medida del estado energético de agua en suelo*

Se recomienda la instalación de tensiómetros, que miden la tensión a la que está retenida el agua en el suelo. Si estos dispositivos se instalan a varias profundidades permiten conocer el movimiento del agua a través del perfil del suelo. Es un método sencillo y exacto para

determinar el ***momento de aplicación de un riego (así como el momento de parar un evento de riego)***. Los inconvenientes son su mantenimiento y calibración periódica, además de que no deben mantenerse en campo durante el invierno para evitar su congelación.

- *Medida del contenido volumétrico de agua en suelo (CVAS)*

Se recomienda la instalación de sensores en continuo basados en la constante dieléctrica o permitividad del suelo, dado que ésta se relaciona directamente con su contenido de humedad. Entre los principales sensores dieléctricos están los Capacitivos o FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) y los TDR (*Time Domain Reflectometry*). Estos sensores pueden instalarse a distintas profundidades y están conectados mediante un cable a un registrador de datos, denominado “Data Loggers”, que permite el almacenamiento de los mismos. Estos equipos se encargan de capturar la señal proveniente de los sensores, almacenarla y, en su caso, transmitirla de forma local o remota bien a aplicaciones cliente en ordenadores o dispositivos inteligentes (APP), o bien a servidores remotos en la nube. Estos métodos no son destructivos y, aunque únicamente abarcan un pequeño volumen de suelo, bien calibrados a la solución del suelo determinan con precisión la ***dosis de riego o cantidad de agua de aplicación en un riego***. En la Tabla 4 de la versión extendida de la guía se recogen los principales sensores existentes en el mercado para la medida del CVAS.

Instalación de sensores:

- *Sistema de riego por goteo:*

En cultivos regados por **goteo superficial**, como regla general en todos los cultivos, se establecerán 2 profundidades estándar de control de la humedad del suelo, que se situarían en unos 25 (rango de 20-30 cm) y 50 (rango de 45-60 cm) cm de profundidad. En cultivos leñosos, debido a que éstos tienen capacidad de extraer agua a las 2 profundidades anteriormente señaladas, se recomienda realizar una medida adicional de la humedad del suelo a una profundidad que puede oscilar entre 70 y 90 cm, según el tipo de textura del suelo y su profundidad máxima, para seguimiento y control óptimo del drenaje, lavado de sales y lixiviación de fertilizantes. En el caso de que el riego sea por **goteo subterráneo** (RGS), las profundidades a las que deben ser instalados estos dispositivos deben ser distintas a las recomendadas cuando el riego es por goteo superficial. Para un RGS en el que los ramales portagoteros estén

enterrados normalmente a unos 35-40 cm de profundidad, se recomienda que los sensores se instalen a 3 profundidades: el primero a unos 20 cm de profundidad (rango de entre 15-25 cm), para el control de un posible riego excedente, el segundo a aproximadamente 60 cm y el tercero a unos 90-100 cm. Respecto a la distribución espacial en horizontal de los sensores, ya sea riego superficial o RGS, se recomienda una separación entre el emisor y el sensor de 20 cm, en términos generales. No obstante, esta distancia podrá variar en función de la textura del suelo y, por ende, de la forma del bulbo húmedo, del marco de plantación y del diseño de la instalación de riego (número de ramales de emisores por fila de cultivo, disposición de los goteros en la cinta de riego, etc.). Para determinar el número de sensores por unidad de superficie, se podrán agrupar las parcelas que componen la comunidad de regantes en agrupaciones homogéneas de hasta 50 ha que contengan el mismo tipo de cultivo (leñoso o herbáceo) con necesidades hídricas similares y condiciones similares de suelo. Así, se deben colocar 3 unidades de equipos (sensores a diferente profundidad en cada punto de muestreo) por cultivo y para agrupaciones homogéneas de 50 ha, como criterio general. Se debe asegurar que el número de unidades de equipo sea proporcionado en cada cultivo. Cada unidad se instalará en puntos que abarquen zonas con distintas características edafológicas y/o climáticas, si las hubiera, dentro de un mismo tipo de cultivo. Asimismo, si los cultivos con sistema de riego por goteo se localizan en zona vulnerable a la contaminación por nitratos, el número de sensores por unidad de superficie aumentará tal y como está descrito en el apartado 5.2.1 de esta directriz.

- *Sistema de riego por aspersión*

En cuanto al diseño de instalación de sensores de humedad en cultivos extensivos regados por **aspersión**, se debe definir en primer lugar el objetivo que se persigue. Si el objetivo de la monitorización es minimizar o detectar los problemas de percolación en las zonas vulnerables, los sensores se deben de instalar en los puntos con menor capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD). Si el objetivo es apoyar la toma de decisiones sobre la programación del riego o el control de la percolación en zonas no vulnerables, por problemas de uniformidad del riego y derivados de la relación coste-beneficio de los sensores, se recomienda el uso de una metodología alternativa a los sensores de humedad del suelo (Anexo II de esta Directriz nº 1). En los casos concretos donde los sensores sí puedan integrar la variabilidad del suelo y la uniformidad del riego (manejo), considerando el cultivo que se riega y su productividad económica, las profundidades más adecuadas para

la instalación de los sensores serían entre 20-30 y 50-60 cm, dado que la mayor actividad radicular se produce en los primeros 60 cm del perfil del suelo. En función del sistema de riego instalado, se colocarán las sondas a una determinada distancia de los emisores. Por ejemplo, si los aspersores están fijos sobre el terreno (microaspersores, cañones de riego, coberturas totales), las sondas se colocarán a una distancia que sea, aproximadamente, la mitad del radio de acción del aspersor. En dispositivos móviles, como los pivots, se tratará de colocar las sondas de tal manera que no entorpezcan el paso del equipo y queden entre dos boquillas emisoras. En cuanto al número de sensores por unidad de superficie, se deben colocar 3 unidades de equipos por cultivo y cada 200 ha, como criterio general. Cada unidad se instalará en puntos lo suficientemente separados entre sí como para abarcar la posible variabilidad del suelo dentro de una unidad homogénea de superficie. En todos los casos, se debe intentar colocar las sondas de manera que no entorpezcan las labores agrícolas. Se recomienda optar por equipos que no necesiten cableado y empleen tecnología bluetooth o similar para enviar los datos a los registradores. En el caso de que el cultivo con sistema de riego por aspersión se sitúe en zonas vulnerables por contaminación difusa producida por los nitratos, se apoyará la metodología alternativa expuesta en el Anexo II con el uso de sensores de humedad, tal y como se describe en el apartado 5.2.2.

En el apartado 5.3.2, 5.3.4 y 5.4.1 de la versión extensa de la guía se pueden encontrar una serie de recomendaciones para la instalación de las sondas, los protocolos de telecomunicación y uso de los sensores en el IoT (Internet of Things), así como los factores que afectan al rendimiento del sensor.

Para la interpretación de los datos del estado energético de agua en suelo (tensiómetros), se definen los siguientes criterios generales, sin distinguir características del suelo:

- De 0 a 10 kPa: Suelo saturado, por riego profundo o lluvias importantes.
- De 11 a 30 kPa: Suelo a capacidad de campo. *Lectura que debe mantenerse en riego por goteo*, especialmente si se trata de cultivos hortícolas.
- De 31 a 60 kPa: Humedad deficitaria para el riego por goteo. Cultivo en condiciones de estrés hídrico.

- A partir de 70 kPa: El cultivo se encuentra sin disponibilidad de agua para su crecimiento y desarrollo.

En la interpretación de los datos del contenido volumétrico de agua en suelo (sensores de permitividad), hay que partir del hecho de que no debe exigirse una cifra exacta del CVAS dado que hay muchos factores que añaden incertidumbre a la precisión de la medida. Por ello, en el caso de que no se disponga de una calibración adecuada de las sondas, se debe relativizar el valor frente al máximo registrado. Lo que debe primar es la evaluación técnica y homologación de los equipos utilizados en cada caso en cuestión, creando un **modelo de certificación de los datos obtenidos extrapolables a cualquier zona**. Se recomienda que el personal responsable de cada Comunidad de Regantes (CR) supervise la recogida de datos de las medidas de los equipos instalados y también de las aplicaciones de riego diarias/semanales realizadas en la parcela durante un período de tiempo suficientemente representativo para su posterior análisis. Por consiguiente, se plantea como procedimiento ideal que los agricultores faciliten los datos de sus sensores a los técnicos de las Comunidades de Regantes (CCRR) (bien sea de manera directa o que el técnico tenga acceso a los datos a través de un servidor web) y éstos, a partir de dicha información, comuniquen al agricultor las recomendaciones de riego para que éste decida finalmente la dosis de riego a aplicar. Para corroborar y/o poder adoptar una decisión apropiada, la recomendación sería realizar una lectura rápida de las medidas del contenido volumétrico de agua en el suelo, y si estos valores superaran el 40% de humedad, al ser muy elevados (bajo la premisa de un suelo de textura franco-arcillosa y adecuada calibración a la solución del suelo) podría tener indicios de posible sobre-riego del cultivo. Hay que tener en cuenta que la saturación máxima es del 50-52% en suelos de textura franco-arcillosa, y que estos valores únicamente se podrían alcanzar en niveles muy superficiales del perfil de suelo y justo después de regar o tras una lluvia copiosa.

En resumen, la implantación por parte de las Comunidades de Regantes de las medidas descritas en esta directriz va a permitir reducir la cantidad de agua riego sin afectar el estado hídrico del cultivo ni su producción, con el fin de mejorar la eficiencia del uso del agua y de reducir la lixiviación de nutrientes, mejorando así la sostenibilidad de los regadíos.

2. Introducción

El riego es el factor principal en la producción y calidad de cultivos en áreas de clima árido, semiárido y mediterráneo. En Europa se dedica de media un 24% del agua disponible al regadío. Sin embargo, países europeos con climas más áridos pueden llegar a dedicar el 80% del agua disponible al regadío, como es caso de España (AEMA, 2021). No obstante, el manejo inadecuado del riego puede ocasionar pérdidas económicas, además de problemas ambientales. Los riegos excedentarios suponen un incremento en el coste del agua y de la energía necesaria para el bombeo, además de causar lavados de fertilizantes y otros agentes químicos. La percolación profunda puede dar lugar a la salinización del suelo y a la contaminación de acuíferos por lixiviación. Por consiguiente, el adecuado manejo del riego es clave para reducir los costes de producción y los riesgos de contaminación, así como para mejorar la productividad del cultivo.

El efecto del riego sobre la producción de un cultivo sigue una dinámica general, independientemente de la especie de la que se trate, en la que la producción aumenta rápidamente con un riego creciente hasta estabilizarse conforme se acerca a la producción máxima del cultivo (Figura 1). Una vez alcanzado este punto, por mucho riego adicional que se aporte, la producción no aumenta, e incluso puede disminuir debido al exceso de agua, el encharcamiento y asfixia radicular. En general, la dosis de riego óptima en cuanto a rentabilidad es menor que la aportada para lograr la máxima producción (Fereres y Soriano, 2007). Por consiguiente, se hace necesario la instalación de sensores de humedad, tensiómetros o cualquier otro dispositivo que sirvan de apoyo para una gestión eficiente del agua en todo el perfil de suelo afectado por el riego (goteo/aspersión).

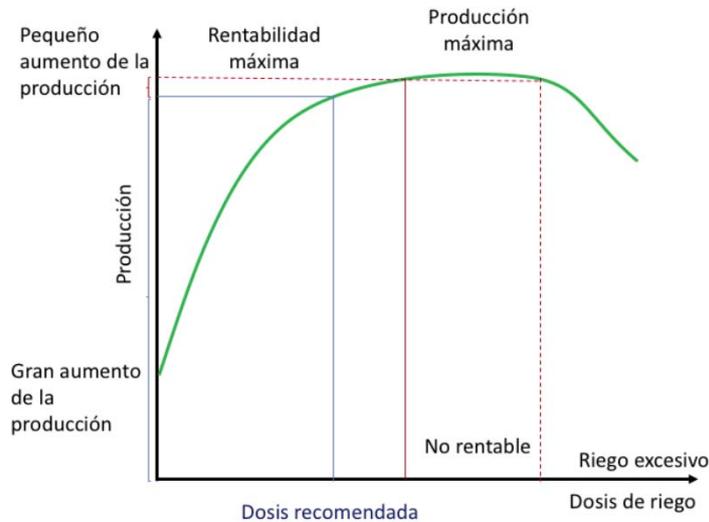


Figura 1. Respuesta de la producción de un cultivo al riego. Fuente: (Fernández, 2018).

La finalidad de esta primera directriz es recoger las instrucciones científico-técnicas para la implantación de sistemas de monitorización por sensores de medida del contenido volumétrico y/o potencial matricial de agua en el suelo (sensores y unidad de telecontrol).

Para su consecución se han definido los siguientes objetivos:

- i) Definir los requisitos de viabilidad en función del suelo y cultivos;
- ii) Diseñar el sistema a nivel de comunidades de regantes: distribución, número mínimo de sensores, etc.).
- iii) Establecer las especificaciones técnicas de los equipos a instalar.
- iv) Explicar la metodología de lectura e interpretación de los datos y su aplicación.
- v) Determinar los contenidos para la formación en Buenas Prácticas Agrarias (BPA).

Asimismo, las actuaciones de mejora/modernización del regadío llevan asociadas el estudio de una alternativa de cultivos para cada zona, por lo que existe una premisa inicial respecto a los consumos de agua requeridos para cada uno de ellos, teniendo presente las restricciones de volumen según el organismo gestor del agua a nivel de cuenca o Comunidad de Regantes.

Por otra parte, los proyectos deben recoger un estudio de las características de los suelos de la zona de actuación, lo que en conjunto permite determinar los tipos/zonas características dentro del ámbito del proyecto. A este respecto, y durante el desarrollo de la redacción del proyecto, deberían definirse medidas de control del uso del agua, mediante la definición de **puntos de control de los volúmenes de agua de riego**, como habitualmente se realiza con contadores por hidrante/toma, a los que se debe añadir la instalación de sondas de contenido volumétrico y/o potencial de agua en el suelo. Estos equipamientos deben estar ligados al sistema de telecontrol de la Red (bombeo, hidrante, etc.) lo que facilita la elaboración de recomendaciones de riego por parte de los técnicos responsables de la gestión de la Red (Comunidad de Regantes, etc.).

En cuanto al ámbito de conocimiento concernido en esta primera directriz y su estado del arte, fundamentalmente se deben de distinguir dos conceptos: el *estado energético de agua en el suelo* (conocido como potencial matricial del suelo, PMS ó Ψ_s , expresado en cbar o kPa) el cual se mide, generalmente, con tensiómetros, y, por otro lado, el *contenido volumétrico de agua en el suelo* (CVAS ó θ , expresado en %vol, $100 \cdot m^3_{\text{agua}} \cdot m^{-3}_{\text{suelo}}$), que puede medirse con equipos de registro discontinuo como la sonda de neutrones (exige personal cualificado que debe superar un control médico anualmente debido a su radiactividad) o de forma continua con equipos de medida que están teniendo una gran expansión en los últimos años como son, por ejemplo, las sondas capacitivas o más precisas aún que éstas, según las últimas revisiones realizadas por la comunidad científica, las sondas basadas en la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).

Hay que destacar que el control del contenido volumétrico de agua en el suelo exige una inversión económica muy superior en equipos de medida respecto a la requerida en el caso de los equipos para el control del estado energético de agua en suelo. Además, es muy importante la interpretación de los datos de PMS y CVAS para establecer umbrales de decisión para la gestión del riego en cada cultivo y situación específica.

3. Principios generales a aplicar

El principio general que se aplica en esta directriz es el de ajustar/reducir las cantidades de agua riego sin afectar el estado hídrico del cultivo ni su producción, con el fin de mejorar la eficiencia del agua y de reducir la lixiviación de nutrientes. Las medidas recogidas en esta directriz nº 1 contemplan el principio de “no causar perjuicio significativo al medio ambiente” (DNSH; de las siglas en inglés) dado que se enmarcan en los conceptos de utilización y protección sostenibles de los recursos hídricos y prevención y control de la contaminación, recogidos en el Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo ("Reglamento sobre taxonomía") del que se deriva la necesidad de invertir en sistemas de riego más sostenibles y eficientes que requieran menos agua (dando lugar a una reducción de la escorrentía de nutrientes a las aguas subterráneas) y de apoyar a los agricultores para que cambien a prácticas de gestión con menores necesidades de agua.

4. Catálogo de medidas

Se establecen principalmente dos tipos de medidas para el control de la humedad del suelo. Una es la instalación de equipos para la medida del estado energético de agua en suelo, y la otra es la instalación de sensores de medida del contenido volumétrico de agua en el suelo. A continuación, se detallan cada una de ellas.

4.1 Estado energético de agua en suelo

Se mide la tensión a la que está retenida el agua en el suelo. En este apartado se destacan los tensiómetros. Su funcionamiento está basado en crear una columna de agua que interactúe con el suelo gracias a su punta cerámica porosa. A medida que el suelo se seca, comienza a succionar agua del tensiómetro, provocando de esta manera una tensión. Esta tensión es medible gracias a que en el extremo de los tubos cilíndricos se instala un manómetro, que mide el esfuerzo que las raíces realizan para extraer agua del suelo.

Si estos dispositivos se instalan a varias profundidades permiten conocer el movimiento del agua a través del perfil del suelo. Es un método sencillo y exacto para determinar el **momento de aplicación de un riego (así como el momento de parar un evento de riego)**. Los inconvenientes son su mantenimiento y calibración periódica, además de que no deben

mantenerse en campo durante el invierno para evitar su congelación.

4.2 Contenido volumétrico de agua en suelo

En este apartado se encuadran los métodos basados en la constante dieléctrica o permitividad del suelo, dado que ésta se relaciona directamente con su contenido de humedad. Entre los principales sensores dieléctricos están los Capacitivos, FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) y TDR (*Time Domain Reflectometry*). Estos instrumentos se basan en la reflectometría del sistema aire-agua-suelo. La permitividad dieléctrica del suelo se relaciona directamente con su contenido en agua y, en menor medida, por el aire o la materia orgánica presente en el suelo. Por ende, estos sistemas miden variaciones en forma de ondas electromagnéticas causadas por la dinámica del contenido de agua en el suelo. En concreto, las sondas TDR obtienen el contenido de humedad del suelo en función del tiempo: emiten pulsos electromagnéticos y calculan el periodo de tiempo que la onda tarda en regresar al sensor. El tiempo es proporcional a la permitividad del medio y varía con la presencia de agua en el suelo. En el caso de suelos salinos o con alto contenido de materia orgánica, las condiciones de la constante dieléctrica del suelo varían y los sensores deberán calibrarse.

Las sondas FDR se basan en las capacitancias de los elementos que componen el suelo, transformando las variaciones de frecuencia que sufren en el contenido de humedad en el suelo. Pueden instalarse a distintas profundidades, siendo enterradas directamente en el perfil del suelo o a través de un tubo de acceso. Los sensores están conectados mediante un cable a un registrador de datos que permite el almacenamiento de los mismos. Son instrumentos que permiten tomar medidas precisas y en continuo. Estos métodos *de medida del contenido volumétrico de agua en suelo* no son destructivos y, aunque únicamente abarcan un pequeño volumen de suelo, bien calibrados a la solución del suelo determinan con precisión la ***dosis de riego o cantidad de agua de aplicación en un riego***.

En el apartado 5.3.1 se detallan estos conceptos, junto con especificaciones técnicas de marcas y equipos que se pueden instalar.

5. Descripción detallada de las medidas

La información contenida en cada uno de los apartados y sub-apartados en los que se divide este punto 5 de la Directriz nº 1 va dirigida a los proyectistas y/o a los ejecutores de los proyectos, que suelen ser las Comunidades de Regantes o contratistas. En la Tabla 1 se detalla dicha información.

Tabla 1. *Relación de apartados y sub-apartados del punto 5 de esta directriz y personal al que va dirigido.*

Apartados/Subapartados del punto 5 de la Directriz nº 1	Dirigido a:	
	Proyectistas	Ejecutores
5.1 Principios de diseño y viabilidad de las medidas	x	x
5.2 Técnicas de establecimiento	x	x
5.3.1 Especificaciones técnicas de los equipos a instalar	x	x
5.3.2 Recomendaciones para la instalación de los sensores		x
5.3.3 Calibración de los sensores de permitividad		x
5.3.4 Registro de la información procedente de los sensores	x	x
5.3.5 Protocolos de telecomunicación y uso de sensores de permitividad en el IoT (Internet of Things)	x	x
5.4.1 Factores que afectan al rendimiento del sensor	x	x
5.4.2 Metodología de lectura e interpretación de los datos		x

5.1 Principios de diseño y viabilidad de las medidas.

En este apartado se describen los requisitos de viabilidad en función del suelo y el cultivo.

En general, los puntos clave de control del estado de agua en el suelo deben incorporarse como un apartado o sub-apartado del presupuesto del proyecto de mejora o modernización, para su uso comparativo con los resultados / medidas de los puntos de control en hidrante / toma particulares, y calibración de los sensores de bajo coste instalados en los mismos, con los que el técnico responsable puede realizar adaptaciones particulares sobre el riego de cada agricultor.

Los aspectos más relevantes para la instalación y uso de los sensores son aquellos que dependen del suelo (características físico-químicas, textura y morfología del terreno). Cuanto más conocimiento se tenga de estos aspectos, menor será el error a la hora de instalar y utilizar

los sensores, y mejor será su comportamiento y robustez. Hoy en día se cuenta con muchas herramientas y métodos para conocer la tipología de los diferentes suelos donde se va a llevar a cabo alguna actividad agrícola, entre ellas:

- La experiencia adquirida por los agricultores sobre la orografía de la parcela y la especie/variedad cultivada (así como su interacción con el suelo).
- Calicatas para conocer la profundidad de las raíces y su desarrollo.
- Análisis de muestras de suelos para conocer la textura y la composición físico-química.
- Mapas de suelo, como los existentes en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) con escalas 1:1.000.000 o 1:250.000, o los disponibles en otros servicios que proporcionan cartografía online de múltiples características del suelo (por ejemplo: <https://suelos.itacyl.es/mapas de Castilla y León>).

Conocer la textura del suelo es clave para la correcta utilización de las sondas de humedad, como se ha citado anteriormente, dado que se emplea como referencia para estimar la retención y el movimiento del agua a través de los horizontes del suelo. En riego por goteo, se llama bulbo húmedo al volumen de suelo humedecido por un emisor de riego localizado. El movimiento del agua en el suelo determina la forma y el tamaño del bulbo húmedo, que tiene una gran importancia, ya que en él se desarrolla el mayor porcentaje del sistema radicular de las plantas. El tamaño de los poros está ligado a la textura y determina la capacidad de retención de agua de un suelo. En suelos arenosos, los poros son de gran tamaño y el agua circula con mayor facilidad, mientras que en suelos arcillosos el agua se extiende con menor dificultad hacia los lados. En consecuencia, en suelos arenosos el bulbo tiene forma alargada y en suelos arcillosos achatada.

En función de la textura del suelo y, por ende, de la tipología del bulbo se debe considerar la distancia a la que se colocaran las sondas respecto del emisor para que la toma de datos sea lo más precisa posible. Así, en terrenos arenosos la formación de raíces está más cercana al emisor debido a que el bulbo es más alargado y estrecho, en estos casos situaremos las sondas a 10-15 cm del emisor. Por el contrario, en los suelos arcillosos el recorrido del agua a través de las capas del suelo es mucho más horizontal, son suelos que retienen el agua con mucha fuerza y en gran cantidad, por ello debemos situar las sondas un poco más alejadas del emisor, a 20-25 cm.

Numerosos estudios dictaminan que la capacidad de campo (CC) es el objetivo que se debe establecer en una dinámica de riego, donde el suelo retenga toda el agua aportada evitando así la pérdida del agua gravitacional. Si se quieren cubrir estas necesidades en cada riego, el primer paso para la planificación de los riegos con las sondas de humedad es definir el punto de saturación, la CC y un nivel de agotamiento permisible y asociar estos umbrales a unos porcentajes de humedad (o alternativamente a unos valores de potencial matricial). El objetivo al aplicar un riego será alcanzar el máximo contenido de agua que un suelo puede almacenar, sin perder agua por percolación, es decir, su CC.

Para establecer los diferentes umbrales mencionados anteriormente se comienza por la saturación del suelo. Para obtener dicho valor se debe proceder a aplicar un riego prolongado, analizando mediante el software correspondiente a los sensores instalados, que la señal emitida por éstos crea una curva exponencial a medida que el agua va penetrando en el suelo. Cuando se observa que la curva que representa los sensores de humedad se estabiliza, significará que la profundidad en la que se ha situado el sensor ha alcanzado su capacidad máxima o capacidad de retención y se asocia a un porcentaje de humedad. En este instante se debe realizar una medición del estado hídrico del suelo (tensiómetro o sondas de contenido volumétrico de agua en suelo), esperando obtener valores entre 0-10 kPa (tensiómetro) o próximos al 50-52% (CVAS), ya que el suelo estará prácticamente saturado debido a que con un riego prolongado el agua ocupará todos los poros del suelo.

Una vez establecido el punto de saturación, y finalizado el riego, con el paso de los días se observará, mediante el software correspondiente a los sensores instalados, que los niveles de humedad comienzan a disminuir. En general, después de aproximadamente 2 días de drenaje (el drenaje se considera despreciable en 48 horas, oscilando entre 24 horas en suelos arenosos y 72 horas en suelos arcillosos) se vuelve a repetir la medición, momento en el que parte del agua habrá desaparecido por la fuerza de la gravedad. Esta bajada del nivel de agua en el suelo permite que los poros de mayor diámetro, antes ocupados por agua, lo empiecen a estar de aire, y se encontrará el agua que el suelo es capaz de retener y corresponderá a la CC que, aproximadamente, debe encontrarse sobre los 33 kPa en suelos de textura franca (1/3 bar).

La disminución del contenido de agua en el sistema edáfico se produce por el fenómeno de la evapotranspiración de los cultivos y, en menor medida, por la evaporación directa del agua

de la superficie del suelo y de la fracción del agua gravitacional que las raíces no son capaces de absorber.

Para que la productividad de los cultivos no se vea afectada por falta de agua en el suelo, se debe definir también un nivel de agotamiento permisible para que las raíces de las plantas encuentren siempre agua disponible. El nivel de agotamiento permisible puede variar en función de la respuesta frente al estrés que se quiera provocar a las plantas. Además, este valor dependerá en gran medida de la textura del suelo y del estado fenológico del cultivo, que marcarán las necesidades hídricas y, por tanto, el tiempo durante el que se debe mantener el suelo con este porcentaje de humedad.

La succión máxima que pueden ejercer muchos cultivos para extraer agua del suelo varía con la especie vegetal, pero el valor generalmente aceptado es de aproximadamente 15 veces la presión atmosférica (es decir, 1,5 MPa). Cuando el agua del suelo ha sido agotada hasta 1,5 MPa, la que permanezca en el suelo será aquella almacenada en los poros menores de 0,2 micras de diámetro y corresponde al punto de marchitez permanente del suelo (PMP). El agua retenida a succiones mayores que el PMP no estará disponible para las plantas. Por lo tanto, el agua retenida entre la CC y el PMP puede ser usada por los cultivos para la transpiración y es conocida como capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD).

El agua disponible en el suelo entre la CC y el PMP es retenida con diferentes tensiones y cerca de un tercio de la misma no está fácil o rápidamente disponible para los cultivos, especialmente si los cultivos están transpirando intensamente. Cuanta más alta es la demanda de transpiración, debe haber más agua disponible en el suelo para evitar el estrés hídrico en las plantas. En contraste, un cultivo de transpiración lenta incluso puede usar el agua retenida a más altas tensiones sin presentar déficit hídrico.

La cantidad máxima de agua disponible que puede retener un suelo (o sea la capacidad de agua disponible) varía con su textura, contenido de materia orgánica, la profundidad de enraizamiento y su estructura. La materia orgánica del suelo es particularmente importante ya que puede retener agua hasta cerca de 20 veces su peso. Los suelos orgánicos y los suelos francos de textura media con altos contenidos de arena muy fina y sedimentos tienen la CRAD más alta, los suelos arcillosos tienen valores intermedios y los suelos con contenido de arena gruesa tienen la CRAD más baja.

En cualquier tipo de suelo, cuanto mayor es la profundidad de enraizamiento, mayor será la cantidad de agua disponible para el cultivo. Este hecho es más importante para los cultivos anuales ya que tienen menos tiempo que las especies perennes para desarrollar raíces profundas y extensas.

Existen infinidad de tablas y estudios que relacionan la textura del suelo con el porcentaje de humedad asociado a los valores de referencia (punto de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente). Un ejemplo son las relaciones establecidas por Saxton y Rawls (2006) (Tabla 2). No obstante, es recomendable seguir las indicaciones que dicta el fabricante de los sensores empleados al respecto.

Tabla 2. *Porcentajes de humedad del suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente en función de la textura del mismo (Adaptados de Saxton y Rawls, 2006).*

Textura	CVAS (%)	
	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente
Arena	10	5
Arenoso-Franco	12	5
Franco-Arenoso	18	8
Franco-Arcillo-Arenoso	27	17
Franco	28	14
Arcillo-Arenoso	36	25
Franco-Limoso	31	11
Limo	30	6
Franco-Arcilloso	36	22
Franco-Arcillo-Limoso	38	22
Arcillo-Limoso	41	27
Arcilla	42	30

Para conocer si los porcentajes de humedad asociados al punto de saturación, la capacidad de campo y al punto de marchitez permanente son los adecuados para un determinado suelo, se pueden utilizar medidas del estado energético de agua en el suelo (tensiómetros). La interpretación de estas lecturas se detalla en el apartado 5.4.2.

En consecuencia, el conjunto de la información obtenida a través de publicaciones científicas, la utilización de tensiómetros y los análisis de suelo en laboratorio puede ayudar a determinar la capacidad de campo y el nivel de agotamiento permisible. Estos niveles deben de ser corroborados con visitas periódicas al campo y con la interpretación de las curvas de

humedad observadas en el software de las sondas que se hayan instalado. Si se asocian estos términos a porcentajes de humedad se puede crear una dinámica de riego muy interesante para el manejo o gestión del riego de los cultivos, una herramienta que, gracias al almacenamiento de datos de forma constante, permitirá el análisis de forma continua del estado de la humedad de suelos estudiados. El objetivo, como se ha citado con anterioridad, es que al aplicar un riego se consiga alcanzar la capacidad de campo.

Por último, también se pueden tener en cuenta las técnicas de teledetección aérea mediante vuelo de drones o avionetas, con cámaras térmicas o multi-espectrales, que permiten crear mapas de estado hídrico y nutricional de los cultivos.

5.2 Técnicas de establecimiento.

Aquí se describen los detalles particulares en cuanto a la implantación de cada medida en sistemas de riego por goteo o por aspersión, así como el diseño del sistema a nivel de comunidades de regantes: distribución, número mínimo de sensores, etc.

Se recomienda que el coste aproximado de esta actuación, tanto para el riego por goteo como por aspersión, alcance, en términos generales y siempre que la disponibilidad presupuestaria del proyecto lo permita, el 1% sobre el presupuesto de ejecución material. Hay que tener en consideración que hay disponibles modelos de sensores de bajo coste (Tabla 4) como opción más viable en zonas de cultivos con baja rentabilidad. No obstante, dada su inclusión generalizada en los nuevos proyectos se espera una rebaja considerable del producto en las instalaciones de riego en España.

Nota aclaratoria: las recomendaciones indicadas aquí hacen referencia a la superficie de la comunidad de regantes beneficiada por el proyecto de modernización. Del mismo modo, la Directriz 1 sólo plantea la implantación de los sistemas de monitorización de la humedad del suelo en cultivos con sistema de riego por goteo (superficial o subterráneo) o por aspersión (en este caso, se plantea y recomienda una alternativa a la monitorización de la humedad) cultivados en suelo. Por consiguiente, no se deben de tener en cuenta las hectáreas de la superficie con sistema de riego superficial (inundación, surcos, franjas, etc.) ni los cultivos sin suelo –cultivados en sustratos- para determinar el número de unidades de equipos.

5.2.1 Instalación en sistemas de riego por goteo:

A efectos prácticos, como norma general, la primera premisa a tener en cuenta es controlar la humedad de manera obligatoria a *2 profundidades de suelo* en todos los cultivos (hortícolas o leñosos) de forma que se garantice un adecuado manejo del riego mediante el control del contenido de agua en la zona de máxima actividad radicular y a una profundidad de suelo que sobrepase la capacidad de extracción radicular, de modo que pueda servir de referencia para conocer si se está realizando una adecuada gestión del riego en su cultivo o, por el contrario, se produce una percolación de agua a horizontes más profundos del suelo. Por tanto, como regla general en todos los cultivos regados por goteo superficial, se establecerán **2 profundidades estándar de control de la humedad del suelo**, que se situarían en unos 25 (rango de 20-30 cm) y 50 (rango de 45-60 cm) cm de profundidad. En cultivos leñosos, debido a que éstos tienen capacidad de extraer agua a las 2 profundidades anteriormente señaladas, se obligaría a realizar una medida adicional de la humedad del suelo a una profundidad que puede oscilar entre 70 y 90 cm, según el tipo de textura del suelo y su profundidad máxima, para seguimiento y control óptimo del drenaje, lavado de sales y lixiviación de fertilizantes.

En cuanto a la distribución espacial en superficie de los sensores, en términos generales, se recomienda una *separación entre el emisor y el sensor de 20 cm*. No obstante, esta distancia podrá variar en función de la textura del suelo y, por ende, de la forma del bulbo húmedo. Así, en suelos de textura arenosa los sensores deben colocarse a 10-15 cm del emisor, frente a los de textura arcillosa que oscilarán entre 20-25 cm, como se ha explicado anteriormente. Asimismo, se debe tener en cuenta también el marco de plantación y el diseño de la instalación de riego (número de ramales de emisores por fila de cultivo, disposición de los goteros en la cinta de riego, etc.). Por ejemplo, en una plantación de lechugas sobre suelo arcilloso, con goteros separados cada 30 cm, la distancia entre el emisor y el sensor recomendada sería de 15 cm y no de 20-25 cm. A ser posible, se colocarán los sensores entre el emisor y la planta. En el caso de frutales que se rieguen con un doble ramal de emisores, se seguirá el mismo criterio que cuando sólo se disponga de un ramal, simplemente que el sensor se colocaría en la zona entre los dos ramales, es decir, para dentro de la fila de árboles, no para fuera.

Para determinar el número de sensores por unidad de superficie, se podrán realizar agrupaciones homogéneas de hasta 50 ha de parcelas que contengan el mismo tipo de cultivo (leñoso o herbáceo) con necesidades hídricas similares y condiciones similares de suelo.

Así, se deben colocar 3 unidades de equipos (sondas a diferente profundidad en cada punto de muestreo) por cultivo y para agrupaciones de características homogéneas de 50 ha, como criterio general. Se debe asegurar que el número de unidades de equipo sea proporcionado en cada cultivo. Cada unidad se instalará en puntos lo suficientemente separados entre sí para que abarquen la posible variabilidad del suelo, así como zonas con distintas características edafo-climáticas, si las hubiera, dentro de un mismo tipo de cultivo o unidad homogénea de superficie.

Si el cultivo se sitúa en **zonas vulnerables por contaminación difusa producida por los nitratos** el número de puntos de muestreo se establecerá de acuerdo al siguiente protocolo:

- Para agrupaciones homogéneas por encima de 10 ha se dispondrá, como mínimo, de tres unidades de equipos para aquellas con una superficie superior a 10 ha y menor o igual a 20 ha y de cuatro unidades de equipos para aquellas con una superficie mayor de 20 ha y menor o igual a 50 ha. Los emplazamientos deberán elegirse de conformidad con la Administración Autónoma competente, para que resulten representativos de la tipología del suelo existente y los tipos de cultivo implantados.
- Para agrupaciones menores a 10 ha se seguirán las recomendaciones realizadas a través de la comunidad de regantes a la que pertenezcan, pero, en todo caso, se deberá disponer al menos de un punto de muestreo cada 5 ha.

En el caso de que el riego sea por **goteo subterráneo** (RGS), la distribución en superficie de los sensores será similar a la explicada anteriormente. Sin embargo, las profundidades a las que deben ser instalados estos dispositivos deben ser distintas a las recomendadas cuando el riego es por goteo superficial. En términos generales, para un RGS en el que los ramales portagoteros estén enterrados a unos 35-40 cm de profundidad, se recomienda que los sensores se instalen a 3 profundidades: el primero a unos 20 cm de profundidad (rango de entre 15-25 cm), para el control de un posible riego excedentario, el segundo aproximadamente a 60 cm y el tercero a unos 90-100 cm.

Por último, y de manera excepcional, cuando la distribución de sensores no pueda ser aplicada en todo el perímetro de riego correspondiente de una comunidad de regantes por diversas causas que deben estar adecuadamente justificadas (presupuesto insuficiente,

dificultad de aplicación por número de parcelas de distintos comuneros, etc.) se recomienda lo siguiente:

- Localizar una zona concreta en la que se pueda realizar una monitorización demostrativa para el resto de la comunidad de regantes, con una superficie de al menos el 25% del total de la comunidad afectada por el proyecto de modernización y con sistema de riego por goteo. La zona elegida debe ser lo más representativa posible, englobando la máxima variabilidad de características físico-químicas del suelo y, también, de cultivos representativos de esa comunidad de regantes. La distribución de sensores en base a superficie debe ser como la descrita anteriormente.
- Adicionalmente, cuando no se trate de una zona vulnerable a contaminación por nitratos, en esta parcela demostrativa se podrá reducir a 2 unidades de equipos cada 50 ha siempre que se instalen equipos que garanticen la máxima fiabilidad de las medidas, como es, en el caso de la medida del estado volumétrico de agua en suelo, los sensores basados en TDR (ver Tablas 3 y 4). Cuando se opte por utilizar sensores de potencial matricial del suelo, éstos deben ser instalados en la zona de máxima actividad radicular y deben ser siempre combinados con la instalación a mayor profundidad de sensores de medida del contenido volumétrico de agua en suelo para evaluar el drenaje, lavado de sales y lixiviación de fertilizantes en profundidad.

5.2.2 Instalación en sistemas de riego por aspersión:

En general, los sensores de humedad no se han utilizado para programar el riego en parcelas comerciales de cultivos extensivos con cobertura total de aspersión, y pueden no ser la mejor alternativa para ajustar el agua de riego a las necesidades de los cultivos. A continuación, se detallan varias de las razones:

1. Problemas para determinar dónde colocar los sensores dentro del campo de manera que no se destruyan con el laboreo. En los sistemas de cobertura total de aspersión los únicos puntos no laboreados son el pie del aspersor y el borde del campo. En los sistemas de pivote central, los únicos puntos no laboreados son el punto pivote y el borde del campo. Ninguno de estos puntos resulta adecuado para instalación de sensores

2. Problemas derivados del tipo de sistema de riego y la meteorología. La aplicación de agua en un punto de una finca regada por aspersión depende de la meteorología durante el riego de cada sector (fundamentalmente del viento, que tiene una importante componente aleatoria), lo que establece una importante diferencia entre los sistemas de riego de aspersión y goteo. En riego por aspersión serían necesarios muchos sensores para caracterizar de forma adecuada la variabilidad del agua en el suelo y para que esta información pudiera ser útil para la programación del riego.

3. Problemas derivados de la relación coste-beneficio de los sensores de humedad del suelo en los sistemas de riego por aspersión. La productividad económica de una zona de cultivos extensivos regados por aspersión suele ser ajustada, lo que es un indicador de la capacidad de pago de estas zonas. Así, a pesar del ahorro de agua, el control de lixiviados y la consiguiente reducción del impacto ambiental, en el cómputo de los costes de implementar esta tecnología hay que incluir además de la inversión inicial de los sensores, la instalación y la calibración periódica, los costes de mantenimiento, las necesidades de reposición y la explotación de los resultados, que son anuales y que los agricultores tendrían que asumir en corto-medio plazo. De esta forma, la densidad espacial de sensores de humedad que puede permitirse una zona de cultivos extensivos es mucho menor que una de cultivos intensivos. Sin embargo, las características del riego por aspersión pueden requerir una densidad mayor que en el riego por goteo, por la menor uniformidad de riego, cuando el objetivo sea de programación de riego y/o el control de la percolación.

4. Problemas para valorizar la información obtenida. La densidad espacial de los sensores en cultivos extensivos no puede ser tan elevada como en cultivos intensivos por la relación beneficio-coste. Sin embargo, la variabilidad en el reparto de agua de los sistemas de riego por aspersión suele ser en general mayor que la de los sistemas de goteo, por lo que la variabilidad del contenido y la energía del agua del suelo jugará un papel mucho más importante, que limitará la representatividad y la aplicación de la información obtenida con fines de programación de riego y control de lixiviados.

Todos estos problemas comprometen la utilidad de los sensores de agua en el suelo para mejorar la programación del riego y para controlar los problemas de percolación en comunidades de regantes de riego por aspersión

En este sentido, se plantea una metodología alternativa y/o complementaria a la medida del agua en el suelo (contenido y energía) para conseguir este objetivo de ahorrar agua en riego por aspersión, descrita en el Anexo II de esta Directriz nº 1, que persigue los siguientes objetivos:

- Adecuación técnica al sistema de riego y los cultivos;
- Facilidad de implementación y adopción por los usuarios finales; y
- Adecuación de los costes de inversión y explotación a la productividad económica.

Esta metodología alternativa al uso de sensores de agua en el suelo permite cumplir el objetivo de ahorro de agua y/o energía en riego por aspersión y evitar problemas ambientales derivados del lavado de nitratos asociados a un mal manejo del riego. La metodología se basa en aplicar el riego necesario para remplazar la evapotranspiración del cultivo mediante un balance de agua en el suelo. Esta fue la apuesta del Ministerio y las Comunidades Autónomas al crear y mantener el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Esta red, apoyada en datos de capacidad de retención de agua del suelo, permite optimizar el uso del agua de riego. La aplicación de esta metodología en España tiene todavía mucho recorrido, a pesar del hito que supuso la creación de la red SIAR. Es preciso fomentar esta alternativa, al menos para el riego por aspersión. Se trata de una tecnología de fácil aplicación, sin mantenimiento físico en parcela, y que se puede apoyar en la transición digital de la agricultura de regadío para dar conservar agua y energía.

Nota aclaratoria: La metodología relacionada con el balance de agua que la Directriz 1 plantea como alternativa y/o complementaria a la medida del agua en el suelo sólo es aplicable para sistemas de riego por aspersión, independientemente del cultivo. Por tanto, siempre que el sistema de riego sea por goteo, se recomienda la instalación de sensores y no la aplicación de esta metodología alternativa.

En el caso de que se considere viable tanto técnicamente como económicamente la instalación de sensores de humedad en riego por aspersión, como puede ser el caso de parcelas con adecuada uniformidad del riego dada una baja variabilidad espacial (zonas con baja velocidad de viento o cultivos bajo invernadero), se tendrá en cuenta que el diseño de la instalación debe variar en función de si el objetivo de la monitorización es minimizar o detectar

los problemas de percolación (los sensores se deben de instalar en los puntos con menor CRAD) o si el objetivo es apoyar la toma de decisiones sobre la programación del riego (los sensores deben integrar la variabilidad del suelo y la uniformidad del riego -manejo-, considerando el cultivo que se riega y su productividad económica).

En cultivo extensivos la mayor actividad radicular se produce en los primeros 60 cm del perfil del suelo. Por ello, las profundidades más adecuadas para la instalación de los sensores son entre 20-30 y 50-60 cm.

En cuanto a la distribución espacial en superficie de los sensores, en función del sistema de riego por aspersión instalado, se colocarán los sensores a una determinada distancia de los emisores. Por ejemplo, si los aspersores están fijos sobre el terreno (microaspersores, cañones de riego, aspersores), los sensores se colocarán a una distancia que sea, aproximadamente, la mitad del radio de acción del aspersor. En dispositivos móviles, como los pivots, los sensores se tratarán de colocar de tal manera que no entorpezcan el paso del equipo y queden entre dos boquillas emisoras. En todos los casos, se debe intentar colocar los sensores de manera que no entorpezcan las labores agrícolas. Cuando no haya otra opción, los puntos de instalación podrán estar en la zona de la línea porta aspersor, aunque habrá que tener en cuenta la menor representatividad de la medida. Asimismo, se puede optar por equipos que no necesiten cableado y empleen tecnología bluetooth o similar para enviar los datos a los registradores. Al estar los sensores enterrados y no necesitar cables, se facilitan las labores agrícolas.

Respecto al número de sensores por unidad de superficie, al igual que en el apartado anterior 5.2.1, se podrán realizar agrupaciones homogéneas de hasta 200 ha de parcelas que contengan el mismo tipo de cultivo con necesidades hídricas similares y condiciones similares de suelo. Así pues, se deben colocar 3 unidades de equipos (sondas a diferente profundidad en cada punto de muestreo) por cultivo y para agrupaciones de características homogéneas de 200 ha, como criterio general. Se debe asegurar que el número de unidades de equipo sea proporcionado en cada cultivo. Cada unidad se instalará en puntos lo suficientemente separados entre sí para que abarquen la posible variabilidad del suelo, así como zonas con distintas características edafo-climáticas, si las hubiera, dentro de un mismo tipo de cultivo o unidad homogénea de superficie.

En el caso de que el cultivo se sitúe en zonas vulnerables por contaminación difusa producida por los nitratos, se apoyará la metodología alternativa expuesta en el Anexo II con el uso de sensores de humedad, tal y como se describe en este apartado. Las parcelas en las que se instalen los sensores servirán a la Comunidad de Regantes como puntos de verificación del manejo del riego y de la percolación, y para asesorar a los comuneros. Esta alternativa está alineada con la Propuesta del Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Digitalización del Ciclo del Agua, aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros de 22 de marzo de 2022, del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Por último, y de manera excepcional, tanto si se opta por la recomendación de instalación de equipos en una zona no vulnerable, como también para aquellas zonas vulnerables en las cuales es de obligada instalación, cuando la distribución de sensores no pueda ser aplicada en todo el perímetro de riego correspondiente de una comunidad de regantes por diversas causas que deben estar adecuadamente justificadas (presupuesto insuficiente, dificultad de aplicación por número de parcelas de distintos comuneros, etc.) se recomienda lo siguiente:

- Localizar una zona concreta en la que se pueda realizar una monitorización demostrativa para el resto de la comunidad de regantes, con una superficie de al menos el 25% del total de la comunidad afectada por el proyecto de modernización y con sistema de riego por aspersión, siempre que ésta sea mayor de 200 ha. La zona elegida debe ser lo más representativa posible, englobando la máxima variabilidad de características físico-químicas del suelo y, también, de cultivos representativos de esa comunidad de regantes. La distribución de sensores en base a superficie debe ser como la descrita anteriormente.
- Adicionalmente, cuando no se trate de una zona vulnerable a contaminación por nitratos, en esta parcela demostrativa se podrá reducir a 2 unidades de equipos cada 200 ha siempre que: i) se instalen equipos que garanticen la máxima fiabilidad de las medidas, como es, en el caso de la medida del estado volumétrico de agua en suelo, los sensores basados en TDR (ver Tablas 3 y 4) y ii) el número de hectáreas tras aplicar la reducción de al menos el 25% sea superior a 200 ha. Cuando se opte por utilizar sensores de potencial matricial del suelo, éstos deben ser instalados en la zona de máxima actividad radicular y deben ser siempre combinados con la instalación a mayor

profundidad de sensores de medida del contenido volumétrico de agua en suelo para evaluar el drenaje, lavado de sales y lixiviación de fertilizantes en profundidad.

5.3 Esquema de funcionamiento y mantenimiento.

Se describen las especificaciones técnicas de los equipos, las recomendaciones para la instalación y calibración de los sensores, y el registro de los datos, de tal manera que se asegure la viabilidad y funcionalidad a largo plazo de la medida.

5.3.1 Especificaciones técnicas de los equipos a instalar:

5.3.1.1 Sensores del estado energético de agua en suelo.

Para la medida de potencial matricial de agua en el suelo (estado energético) se destacan, entre otros, los tensiómetros y, en menor medida, los bloques de resistencia que actualmente están cada vez más en desuso.

Un tensiómetro consta de un depósito que se llena de agua, una cápsula porosa de cerámica y un vacuómetro (Figura 3). Cuando el tensiómetro se ha instalado a la profundidad deseada, la energía del agua en su interior se equilibra con la del suelo que le rodea. Conforme se va secando el suelo, éste extrae más agua del tensiómetro a través de la cápsula porosa; generándose una presión negativa (vacío) en el interior del depósito, que es lo que mide el vacuómetro. Aunque se trata generalmente de equipos que precisan de personal para tomar las lecturas, existen modelos que registran automáticamente los valores de potencial hídrico del suelo (electrotensiómetros) (Figura 3C). El valor de cada unidad oscila dependiendo de si es electrónico o no y de su longitud.

En la Tabla 3 se recogen algunos de los principales tensiómetros del mercado.

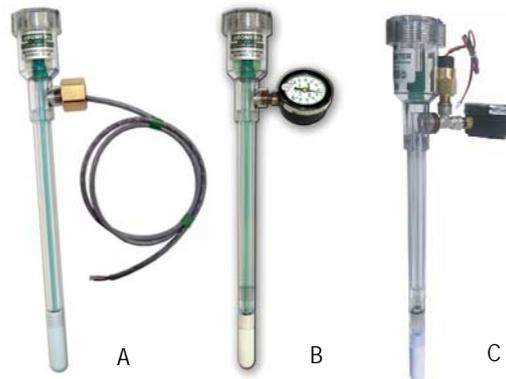


Figura 3. Tensiómetros Irrometer modelo MLT (A) y SR (B). Tensiómetro eléctrico Irrometer modelo ISRAVS (C). Fuente: www.irrometer.com

Por otra parte, además de los clásicos tensiómetros, como los de la marca Irrometer (Figura 3), que requieren mantenimiento, y los bloques de yeso resistivos, como los Watermark, cuyo coste es más asequible, pero que poseen muy poca sensibilidad, la firma comercial Meter Group (antiguamente conocida como Decagon) comercializaba el dispositivo **TEROS 21** (Figura 4), basado en variaciones capacitivas calibradas, que proporciona la medida del potencial matricial del suelo de forma continua y sin apenas mantenimiento durante 2 ó 3 años, aunque, en la actualidad, se ha descatalogado a la espera de un sensor que lo reemplace comercialmente con las mismas prestaciones.



Figura 4. Sensor de potencial matricial del suelo modelo TEROS 21. Fuente: Meter Group Inc. USA

5.3.1.2 Fundamentos de los sensores de contenido volumétrico de agua del suelo (CVAS)

Los sensores de medida del CVAS se basan, en su gran mayoría, en el concepto de permitividad del medio, esto es, aprovechar la gran diferenciación existente entre la constante dieléctrica del aire y la del agua para determinar, utilizando técnicas de reflectometría en el tiempo y en la frecuencia, el contenido de agua en el suelo (en porcentaje), así como la conductividad eléctrica (CE) del medio, muy útil para trabajar con aguas de distinta calidad (por ejemplo, regeneradas o desalinizadas).

El suelo y el aire son medios, en gran medida, no polares, pero el agua es una molécula polar con una carga negativa y otra positiva que, en presencia de un campo magnético, girará manteniendo una carga eléctrica a la frecuencia del campo magnético. El concepto de permitividad dieléctrica (ϵ) se define como la capacidad de una sustancia de retener una carga eléctrica. La permitividad relativa o constante dieléctrica (κ), que es adimensional, se define como $\kappa = \epsilon / \epsilon_0$, donde: ϵ_0 es la permitividad del vacío. La κ del aire es 1 y la del agua es 80 y estos valores son la base de todos los métodos para estimar el CVAS.

La ϵ de cualquier material es un número complejo, cuya parte real (ϵ_r) representa el "almacenamiento de energía" en forma de polarización rotacional, que está estrechamente relacionada con CVAS (θ_v); y la parte imaginaria (ϵ_i) representa la "pérdida de energía". Esta parte imaginaria permite una buena estimación de la salinidad del suelo y, cuando $\epsilon_r \gg \epsilon_i$, entonces $\epsilon_r = f(\theta_v)$, siendo una medida fiable de CVAS (Seyfried & Grant, 2007).

En este sentido, el sensor electromagnético responde a la permitividad relativa aparente del suelo o constante dieléctrica aparente (ϵ_a) (Ferre & Topp, 2002). Esta permitividad aparente, ϵ_a , depende de la frecuencia de funcionamiento del sensor, de la CE del suelo y de la temperatura del suelo, que afecta tanto a ϵ_r como a ϵ_i . En el caso de que el valor de ϵ_i sea alto se introducirá un error, aumentando el valor de CVAS. Este hecho puede paliarse si el sensor funciona a frecuencias altas que proporcionan un carácter más real a ϵ_a .

El término "almacenamiento de energía" puede ser caracterizado por su capacitancia, que es un número complejo, cuya parte imaginaria depende de la frecuencia de funcionamiento del sensor, de la CE del suelo y de la temperatura real del sensor en el suelo, es decir, de ϵ_a .

SENSORES DE PERMITIVIDAD: Técnicas de estimación de la permitividad y del contenido de agua del suelo.

Las principales técnicas utilizadas para la estimación de la permitividad y del contenido de agua del suelo se pueden clasificar en cuatro grupos: (i) Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), (ii) transmisión en el dominio del tiempo (TDT), (iii) capacitancia o Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), y (iv) Impedancia.

La Tabla 4 muestra los principales sensores dieléctricos incluyendo marca, modelos, diseños, interfaces y enlaces a la página web para obtener más información técnica.

i) En la **Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)** (Figuras 5-7), el frente de onda de un pulso pasa a lo largo de la varilla con una velocidad determinada por la permitividad dieléctrica proporcionada por el suelo. Una parte de la señal se refleja a lo largo de la varilla, lo que se utiliza para determinar la CE del suelo. En los últimos años, Acclima Inc. (Meridian, EE.UU.) lanzó una "segunda generación" de sensores TDR basados en la nanoelectrónica con un precio mucho menor y una precisión superior, tanto para el contenido de agua como para la CE del suelo, que sus predecesores (por ejemplo, Tektronik 1502B). Los modelos existentes en el mercado se muestran en la Tabla 4.

ii) **En la transmisión en el dominio del tiempo (TDT)** (Figuras 8-11), la medición se basa en el tiempo que tarda el frente de onda del pulso en recorrer las varillas conectadas de principio a fin a la fuente eléctrica. En cambio, los sensores TDR son varillas de extremo abierto que miden el tiempo de transmisión y el pulso reflejado. Por tanto, se trata de un circuito cerrado en el que se mide la diferencia de tiempo en diferentes extremos de la varilla. Los modelos existentes en el mercado se muestran en la Tabla 4.

iii) Para las **técnicas de capacitancia o FDR** (Figuras 12-17), los sensores utilizan el suelo como un condensador, que almacena parte de una carga eléctrica. La frecuencia medida (F) depende de la capacitancia (C), ya que el inductor (L) es una constante ligada al diseño del sensor. Existen en el mercado varias opciones. Una de ellas, es el caso del sensor EnviroSCAN, cuya frecuencia normalizada del suelo, que es una función de θ_v , necesita de calibraciones utilizando estos valores normalizados frente a una gama de valores de contenido volumétrico

de agua y de temperatura para suelos específicos, lo que conduce a una relación no lineal (Paltineanu & Starr, 1997).

Otros sensores de capacitancia, como EnviroPro o Aquacheck, proporcionan una estimación directa de θ_v , pero se dispone de poca información técnica y se necesitan calibraciones específicas. Así, el sensor de capacitancia 10HS está pre-calibrado para estimar la permitividad constante aparente $\epsilon_a = f(mV)$ y se asume que el nivel de capacitancia se relaciona con el tiempo de carga del condensador. Los modelos existentes en el mercado se muestran en la Tabla 4.

En los últimos años, Sentek Sensor Technologies Inc (Stepney, Australia) lanzó la sonda encapsulada tipo 'Plug&Play' (Drill&Drop) como alternativa de la conocida sonda de humedad del suelo EnviroSCAN, que se vende como un kit compuesto por tubo de acceso, varilla de sonda, sensor de sonda con borde biselado (en filo de corte), y varias salidas de interfaz. Otras empresas se han esforzado en desarrollar y vender sensores de bajo coste, pero que han ofrecido resultados pobres en el campo.

iv) **La técnica de la impedancia** (Figuras 18-20) también tiene dos componentes: la constante dieléctrica y la conductividad eléctrica del suelo. Una solución numérica de la ecuación de Maxwell está contenida en el microprocesador dentro de la sonda que proporciona la permitividad dieléctrica real e imaginaria y los valores de CVAS para texturas de suelo seleccionadas (Seyfried & Murdock, 2004). Los modelos existentes en el mercado se muestran en la Tabla 4.

A título informativo indicar que las sondas más instaladas a nivel mundial suelen ser las que miden la humedad del suelo basándose en la reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR), entre ellas, destacar las comercializadas por Meter Group (anteriormente Decagon Devices), Enviroscan o Hydraprobe II (Stevens), aunque en la actualidad la mayor precisión de las basadas en TDR y su coste ya no tan elevado está provocando su rápida expansión.

Tabla 3. Resumen de los principales tensiómetros existentes en el mercado.

	Técnicas	Marca	Modelo	Diseño	Interfaz	Website	Coste aproximado* (euros)
Tensiómetros		Meter Group Devices, Inc.	Teros 21	Sensor de humedad y cerámica porosa. Intervalo: -9 a -100 kPa	DDI serie SDI-12	www.metergroup.com	250-300
			Teros 32	Electrónico. Mide diferencial de PMS entre 2 puntos distintos. Intervalo: 0 a -85 kPa.	DDI serie SDI-12		400
	PMS	Irrrometer Company Inc.	SR	Vacuómetro con escala de 0 a -100 kPa y punta de cerámica porosa (blanca)	RSU-V, 4-20 mA	www.irrometer.com	115-130 (200 versión electrónica)
			LT	Vacuómetro con escala de 0 a -40 kPa y punta de cerámica (azul)	RSU-V, 4-20 mA		115-130 (200 versión electrónica)
			MLT	LT en Miniatura	RSU-V, 4-20 mA		

*Precios de mercado (IVA incluido) actualizados a finales de 2021.

Tabla 4 Resumen de los principales sensores para la medida del CVAS existentes en el mercado.

	Técnicas	Marca	Modelo	Diseño	Interfaz	Website	Coste aproximado* (euros)
Sensores CVAS	TDR	Acclima, Inc.	TDR315H,N	Varillas paralelas y portátil.	SDI-12	www.acclima.com	250
			TDR310H				
			TDR305H				
		Campbell Scientific, Inc.	SoilVUE	Sonda (con forma de tornillo) con anillos metálicos.	SDI-12	www.campbellsci.com	1600-2300
			CS650 CS655	Varillas paralelas y portátil.	SDI-12, RS232		
	TDT	Acclima, Inc.	Acc TDT	Varillas paralelas y portátil.	SDI-12	www.acclima.com	230
			Vegetronix, Inc.	VH400	Sonda (pico de lanza) y portátil	0-3 V	www.vegetronix.com
		OnFarm Data Ltd.	Aquaflex	Cinta (3 m)	SDI-12, 4-20 mA	www.aquaflex.com	1300
		RioT Technology Corp.	GroPoint	Sonda, Varillas paralelas y portátil.	SDI-12, 4-20 mA, RS-485	www.gropoint.com	470
		Sentek Sensor Technologies	EnviroSCAN	Sonda con anillos metálicos.	RS232, RS485, SDI-12, 0-5 V	www.sentektechnologies.com	600-1000
			Drill & Drop	Sonda encapsulada.			
		Meter Group Devices, Inc.	5TE	Varillas paralelas y portátil.	RS232, SDI-12	www.metergroup.com	200
			10 HS	Varillas paralelas.	300-1250 mV		150
			Teros 10,11,12	Varillas paralelas y portátil.	SDI-12		150-300
		FDR	AquaCheck, Pty Ltd.	AquaCheck	Sonda encapsulada de anillos metálicos.	RS232, RS-485	www.aquacheck.com
	Entelechy Pty Ltd.		EnviroPro	Sonda encapsulada de anillos metálicos.	SDI-12	www.enviroprosoilprobes.com	600
	Hydra Sensor Technologies International Ltd		Hydrascout	Sonda encapsulada con sensores modulares	SDI-12	www.hsti.co	1150-2250
	Impedancia	Stevens Water Monitoring Systems, Inc.	Hydraprobe	Varillas paralelas y portátil.	SDI-12, RS-485	www.stevenswater.com	800
			Delta-T Devices Ltd.	PR2 Profile	Sonda encapsulada de anillos metálicos.	SDI-12, 0-1 V	www.delta-t.co.uk
		ThetaProbe ML3	Varillas paralelas y portátil.	0-1 V	450		

*Precios de mercado (IVA incluido) actualizados a finales de 2021.

Ejemplos de sensores de permitividad.

- Dispositivos para la medida de humedad del suelo mediante la técnica **TDR** (Figuras 5-7):



Figura 5. Acclima TDR-315H. Sonda e instalación. Fuente: Grau (2018).



Figura 6. Sonda Soil VUE. Fuente: <https://www.campbellsci.com>

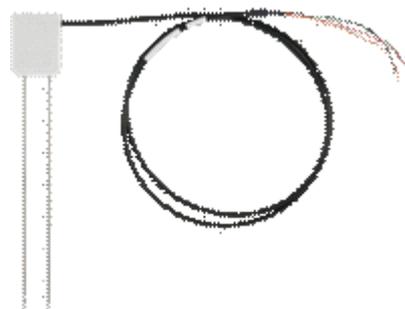


Figura 7. Sonda CS650. Fuente: <https://www.campbellsci.com>

- Dispositivos para la medida de humedad del suelo mediante la técnica **TDT** (Figuras 8-11):



Figura 8. Sonda ACC TDT. Fuente: <https://acclima.com>



Figura 9. Sonda VH400. Fuente: <https://vegetronix.com>

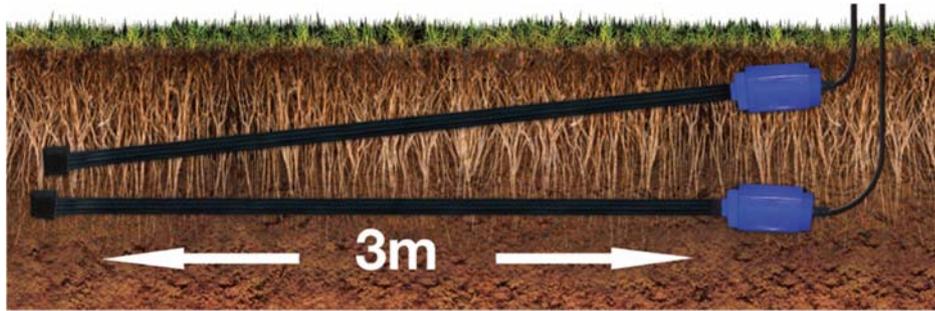


Figura 10. Cinta Aquaflex. Fuente: <https://www.onfarmdata.com>.



Figura 11. Sonda Gropoint. Fuente: www.alphaomega-electronics.com

- Dispositivos para la medida de humedad del suelo mediante la técnica de **capacitancia (FDR)** (Figuras 12-18):



Figura 12. EnviroSCAN. Fuente: <https://sentektechnologies.com/>



Figura 13. Sonda Sentek Drill & Drop de capacitancia totalmente encapsulada. Fuente: <https://sentektechnologies.com>



Figura 14. Sonda 5TE mide la humedad del suelo, la temperatura y la CE del suelo. Fuente: Meter Group Inc. USA



Figura 15. Sonda 10HS de capacitancia (FDR) para medida de humedad del suelo. Fuente: Meter Group Inc. USA



Figura 16. *Aquacheck.* Fuente: www.alphaomega-electronics.com



Figura 17. *EnviroPro.* Fuente: www.agriculture-xprt.com

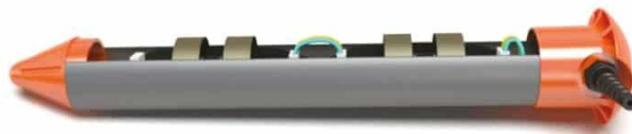


Figura 18. *Hydrascout.* Fuente: www.hydrascout.co

- Dispositivos para la medida de humedad del suelo mediante la técnica de *impedancia* (Figuras 19-21):



Figura 19. HydraProbe. Fuente: <https://stevenswater.com>



Figura 20. PR2 Profile. Fuente: <https://delta-t.co.uk>



Figura 21. ML3 ThetaProbe. Fuente: <https://delta-t.co.uk>

5.3.2 Recomendaciones para la instalación de los sensores.

Las recomendaciones para la instalación de los sensores de medida del contenido de agua en el suelo vienen dadas por el fabricante de los equipos. No obstante, a continuación, se indica un procedimiento habitual, paso a paso, tanto para el riego por goteo como por aspersión:

- Evitar zonas no representativas (seleccionar las zonas representativas con la ayuda de mapas de CE aparente del suelo si es posible, en caso contrario, a través de la experiencia del agricultor).
- Realizar un riego copioso el día previo a la instalación para facilitar la introducción de las sondas en el suelo, aunque se debe evitar que el suelo esté totalmente saturado.
- Las sondas han de instalarse a aproximadamente entre 10-20 cm del gotero (ver apartado 5.2 de esta directriz para más detalle) y sobre suelo nivelado para propiciar que el bulbo húmedo sea lo más simétrico y uniforme posible.
- Evitar, en la medida de lo posible, que existan bolsas de aire entre el suelo y la sonda, es decir, asegurar un contacto total entre las varillas y la matriz del suelo.
- Si en algún momento existe dificultad para introducir la sonda en el suelo, no golpearla para evitar dañar su electrónica.
- Usar la plantilla guía que suministra el fabricante para asegurar que las diferentes varillas se introducen de forma correcta en el suelo. Para fijar la guía a la pared del suelo se pueden utilizar clavos.
- Dejar lo más recta posible la pared del hoyo en la que se van a instalar las sondas para asegurar la correcta instalación de las mismas.
- En el caso de instalar varias sondas a diferentes profundidades, procurar que estén alineadas las unas con las otras. Asimismo, colocar primero la sonda situada a mayor profundidad y, por último, la situada más superficialmente. Por otra parte, se deben marcar los cables de tal manera que, una vez cerrado el agujero en el suelo, se sepa a qué sonda corresponde cada cable.

- Evitar la destrucción tanto de la estructura original del suelo como de raíces activas.
- Reconstruir el suelo manteniendo la estructura y las capas originales. Para ello, se debe destinar la tierra que se ha sustraído durante la formación del hoyo para usarla posteriormente para cubrirlo y de esta forma alterar lo mínimo posible las condiciones del suelo.
- A la hora de cubrir el hoyo, se hace necesario compactar gradualmente la tierra, para ello se debe proceder echando unas cuantas palas de tierra y posteriormente compactarla cuidadosamente. Es muy importante que el suelo tenga un nivel de compactación lo más similar posible al que tenía antes de realizar el hoyo, para evitar la formación de canales preferenciales de infiltración de agua.
- En el caso de que la tierra esté muy seca, se recomienda mojarla un poco para facilitar su compactación.
- Evitar que al cubrir el hoyo pueda caer alguna piedra que pueda dañar las sondas y señalar la zona de instalación para evitar que nadie o nada la pise.
- Dejar un tiempo posterior de estabilización del suelo. Es decir, dejar pasar unos cuantos riegos antes de tomar los primeros datos.

5.3.3 Calibración de los sensores de permitividad.

Como ninguno de los sensores puede medir directamente el contenido de agua en el perfil del suelo, es necesaria una calibración previa a su uso en campo.

El uso de las ecuaciones de calibración proporcionadas por defecto por el fabricante puede dar lugar a estimaciones inadecuadas del CVAS y se debe realizar un análisis específico del lugar. Jones et al. (2005) propusieron una metodología para estandarizar la caracterización de siete sensores electromagnéticos de contenido de agua. El procedimiento de calibración del sensor consta de dos pasos: primero, relacionar la salida eléctrica del sensor con ϵ_r y, a continuación, relacionar ϵ_r con θ_v . En este sentido, el procedimiento estándar para la calibración en laboratorio de las sondas de "punta" y "anillo" ha sido desarrollado por Paltineanu & Starr (1997) y otros autores. Su enfoque se centró en la calibración de un único sensor, pero cuando

se trata de toda la sonda, un contenedor de suelo horizontal evita que el agua se mueva por gravedad; este método es adecuado para las sondas encapsuladas (véanse los modelos de marcas comerciales en la Tabla 4), ya que son impermeables.

Todos los estudios que implican una calibración en el laboratorio o en el campo son muy exigentes en términos de mano de obra y tiempo, y muchas explotaciones agrícolas comerciales utilizan las tendencias en el contenido de agua del suelo con fines de gestión del riego sin ninguna calibración en el campo. Las tendencias de los datos brutos son sólo útiles para conocer la profundidad del frente de humectación, el almacenamiento máximo de agua en el suelo y el momento en que las variaciones diarias del contenido de agua del suelo comienzan a limitar el agua de las plantas (Vera et al., 2017). Sin embargo, la calibración se hace indispensable cuando se plantea conocer la cantidad de agua a aplicar en cada riego.

5.3.4 Registro de la información procedente de los sensores

La información proveniente de los sensores se registra en unos equipos denominados dataloggers. Estos equipos se encargan de capturar la señal proveniente de los sensores, almacenarla y, en su caso, transmitirla de forma local o remota bien a aplicaciones cliente en ordenadores o dispositivos inteligentes (APP), o bien a servidores remotos en la nube. Dentro de la diversidad de fabricantes de sensores existentes en el mercado, existe obviamente la de dataloggers de tal modo que prácticamente cualquier fabricante de sensores de uso agrícola o medioambiental, dispone de sus propios dataloggers para conectar los sensores y transmitir la información. Algunas marcas utilizan en exclusividad sus dataloggers, es decir, sólo pueden conectarse determinados tipos de sensores (especialmente los de su marca), lo que obliga al cliente a disponer de los dispositivos ofertados por el proveedor. Otras marcas, sin embargo, han centrado su política en la flexibilidad de conexión de sensores, desarrollando productos de registro de datos muy versátiles y potentes, como es el caso de Campbell Scientific y su amplia gama de dataloggers.

La conexión de los sensores a los dataloggers también puede tener una distribución diferente según las marcas. Por un lado, existe la configuración centralizada, donde un datalogger recibe la información de muchos sensores conectados a él. Por el otro, la configuración distribuida con una red de dataloggers (o sensores) donde cada uno instrumenta sólo un pequeño número de sensores. Hay que tener en cuenta que, debido a la variabilidad de

los parámetros medidos, es necesario tener varios puntos de medida para asegurar la fiabilidad de los datos obtenidos. La configuración centralizada exige un mayor trazado de cables lo que conlleva más gasto en instalación y riesgo de rotura. La distribuida, sin embargo, puede ser más robusta, pero a su vez más cara debido al precio de los equipos.

Ejemplos de dataloggers

(1) El datalogger CR1000X de Campbell Scientific (Figura 22) dispone de una amplia capacidad de conectar señales procedentes de diferentes sensores, entre los que se destacan los siguientes:

- Voltaje (Termopares, 0-20 mA o 4-20 mA /shunt resistor, radiómetro, etc.).
- Puente medio (Potenciómetro, termistor, pt100, etc.).
- Puente completo (Galga ext., transductor presión, célula de carga, etc.).
- Pulsos/Frecuencia (contacto, anemómetro, contadores, etc.).
- Comunicaciones serie con dispositivos y sensores mediante RS232/RS485 (analizador gases, GPS, anemómetro, etc.) y SDI-12 (enviroscan, MPS6, anemómetro sónico, etc.).
- Binario/gray (veletas, etc.).

Este datalogger funciona en condiciones extremas con un rango estándar de -40°C a $+70^{\circ}\text{C}$, y extendido opcional de -55°C a $+85^{\circ}\text{C}$.

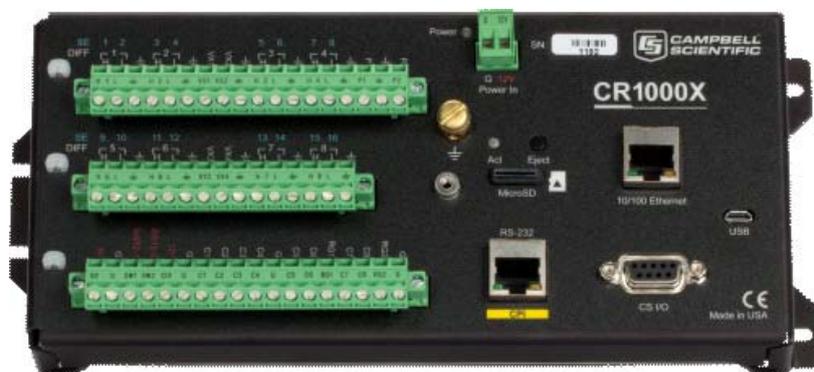


Figura 22. Datalogger CR1000X. Fuente: www.campbellsci.es.

La conexión se realiza mediante una serie de bornes con tornillos y es capaz de integrar diferentes dispositivos de comunicación para incrementar las opciones de envío de datos.

Las entradas de señales analógicas son totalmente configurables para mediciones sencillas (“SE”) entre 0 y 2500 mV o para mediciones diferenciales (“Diff”) entre -2500 y 2500 mV. Por otro lado, se dispone de 8 bornes para conectar entradas o salidas binarias o “Todo-Nada” además de otras entradas de pulsos para anemómetros o caudalímetros.

El CR1000X se programa mediante un software con varias aplicaciones que facilitan su uso. Dicho programa se divide en 3 partes:

- Declaración de Variables.
- Tablas de datos.
- Cuerpo del programa.

Estas variables sirven para asignar el valor medido por un sensor a un determinado nombre que puede ser operado matemáticamente. Estas operaciones, como captura de datos del sensor, cálculo de índices u otro tipo de operaciones se ejecutan a intervalos regulares que se indican en el cuerpo del programa. Al ser ejecutado cíclicamente, las variables declaradas se sobrescriben. Por ello, es necesario crear una serie de “Tablas de datos”, a las que se llama al final del cuerpo del programa, para almacenar el valor de la variable medida y que éste no se pierda en el siguiente ciclo de ejecución del programa.

(2) El datalogger S-WIDE de Widhoc (Figura 23) es un robusto dispositivo capaz de gestionar un amplio abanico de sensores gracias a sus opciones de lectura, ya que también puede medir sensores analógicos de 0-5V (tipo voltaje) ó 4-20mA (tipo corriente), sensores con comunicación SDI-12 y sensores con salida switch o tren de pulsos. Concretamente incorpora un Bus SDI-12 capaz de medir hasta 10 sensores. También incluye un micro secundario encargado de instrumentar los sensores digitales tipo Switch o Tren de pulsos, reduciendo notablemente el consumo de energía al no hacerlo el micro principal (WIPY).

Estos tipos de señales engloban el grueso de la mayoría de los sensores comerciales presentes en el mercado. Es totalmente autónomo a nivel energético, dado que usa 3 baterías 18650 de Li-ion de 3500mAh recargables, lo que permite ser instalado en cualquier lugar y cargar las baterías con su cargador solar. Dicho sistema de carga está formado por un cargador de baterías de Li-ion incorporado en la electrónica (cargador Inteligente con entrada de 7-32VDC. Max: 3A) y un panel solar de 12V y 4 W de potencia, suficiente para las necesidades energéticas del equipo. En lo referente al almacenamiento de datos, este equipo dispone de tarjeta MicroSD de 16-32 Gb que permite almacenar gran cantidad de datos, además de una memoria Flash para almacenar el software y configuraciones asignadas al equipo. Permite dos tipos de comunicación, la primera es por WIFI (802.11b/g/n 16mbps) dado que incorpora un módulo integrado con esta tecnología, y la segunda es un módulo extraíble GPRS GSM modelo SIM800L, lo que le otorga la comunicación M2M que le permite ser totalmente funcional en cualquier lugar de uso. Además, tiene la posibilidad de implementar cualquier otro tipo de comunicación. Tiene un reducido tamaño, por lo que es fácil de instalar en la mayoría de los cultivos, su grado de protección IP65 es resistente a los factores ambientales externos, pudiendo mejorar la caja con otra cobertura al grado de IP68. Se adapta a todo tipo de suelo y de cultivo, si bien recomendamos una frecuencia de recogida y envío de datos de 10 minutos, dicha frecuencia se podrá extender o reducir a fin de adaptarla a los tipos de riego usados y necesidades hídricas del cultivo. Dispone de localización por GPS (Multi-GNSS). Las condiciones ambientales de funcionamiento básicas son de -10 a 60 °C y hasta 70-85% HR.



Figura 23. Datalogger S-WIDE. Fuente: www.iagua.es.

5.3.5 Protocolos de telecomunicación y uso de sensores de permitividad en el IoT (Internet of Things)

Se recomienda que los dispositivos implantados sean autónomos y vayan previstos de placas fotovoltaicas y baterías, además de su propia tecnología inalámbrica de transmisión de datos, si es posible. Actualmente, los sensores de contenido de agua del suelo se conectan a un sistema de telemetría mediante una red de sensores inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Network) que se compone de transceptores, sensores, microcontroladores y una batería como fuente de energía. Estas WSN han pasado recientemente a primer plano en la investigación sobre el riego. El sistema debe incluir unidades de transmisión robustas, un procesador de bajo consumo, una configuración flexible de los puertos de E/S, una batería de larga duración, y una plataforma de software amigable.

Para la unidad de transmisión, las principales características que hay que tener en cuenta son la frecuencia de funcionamiento, el consumo de energía, las entradas y salidas analógicas y digitales, contador de frecuencia de impulsos, conectores impermeables y caja con protección de clase IP65.

Una WSN se compone de "nodos", que van desde unos pocos a varios cientos. Cada nodo está conectado a uno o varios sensores que se comunican de forma inalámbrica (Navarro-

Hellín et al., 2015) y tiene una unidad de transmisión con una antena, un circuito electrónico para la interconexión con los sensores, y una fuente de energía, normalmente una batería recargada por un panel solar. Las unidades de transmisión por radio envían datos a una pasarela conectada mediante TCP/IP a un programa servidor web de Supervisión, Control y Adquisición de Datos, comúnmente llamado SCADA (de las siglas en inglés Supervisory, Control and Acquisition).

Una WSN unidireccional es un conjunto de sensores autónomos distribuidos espacialmente que monitorizan las condiciones físicas o ambientales, como el contenido de agua del suelo, las precipitaciones, el potencial hídrico del suelo y de la planta, los eventos de riego, la temperatura foliar, y las condiciones meteorológicas. Utilizar sistemas WSN unidireccionales para controlar el riego requiere un servidor remoto y lecturas de sensores del continuo suelo-planta-atmósfera que tengan en cuenta la variabilidad temporal y espacial, para ser transmitidos en tiempo casi real al servidor, y el acceso a los datos a través de Internet. No obstante, se recomienda también un sistema de apoyo a la toma de decisiones para manejar toda esta información y hacerla de utilidad para el usuario final.

Actualmente, con el crecimiento de las tecnologías de IoT se puede encontrar un número creciente de aplicaciones prácticas en muchos campos, incluida la agricultura: sistema global de comunicaciones móviles (GSM), tecnologías de radio de corto alcance (por ejemplo, Bluetooth ZigBee), comunicaciones celulares con un alto consumo de energía de los dispositivos (por ejemplo, 3G, 4G, 5G), y nuevas tecnologías de redes de área amplia de baja potencia (por ejemplo, LoRaWAN, SigFox, NB-IoT). Un estudio comparativo sobre las tecnologías de comunicación se puede encontrar en Mekki et al. (2019).

Para permitir las comunicaciones con los sensores implantados (telemetría y control remoto de los sensores) es suficiente la basada en GSM/GPRS (Global Systems for Mobile/General Packet Radio Service), frente a las otras tecnologías citadas como LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT, 4G, por los siguientes motivos:

- Las velocidades de comunicación y el volumen en bytes de la información registrada por este tipo de sensores no requieren grandes tasas de transferencia, por lo que la tecnología M2M cumple de sobra con los requisitos de comunicación requeridos.

- Las coberturas más actuales como el 4G y 5G no siempre están extendidas en las zonas de despliegue de los equipos, por lo que usar la tecnología ya afianzada como el 2G garantiza una conexión segura en el 100% de los lugares de instalación de dataloggers. No obstante, en un futuro próximo donde se pueda asegurar una adecuada cobertura 4G ó 5G, se recomienda usar dicha tecnología bajo la premisa de modernizar los regadíos con la última tecnología.
- Necesaria comunicación bidireccional. El uso de GSM/GPRS, permite una comunicación bidireccional entre los dispositivos desplegados y la plataforma de alojamiento de datos, no sólo para recibir la telemetría de los dataloggers, sino por la opción de actualizar remotamente las configuraciones, y tele comandar los dispositivos.
- Casi ilimitada cantidad de datos. Permite actualización remota de firmware del equipo. La comunicación M2M permite disponer de una tasa de datos suficientemente grande para la comunicación de los dispositivos con el servidor. No obstante, la ampliación de dicha tasa en las aplicaciones que sea necesaria no supone ninguna limitación. Dado su bajo coste, también es un sistema mucho más sostenible desde el punto de vista económico.
- No hay restricción de envío como en Sig-Fox (muy poca cantidad de datos). No es necesario realizar mantenimiento de la infraestructura de red como ocurriría en ZigBee o LoRaWAN. El uso de GSM/GPRS facilita una mayor robustez respecto a una infraestructura centralizada como pueden ser ZigBee o LoRaWAN, ya que si el equipo máster se cae por algún motivo dejarán de enviar datos el resto de los nodos de la red.
- El coste de mantenimiento de comunicaciones para las Comunidades de Regantes es sumamente bajo al ser tarjetas M2M con una carga de datos amplia (no ofrecida por otros sistemas anteriormente mencionados).

Un paso adelante en la automatización del riego es una WSN bidireccional denominada Wireless Sensor and Actuator Network (WSAN), una variante de la WSN que tiene un tipo adicional de componente que es un Actuador. La inclusión de un Actuador aumenta la capacidad de la WSN desde la monitorización hasta el control del sistema (Aqeel-ur-rehman, Zafar et al., 2014). Añade la capacidad de controlar la actividad de los sensores, normalmente por medio de electroválvulas para desencadenar el riego basado en algoritmos específicos, y, además, para

detectar fallos del sistema, lo que permitirá obtener información en tiempo real y acción en tiempo real.

En este sentido, uno de los retos actuales es conseguir iniciar un riego de forma automática basado en la actividad de los sensores. Para ello, se necesitan informes de riego procedentes de modelos desarrollados con la información de los sensores. Es decir, la información proporcionada por los sensores va a permitir conocer el estado del suelo y realizar mapas de humedades. Esta información, complementada a su vez con los datos de riego permite elaborar modelos para predecir las necesidades hídricas de los cultivos. Estos modelos predictivos pueden ser desarrollados por medio de técnicas de Machine Learning (ML), las cuales estiman de forma exacta el comportamiento de un cultivo a lo largo de los diferentes ciclos del mismo. El modelo es alimentado por la información procedente de los sensores. Una vez entrenado el modelo, éste puede ser ejecutado periódicamente para realizar una predicción de las necesidades. Esta predicción es posible almacenarla en un formato organizado y conocido donde se disponga de manera sencilla la cantidad de riego y momento idóneo para llevarla a cabo. Este informe de riego puede ser digitalizado y almacenado en una base de datos (Servidor Front-End) a la que se puede dar acceso desde fuera a través de una API REST, donde sería posible obtener la información de la cantidad de agua requerida en cualquier momento del año.

El desarrollo del dispositivo Actuador, citado anteriormente, el cual estaría conectado al programador de riego comercial (por ejemplo, de las marcas Agrónic, Xilema u otros similares) permitiría la conexión a un dispositivo externo por medio de la interfaz RS232/RS485 y cerraría el lazo de riego (remota de telecontrol), pudiendo cargar en el programador de forma remota el informe de riego generado por el modelo, de forma manual o en base a los parámetros en tiempo real de las condiciones de humedad de suelo del cultivo. En caso de no disponer de programador de riego, el dispositivo Actuador podría actuar directamente sobre las electroválvulas por medio de las cuatro salidas de relés de las que dispone.

Por último, y de forma que el manejo de todo el sistema se lleve a cabo de la forma más sencilla posible, se puede dotar al regante de una App que permita establecer los parámetros más idóneos para llevar a cabo el riego. Esta App conectaría con la API y permitiría definir la forma que se necesite regar: modo manual, calendario, modo automático en base al informe y modo automático en base a variables en tiempo real del cultivo (Figura 24).

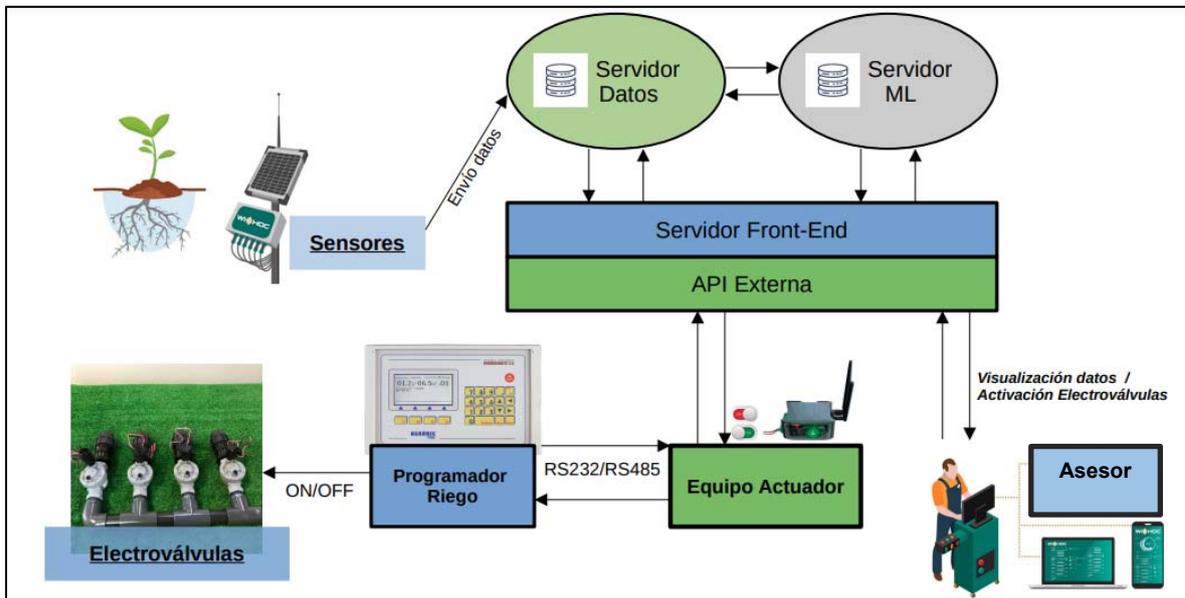


Figura 24. Esquema diagrama de los elementos de telecontrol. Fuente: Adaptado CEBAS-Widhoc.

Las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) son muy dinámicas y, por lo general, los datos se almacenan en la nube. Hay varias soluciones de software disponibles en el mercado para procesar esas WSN o WSAN desarrolladas: Libelium (www.libelium.com), addVANTAGE (www.adcon.com), GP2 (www.delta-t.co.uk), Irrimax (www.sentektechnologies.com), Zentra Cloud (www.metergroup.com), Evvos Cloud (www.eccos.com), entre otras. Una de las principales preocupaciones de la comunicación inalámbrica es la seguridad de los datos. Dado que las señales se transmiten en espacio abierto, es posible que un intruso pueda interceptar las señales y copiar información sensible. Proporcionar seguridad a todo el proceso de comunicación y gestión de datos es difícil, dado el principio de seguridad de la tríada CIA (Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad) (Andress, 2014). Cuando se gestionan grandes cantidades de datos, se utilizan diferentes protocolos de comunicación en diferentes canales, con múltiples fuentes que envían información en una enorme variedad de formatos de datos, proporcionar seguridad se convierte en un reto, aunque este tema no es un objetivo de esta guía.

5.4 Plan de seguimiento.

Se establecen los factores que pueden afectar al rendimiento del sensor, la metodología de lectura e interpretación de los datos y su aplicación, todo ello con el fin de evaluar el estado y funcionamiento de la medida.

5.4.1 Factores que afectan al rendimiento del sensor.

En una evaluación de cómo encontrar el mejor sensor de contenido de agua del suelo para una aplicación determinada, Ritter (2016) concluyó que todos los sensores de contenido de agua del suelo tienen sus ventajas y desventajas particulares. En este sentido, las principales características de los sensores de contenido de agua en el suelo disponibles en el mercado se incluyeron en Charlesworth (2005) y Sample et al. (2016). Además, se puede encontrar un enlace útil sobre los sensores de agua del suelo en <https://soilsensor.com>, actualizado con nuevos sensores.

Los principales factores que afectan al rendimiento de los sensores que hay que considerar para seleccionar el sensor de agua del suelo más adecuado para una determinada zona son:

- La textura del suelo, la densidad aparente, la CE aparente, la presencia de piedras y la heterogeneidad espacial del suelo.
- Patrón de profundidad y distribución de las raíces (especies vegetales) y sistema de riego (diseño hidráulico). Estas características son cruciales para colocar correctamente los sensores dentro de la zona de la principal captación de agua de las raíces.
- Volumen de suelo explorado por el sensor. Para esta característica, hay que considerar tanto la sensibilidad radial como la axial (Paltineanu & Starr, 1997). La sensibilidad axial para anillos cilíndricos separados 10 cm es de ± 5 cm, centrada entre ambos anillos metálicos. El 99% del rango de sensibilidad radial es inferior a 10 cm, en el caso de los sensores de capacitancia cilíndricos incrustados en una tubería de acceso de PVC. Una variedad de sensores de capacitancia y TDR, con puntas de 5 a 30 cm de longitud, explorarán un volumen radial 1,4 veces el de la distancia entre puntas. Por ello, puede

concluirse que la principal limitación de los sensores dieléctricos es el bajo volumen relativo del suelo explorado.

- Efectos de la temperatura. Se han observado fluctuaciones diurnas en los valores de CVAS en todos los sensores dieléctricos que emplean técnicas de TDR, TDT, capacitancia e impedancia (Chanzy, Gaudu y Marloie, 2012; Paltineanu & Starr, 1997; Seyfried & Murdock, 2004; Wraith & Or, 1999).
- Opciones de diseño: sensor fijo de un solo punto (p. ej. HydraProbe), sensores de perfil de suelo denominados como sonda (por ejemplo, EnviroSCAN), o sensor portátil (por ejemplo, el kit de campo de Acclima).
- Tipo de sensor incluido en el dispositivo. ¿Mide sólo el contenido de agua del suelo o una combinación de contenido de agua del suelo, temperatura y la salinidad?
- Precisión. Normalmente se define como un porcentaje para el rango de mediciones, por ejemplo, $\pm 2\%$ para un rango de 0-50% CVAS (un caso, EnviroPro).
- Frecuencia de trabajo del sensor. Cuanto mayor sea la frecuencia mejor para los valores de CVAS, ya que reduce la componente imaginaria de la permitividad. Aunque los fabricantes proporcionan esta información rara vez, normalmente varía de 20 MHz a 1 GHz.
- Precisión de la calibración. Las calibraciones específicas del suelo reportadas en la literatura están en el rango de 0,02 a 0,03 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, algo mayores que los valores $\leq 0,01 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ comunicados para el método de sonda de neutrones y TDR (Evet et al., 2005). Algunos fabricantes proporcionan la precisión del sensor para rangos de salinidad, lo que puede ser de relevancia cuando se pretende emplearlos en suelos y/o aguas salinas.
- Alimentación del sensor. Ésta varía de +3,5 a +15 V. La baja tensión de excitación del sensor es una característica deseable y no afecta al volumen del suelo explorado.
- Consumo de energía del sensor. Esto también es importante porque la batería del registrador de datos admite tanto modos inactivos y activos.

- Interfaz de comunicación del sensor. La interfaz digital en serie Interfaz SDI-12 se está convirtiendo en un protocolo ampliamente utilizado, su dirección de bus, 0 por defecto, puede ser cambiada utilizando los comandos SDI-12 (www.sdi-12.org).
- Dificultades que conlleva la instalación y desinstalación. La instalación del sensor de permeabilidad es un tema crítico y, por lo tanto, debe asegurar un estrecho contacto del sensor o del tubo de acceso con el suelo. Los diferentes protocolos de instalación dependen del formato del sensor: electrodos paralelos en contacto directo con el suelo y electrodos cilíndricos dentro de un tubo de acceso de PVC. Coelho & Or (1996) aplicaron principios físicos para la colocación del sensor en varios escenarios de riego por goteo, concluyendo que las regiones consideradas adecuadas para la colocación de los sensores son las influenciadas sobre todo por el intervalo de riego.
- Salinidad tanto del suelo como del agua de riego. Dado que la salinidad afecta en gran medida a los valores de CVAS, los sistemas de capacitancia suelen presentar grados crecientes de error a medida que la salinidad del suelo o del agua aumenta. Numerosos estudios lo confirman (Campbell, 1990; Evett et al. 2002; Kargas, Kerkides, & Seyfried, 2014; Kelleners et al., 2004).
- Costes. El coste de un sensor TDR es ≈ 250 € mientras que los sensores de capacitancia, normalmente fabricados en sondas de 0,4 a 1,6 m de longitud, con sensores separados 0,1 m (esta separación puede ser adaptada a las necesidades del usuario), varían entre 400 y 1000 €. Los sensores de capacitancia de horquilla (varillas) independiente tienen un coste de ≈ 200 €. Además, los costes asociados con los registradores/lectores, la comunicación y el software aumentan en unos 600-1200 €.

5.4.2 Metodología de lectura e interpretación de los datos y su aplicación.

Estado energético de agua en suelo

De forma general, sin distinguir características texturales del suelo, se puede realizar la siguiente interpretación de las lecturas obtenidas:

- De 0 a 10 kPa: Suelo saturado, por riego profundo o lluvias importantes (normales por un período de 24 horas tras estos eventos). Si estos valores son persistentes, indican un exceso de humedad que puede dar lugar a la asfixia de las raíces.

- De 11 a 30 kPa: Suelo a capacidad de campo. *Lectura que debe mantenerse en riego por goteo*, especialmente si se trata de cultivos hortícolas. Indican que el agua está a la disposición de la planta con un esfuerzo mínimo. Se pueden suspender los riegos por aspersión para evitar pérdidas, tanto de agua como de fertilizantes.
- De 31 a 60 kPa: Humedad deficitaria para el riego por goteo. Cultivo en condiciones de estrés hídrico, lo que puede ser recomendable durante algunas fases del desarrollo del cultivo en las especies frutales. Sin embargo, esta gama de lecturas asegura una buena oxigenación de las raíces. En zonas cálidas y cuando se trate de regar terrenos muy arenosos (con poco poder de retención de agua), se recomienda iniciar los riegos con lecturas de 31 a 45 kPa.
- A partir de 70 kPa: El cultivo se encuentra sin disponibilidad de agua para su crecimiento y desarrollo. Estas lecturas indican que la planta podría estar padeciendo estrés y se acerca al punto de marchitamiento. Es posible que todavía exista agua en el suelo, pero a la planta le resulta muy difícil extraerla.

Contenido volumétrico de agua en suelo

En primer lugar, hay que partir del hecho de que *no debe exigirse una cifra exacta* del contenido volumétrico de humedad del suelo con los equipos de medida habituales que están largamente extendidos, principalmente FDR, ya que sería muy poco precisa y rigurosa, originándose datos que no se ajustarían a la realidad para la adecuada gestión del riego de los diferentes cultivos. Por tanto, existen numerosos inconvenientes que van a crear una importante incertidumbre en este valor absoluto que registra el sensor, tal y como se ha indicado en apartados anteriores de este documento. Entre ellos, se encuentra el tipo y la tolerancia del sensor utilizado, instalación adecuada en el suelo, calibración en función de las características del suelo (textura, densidad y porosidad) y la heterogeneidad existente en el propio suelo de la parcela. Todos estos factores añaden mucha incertidumbre a la precisión de la medida y, por ello, es frecuente dar *valores relativos* más que absolutos. Por tanto, lo que debe primar es la evaluación técnica y homologación de los equipos utilizados en cada caso en cuestión, creando un **modelo de certificación de los datos obtenidos extrapolables a cualquier zona**. Es importante señalar que, en el caso de no disponer de una calibración de los sensores en el terreno en el que se instalen, se recomienda emplear valores relativos (dividiendo las

lecturas del sensor entre el valor máximo registrado por el propio sensor durante la época de lluvias). Además, podemos indicar que la evolución en el tiempo de los registros que ofrecen estos sensores supone una valiosa información para determinar si el riego durante la campaña fue adecuado o no.

Recomendación para analizar los datos de contenido volumétrico de agua en el suelo:

Un personal responsable de cada Comunidad de Regantes debe supervisar la recogida de datos de las medidas de los equipos instalados y también de las aplicaciones de riego diarias/semanales realizadas en la parcela durante un período de tiempo suficientemente representativo (por ejemplo, periodicidad bimensual) para su posterior análisis. Tras el análisis de esta información, se podría conocer si se está llevando a cabo un uso óptimo de la información generada en la gestión del riego de la parcela del comunero de cada CR. En este sentido, se debe presuponer que el personal técnico adaptará la toma de decisiones en la programación del riego a partir de las medidas que obtenga de los equipos, desechando o dando mayor valor a los sensores que él crea que peor o mejor están relacionándose con el estado hídrico y desarrollo del cultivo (se parte de la premisa de que el personal técnico siempre tiene en consideración las medidas de los sensores para la programación del riego). Por consiguiente, se plantea como procedimiento ideal que los agricultores faciliten los datos de sus sensores a los técnicos de la Comunidad de Regantes (bien sea de manera directa o que el técnico tenga acceso directo a los datos a través de un servidor web) y éstos, a partir de dicha información, informen de las recomendaciones de riego al agricultor para que éste decida finalmente la dosis de riego a aplicar.

No obstante, como se ha citado en el apartado 5.3.5 y se amplía en el Anexo I, cabe la posibilidad de que, si el agricultor está de acuerdo y asume la responsabilidad de la actuación, se aplique la remota de telecontrol en los hidrantes, de manera que, bajo la supervisión de los técnicos de la Comunidad de Regantes, los sensores de CVAS actúen automáticamente sobre la programación del riego. Para ello, es necesario que los sensores de humedad empleados dispongan de una App que implemente una interfaz de comunicación que pueda conectarse a un coordinador que, a su vez, tendrá conectada la aplicación de control SCADA, según se especifica en la norma de interoperabilidad UNE 318002-3 «Técnicas de riego. Telecontrol de zonas regables (Anexo I).

Para corroborar y/o poder adoptar una decisión apropiada, la recomendación sería realizar una lectura rápida de las medidas de contenido volumétrico de agua en el suelo, y si estos valores superaran *el 40% de humedad*, al ser muy elevados (bajo la premisa de un suelo de textura franco-arcillosa y adecuada calibración a la solución del suelo) podría tener indicios de posible sobre-riego del cultivo. En el caso de cultivos leñosos, la medida del sensor a la máxima profundidad (70-90 cm) sería de gran utilidad para poder tomar una decisión al respecto. En el caso de que no se disponga de una calibración de las sondas, se debe relativizar el valor frente al máximo registrado. Por ejemplo, si a 25 cm el valor máximo es 50%, una lectura de 40% supondría un 0.8. Cuando el valor de esta sonda baje de 0.7 se debería regar (no obstante, los umbrales deben fijarse dependiendo del cultivo y el tipo de suelo).

Hay que tener en cuenta que la saturación máxima es del 50-52% en suelos de textura franco-arcillosa, y que estos valores únicamente se podrían alcanzar en niveles muy superficiales del perfil de suelo y justo después de regar o tras una lluvia copiosa.

6. Arquitectura de medidas por tipología/actuaciones de los proyectos

Los proyectos incluidos en el “Plan para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en regadíos” se pueden catalogar en grandes grupos en función de la tipología del mismo:

1. Proyectos que utilizan recursos hídricos no convencionales
2. Proyectos que emplean energías renovables
3. Proyectos de eficiencia energética e hídrica
4. Proyectos que incluyen desarrollo de nuevas tecnologías y sistemas de telecontrol
5. Proyectos de modernización tradicional

Además, cada tipología de proyecto puede contemplar una o varias actuaciones. En la siguiente Tabla 5 se indican las tipologías de proyecto y las actuaciones en las que es muy recomendable la aplicación de las medidas de esta Directriz 1.

ACTUACIONES INCLUIDAS	BALSA REGULACIÓN	DEPÓSITOS	ESTACIÓN TRATAMIENTO	ESTACIÓN BOMBEO	PLANTA FOTOVOLTAICA	RED DISTRIBUCIÓN PARA RIEGO	CONDUCCIONES PRIMARIAS	LÍNEA ELÉCTRICA	EDIFICIOS SERVICIO	MUROS CONTENCIÓN
TIPOLOGÍA PROYECTOS										
RHNC						X				
ENERGÍAS RENOVABLES										
EFICIENCIA ENERGÉTICA E HÍDRICA						X				
NUEVAS TECNOLOGÍAS Y TELECONTROL										
MODERNIZACIÓN TRADICIONAL	X	X	X	X	X	X		X	X	X

RHNC: Recursos hídricos no convencionales.

X: Muy recomendable

7. Recursos

En este apartado se detallan las referencias bibliográficas empleadas para la redacción de la directriz.

Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). (2021). Water resources across Europe – confronting water stress: an updated assessment. EEA Report No 12/2021. European Environment Agency (EEA). Copenhagen, Dinamarca, 132 páginas. Disponible: <http://eea.europea.eu>

Andress, J. (2014). The basics of information security: Understanding the fundamentals of InfoSec in theory and practice. *Syngress*, 240. ISBN 9780128008126.

Aqeel-ur-rehman, A., Zafar, A., Islam, N., & Zubair Ahmed, S. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standard & Interfaces*, 36, 263–270. doi:10.1016/j.csi.2011.03.004

Campbell, J.J. (1990). Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 332–341. doi:10.2136/sssaj1990.03615995005400020006x

Chanzy, A., Gaudu, J.C., & Marloie, O. (2012). Correcting the temperature influence on soil capacitance sensors using diurnal temperature and water content cycles. *Sensors*, 12, 9773–9790. doi:10.3390/s120709773

Charlesworth, P. (2005). *Soil water monitoring* (Irrigation Insights no. 1, 2nd ed., pp. 96). Australia: CSIRO Land and Water.

CE (2021). ANEXOS de la Comunicación de la Comisión Guía técnica sobre la aplicación del principio de «no causar un perjuicio significativo» en virtud del Reglamento relativo al Mecanismo de Recuperación y Resiliencia. Comisión Europea (CE). Bruselas, 12.2.2021 (2021) 1054 final ANNEXES 1 to 4. <https://ec.europa.eu/>

Coelho, E.F., & Or, D. (1996). A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1039–1049. doi:10.2136/sssaj1996.03615995006000040012x

Dechmi, F., Playán, E., Caverro, J. & Martínez-Cob A. 2003. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). *Irrig Sci* 22, 67–77. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0071-9>

Evelt, S.R., Laurent, J.P., Cepuder, P., & Hignett, C. (2002, August 14–21). Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents. In *Proceedings of 17th World Congress of Soil Science* (pp. 1021–1031). Bangkok, Thailand.

- Evett, S.R., Tolk, J.A., & Howell, T.A. (2005). TDR laboratory calibration in travel time, bulk electrical conductivity, and effective frequency. *Vadose Zone Journal*, 4, 1020–1029. doi:[10.2136/vzj2006.0062](https://doi.org/10.2136/vzj2006.0062)
- Fereres, E., & Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58, 147-159; doi: [10.1093/jxb/erl165](https://doi.org/10.1093/jxb/erl165)
- Fernández, A. (2018). Comparación entre dos tipos de sensores de humedad del suelo para la programación del riego. Aplicación en un cultivo de Caquí “Rojo Brillante” en la comarca de la Ribera Baja de la Comunidad Valenciana. Trabajo Fin de Master en Ingeniería Agronómica. Tutores: Pablo González Altozano y Juan Manzano Juárez. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.
- Ferre, T.P.A., & Topp, G.C. (2002). Time domain reflectometry. In: J.H. Dane & G.C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods* (pp. 434–446). Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc.
- Grau de Lacruz, L. (2018). Manejo eficiente del riego mediante monitorización con sondas de humedad y herramientas de teledetección. Trabajo Fin de Máster. Director: Pablo Martín Ramos. Codirector: Jesús Ollés Grúas. Universidad de Zaragoza. Escuela Politécnica Superior.
- Jones, S.B., Blonquist, J.M., Jr., Robinson, D.A., Rasmussen, V.P., & Or, D. (2005). Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 1 methodology. *Vadose Zone Journal*, 4, 1048–1058. doi:[10.2136/vzj2004.0140](https://doi.org/10.2136/vzj2004.0140)
- Kargas, G., Kerkides, P., & Seyfried, M.S. (2014). Response of three soil water sensors to variable solution electrical conductivity in different soils. *Vadose Zone Journal*, 13, 1–13. doi:[10.2136/vzj2013.09.0169](https://doi.org/10.2136/vzj2013.09.0169)
- Kelleners, T.J., Soppe, R.W.O., Robison, D.A., Schaap, J.E., Ayars, J.E., & Skaggs, T.H. (2004). Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 430–439. doi:[10.2136/sssaj2004.0430](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0430)
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5, 1–7. doi:[10.1016/j.icte.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005)
- Navarro-Hellín, H., Torres-Sánchez, R., Soto-Valles, F., Albaladejo-Pérez, C., Lopez-Riquelme, J.A., & Domingo-Miguel, R. (2015). A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. *Agricultural Water Management*, 151, 64–74. doi:[10.1016/j.agwat.2014.10.022](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.022)
- Paltineanu, I.C., & Starr, J.L. (1997). Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1576–1585. doi:[10.2136/sssaj1997.03615995006100060006x](https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100060006x)

- Ritter, J. (2016). How to find the best soil water content sensor for your application? Retrieved May 8, 2020, from <https://www.campbellsci.com/blog/find-best-soil-watercontent-sensor>
- Sample, D.J., Owen, J.S., Fields, J.S., & Barlow, S. (2016). Understanding soil moisture sensors: A fact sheet for irrigation professionals in Virginia. *Biological Systems Engineering*, 7, 3–8. doi:10.13140/RG.2.2.33633.51048
- Saxton KE. & Rawls W.J. (2006). Estimaciones características del agua del suelo por textura y materia orgánica para soluciones hidrológicas. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>. Seyfried, M.S., & Grant, L.E. (2007). Temperature effects on soil dielectric properties measured at 50 MHz. *Vadose Zone Journal*, 6, 759–765. doi:10.2136/vzj2006.0188
- Seyfried, M.S., & Murdock, M.D. (2004). Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 394–403. doi:10.2136/sssaj2004.3940
- Vera, J., Abrisqueta, I., Conejero, W., & Ruiz-Sanchez, M.C. (2017). Precise sustainable irrigation: A review of soil-plant-atmosphere monitoring. *Acta Horticulturae*, 1150, 195–200. doi:10.17660/ActaHortic.2017.1150.28
- Wraith, J.M., & Or, D. (1999). Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resources*, 35, 361–369. doi:10.1029/1998wr900006

Páginas Web

www.acclima.com
www.adcon.com
www.agriculture-xprt.com
www.alphaomega-electronics.com
www.aquacheck.com
www.aquaflex.com
www.campbellsci.com
www.delta-t.co.uk
www.eccos.com
www.enviropsoilprobes.com
www.gropoint.com
<https://suelos.itacyl.es>
www.iagua.es
www.libelium.com
www.metergroup.com
www.sentektechnologies.com
www.stevenswater.com
www.onfarmdata.com
www.vegetronix.com
www.widhoc.com

ANEXO I- TELECONTROL DE LA RED DE HIDRANTES

UNE-EN 15099-1:2007 ERRATUM:2008 Técnicas de riego. Telecontrol de zonas regables.

Interoperabilidad

La implementación de la interfaz interoperable para los sistemas de telecontrol se encuentra especificada en el proyecto de la norma UNE 318002-3 «Técnicas de riego. Telecontrol de zonas regables. Parte 3: Interoperabilidad» que está siendo elaborada por el grupo de trabajo GT3-Telecontrol del comité técnico de normalización CTN 318-Riegos de la Asociación Española de Normalización (UNE). Esta implementación estará ajustada a las especificaciones del proyecto de la norma UNE 318002-3 contenidas en su Anexo B «Interfaz de subsistemas con SOAP 1.2», si se realiza con protocolo SOAP 1.2, o a las contenidas en su Anexo G «Interfaz de subsistemas con REST», si se realiza con protocolo REST.

Este estándar establece las directrices para la interoperabilidad entre los sistemas desarrollados para la gestión y/o control de las instalaciones de riego. La norma puede ser aplicada bajo cualquier plataforma tecnológica y en cualquier tipo de sistema de riego, independientemente del esquema de gestión del agua (público o privado, individual o colectivo).

Este estándar no define los requisitos de hardware o software para ninguno de los sistemas a los que se aplica. Solo se refiere a interfaces de acceso, sin restricciones sobre las implementaciones subyacentes. El estándar ha sido diseñado para evitar interferencias con soluciones propietarias sujetas a propiedad intelectual. Para garantizar la interoperabilidad basada en estas premisas, el estándar define tres interfaces de comunicación (Interfaz de Gestión, Interfaz de Eventos e Interfaz con Subsistemas) y la arquitectura sobre la que aplican estas interfaces. Se requieren tres niveles de arquitectura para acomodar las interfaces:

- El nivel de gestión, donde se ubicará cualquier MIS que cumpla con la norma. De todos los métodos disponibles, cada MIS solo implementará aquellos que sean necesarios para ejecutar sus funcionalidades.
- El nivel de control superior: coordinación. Este elemento de software (el bróker de coordinación) actúa como enlace entre las aplicaciones MIS y los subsistemas de control. Todos los métodos deben estar a disposición del Bróker de Coordinación para garantizar la correcta ejecución de sus tareas.
- El nivel de control inferior: RMCS. Estos también pueden denominarse subsistemas de riego. Son soluciones comerciales completas (hardware y software) diseñadas para controlar ciertas entidades de riego. Cada subsistema debe implementar los métodos necesarios para realizar las tareas de la entidad o entidades de riego que controla.

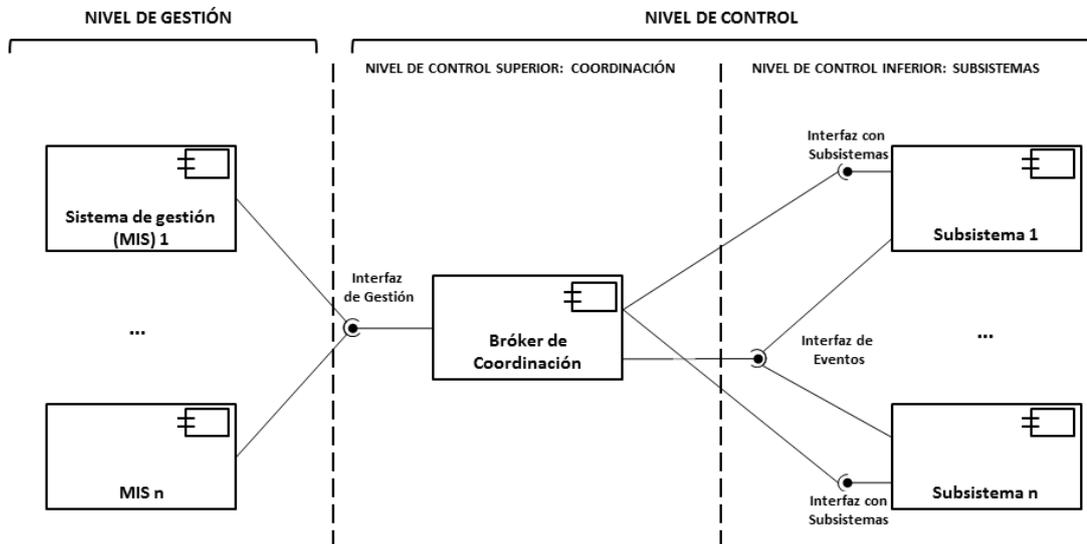
La interacción entre el lenguaje establecido y los cambios propuestos por el estándar para la arquitectura, proporciona interoperabilidad entre aplicaciones de gestión (MIS por sus siglas en inglés) y los sistemas de monitorización y control (RMCS), garantizando su independencia y el intercambio de información estandarizada.

Tanto la aplicación de control SCADA como la aplicación de gestión estarán implementadas para cumplir la norma de interoperabilidad UNE 318002-3 «Técnicas de riego. Telecontrol de zonas regables. Parte 3: Interoperabilidad».

La aplicación de control SCADA estará siempre aguas abajo del bróker de coordinación (en adelante, coordinador) y quedará implementada para comunicar con él, sea este coordinador instalado en la obra o no.

Sin embargo, la aplicación de gestión podrá implementarse bien aguas abajo del coordinador (en caso de no instalarse un coordinador) o bien aguas arriba del mismo (en caso de que sí se instale un coordinador), pero siempre implementada para comunicar con el coordinador según la norma descrita anteriormente.

Los niveles y componentes de una arquitectura interoperable quedan definidos en el siguiente esquema:



Si no se ha tenido acceso previamente a los documentos del borrador, pueden obtenerse mediante la inscripción como expertos en el CTN318-Riegos de UNE y solicitar la última versión de los documentos de la parte 3 del borrador del estándar ISO 21622 y del borrador de la norma UNE 318002-3.

ANEXO II- ALTERNATIVA A LOS SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN

1. Implementación:

La implementación de esta metodología descansa en tres pilares:

- Formación de las comunidades de regantes;
- Elaboración de mapas temáticos de los suelos de las comunidades de regantes; y
- Desarrollo y aplicación de programas informáticos para la asesoría sobre el riego.

Formar al personal de las comunidades de regantes para que divulguen el uso del cálculo de las necesidades de riego de acuerdo con la evapotranspiración de los cultivos para optimizar el riego por aspersión, destacando aspectos como:

1. Relacionar los elementos del balance de agua: lluvia, evapotranspiración del cultivo, drenaje.
2. La importancia de la variabilidad del suelo (capacidad de reserva de agua) a la hora de diseñar el riego en parcela una vez construida la red de riego colectiva.
3. Las pérdidas por evaporación y arrastre y la uniformidad del riego.
4. La adecuación de la frecuencia de riego a la capacidad de retención del agua en el suelo.
5. La necesidad de la fracción de lavado, sobre todo cuando se utilizan aguas de baja calidad o cuando el suelo es salino.
6. La planificación de la humedad del suelo durante y al final del cultivo.
7. Manejo de las herramientas informáticas ya disponibles en las diferentes páginas web de las distintas CCAA (“Oficinas del regante” o similares) para el cálculo de las necesidades hídricas diarias/semanales de los cultivos.
8. Uso de plataformas “avanzadas” (como la aplicación SIAR o AGROGESTOR), que ya están siendo promocionadas tanto a nivel Estatal como en varias Comunidades Autónomas para el cálculo de las necesidades de riego, su registro y almacenamiento en un base de datos de operaciones de cultivo.

Para poder implementar esta metodología, allí donde no estén disponibles, será necesario **elaborar mapas temáticos de suelos** de la zona regable. A continuación, se detallan las necesidades específicas de los mapas requeridos:

1. Capacidad de retención de agua disponible, CRAD, a escala 1:25.000 de forma general. Las determinaciones se realizarán hasta la profundidad del suelo o hasta un máximo de 1,0 m. Este valor se utilizará para: 1) Diseñar un sistema de riego adaptado al suelo, minimizando la mezcla de tipos de suelo diferentes en un sector de riego; y 2) establecer la dosis máxima de riego a aplicar por parcela y evento de riego, que siempre será significativamente inferior a la CRAD (menos del 60%) para evitar pérdidas por percolación, salvo que se parta de un suelo muy seco.
2. Salinidad (conductividad eléctrica aparente del suelo) a escala 1:25.000, allí donde este sea un aspecto limitante para la gestión del agua y los fertilizantes.

La integración de la información sobre meteorología, suelo y cultivo necesitará de la **aplicación de sistemas informáticos** intuitivos y adaptables tanto para uso de las comunidades de regantes como de los agricultores individuales. Estos sistemas pueden ser usados a tiempo real o al final de la temporada de riegos. En la actualidad hay muchas tecnologías que se pueden aplicar a la mejora del uso del agua y la energía, tanto a nivel individual como colectivo. Por ello, a pesar de que ya hay sistemas disponibles para la digitalización del agua de riego, hay mucho margen de mejora en estos sistemas. La mejora está tanto en la tecnología aplicada como en la usabilidad de estos sistemas por parte de los técnicos de las comunidades de regantes y los propios regantes.

2. Conceptos generales a aplicar:

A continuación, se resumen algunos de los principios que se aplican en esta metodología:

La **evapotranspiración de los cultivos** (ETc). El concepto de evapotranspiración engloba a las pérdidas de agua de una superficie con cubierta vegetal que se producen bien por la evaporación directa de agua desde la superficie del suelo o desde la superficie de hojas por la transpiración de las plantas. Normalmente, estos dos procesos se engloban en un único proceso, la evapotranspiración, debido a que ocurren simultáneamente y a la gran dificultad de su medida

y cuantificación por separado. Una práctica común en ingeniería de riegos es expresar la tasa de evapotranspiración en unidades de altura de agua evapotranspirada (generalmente, mm) por unidad de tiempo (hora, día, semana, mes). Una altura de agua de 1 mm equivale a 1 l m^{-2} . También es común expresar la tasa de evapotranspiración como volumen de agua (generalmente, m^3) evapotranspirada por unidad de superficie (generalmente, ha). Así, 1 l m^{-2} equivale a $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

La evapotranspiración también puede expresarse en términos de energía utilizada en el proceso de evapotranspiración por unidad de superficie y unidad de tiempo. En este caso se habla de flujo de calor latente y las unidades más comunes son $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ o bien W m^{-2} . Téngase en cuenta que $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$ por lo que $1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1} = 11,57 \text{ W m}^{-2}$.

La relación entre la evapotranspiración expresada en términos de altura de agua (ET) y el flujo de calor latente (LE) se expresa a través de la Ecuación 1.

$$ET = \frac{LE}{\lambda} \quad (1)$$

donde λ es el calor latente de vaporización, la energía necesaria para evaporar una cantidad de agua libre. Este factor depende de la temperatura. A $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$. Es decir, para evaporar 1 kg de agua ($1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$) se necesitan 2.45 MJ. Por tanto, una tasa de evapotranspiración de 1 mm día^{-1} equivale a un flujo de calor latente de $2.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (a $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Estos datos están disponibles en las webs de los servicios de asesoramiento al regante u oficinas del regante autonómicos y en web del MAPA (www.mapama.siar).

La **Capacidad de Retención de Agua Disponible del Suelo, CRAD**, es una propiedad física del suelo que determina la cantidad de agua que un suelo es capaz de retener con una energía tal que impide su percolación pero que permite su absorción por las plantas. Es un factor clave en la gestión del riego ya que limita la cantidad de agua máxima a aplicar en cada evento de riego. La CRAD depende de varios factores, entre ellos, la profundidad del suelo y de las raíces del cultivo, la pedregosidad, la textura y el contenido en materia orgánica, son los más importantes. La capacidad de campo y el punto de marchitez determinan los límites máximo y mínimo de la humedad del suelo para el cálculo de la CRAD. La cantidad de agua comprendida

entre estos dos valores que puede ser aprovechada por el cultivo se define como CRAD. En el apartado 5.1 de la directriz 1, se puede encontrar más información sobre esta variable. Hay muchos trabajos científicos y técnicos que establecen relaciones entre la textura del suelo y la CRAD, como los aportados por MacDole y col. (1974); Israelsen y Hansen (1979); Evans (1980); Ratliff y col (1983); Keller (1986); y Saxton y Rawls (2006). Estas relaciones simplifican la variabilidad de los suelos existentes, y sirven como valores orientativos. Sin embargo, si se quiere utilizar esta variable para programar el riego es necesario realizar mapas de suelo de la CRAD en la zona.

En la aplicación de un riego por aspersión se producen las **pérdidas por evaporación y arrastre, PEA**. Las PEA cuantifican el agua que sale de los emisores de riego y no llega al suelo, bien porque se ha evaporado o porque ha sido arrastrada a otro punto de la parcela. Estos dos procesos se contabilizan de forma conjunta por la dificultad experimental de medirlos de forma separada. Las pérdidas por evaporación se corresponden con las gotas que se evaporan en su trayectoria aérea desde el emisor hasta el suelo o hasta la cubierta vegetal, así como las gotas que se depositan sobre la cubierta vegetal y se evaporan. En cuanto a las pérdidas por arrastre, se corresponden con el volumen de agua que cae fuera de la zona de riego que le corresponde. Hay muchos trabajos en la literatura científico técnica que relacionan estas pérdidas con las variables meteorológicas durante el riego y con aspectos técnicos del sistema (presión de trabajo, tipo de emisor, tamaño de las gotas, etc). De forma general, el viento es la variable meteorológica que más peso tiene en las PEA. La temperatura del aire y la humedad relativa también participan de las PEA pero en menor medida que el viento. La Figura 1 muestra las diferencias en las PEA entre sistemas de riego por aspersión en cobertura total y las máquinas de riego (básicamente por las características técnicas de los sistemas), así como las diferencias entre regar de día y de noche (diferentes condiciones meteorológicas). Encontramos en la literatura ecuaciones que nos ayudan a estimar las PEA (Ecuaciones 1 y 2, para cobertura total de aspersión y máquinas de riego, respectivamente (Playán y col., 2005).

$$PEA = 26.1 + 1.64 * Viento - 0.274 * Humedad Relativa \quad [1]$$

$$PEA = -2.1 + 1.91 * viento + 0.231 * Temperatura \quad [2]$$

Las unidades son: PEA en % respecto al volumen total aplicado con el riego, Viento en $m\ s^{-1}$, Humedad relativa en % y Temperatura en $^{\circ}C$.

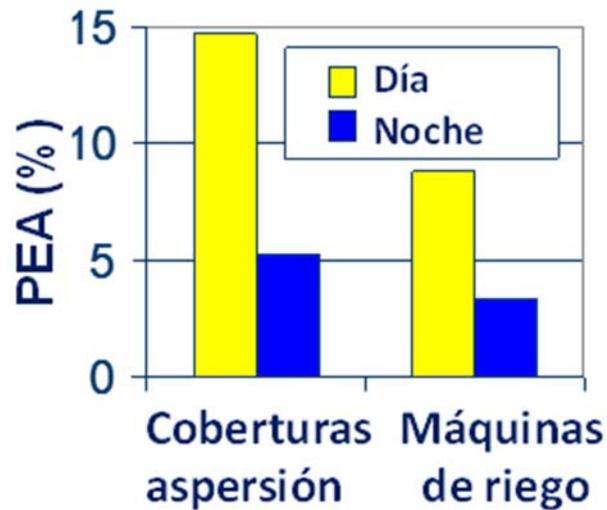


Figura 1. Pérdidas por evaporación y arrastre en diferentes sistemas de riego por aspersión (cobertura total y máquinas de riego por aspersión) y momento del día (día y noche). Extraído de Playán y col (2005).

La **uniformidad del riego, CU**, hace referencia a las diferencias de agua aplicada en los diferentes puntos del suelo. Esta heterogeneidad se ve afectada por variables técnicas y meteorológicas. Entre las variables técnicas, las que más afectan a la uniformidad son el marco de aspersión (distancia entre aspersores) y la presión de trabajo y su variabilidad. La variable meteorológica que mayor efecto tiene sobre la uniformidad del riego es la velocidad del viento. Un correcto diseño proporciona una elevada uniformidad potencial de riego, que se alcanzará sólo si se realiza un manejo adecuado. En zonas ventosas donde la frecuencia de vientos fuertes es elevada, hay que considerar en el diseño del sistema colectivo y parcelario que el tiempo disponible para riego es inferior al de una zona no ventosa. En estas zonas el tiempo disponible para riego será el tiempo libre de vientos fuertes (Martinez-Cob y col., 2010). De esta forma, nuestro diseño estará preparado para alcanzar los estándares de calidad requeridos.

La Figura 2 muestra la uniformidad del reparto de agua de una instalación estándar de riego por aspersión en cobertura total para cultivos extensivos, que resulta en uniformidades por encima del 90%, en el caso de riego sin viento y por debajo del 70%, para el riego en condiciones ventosas.

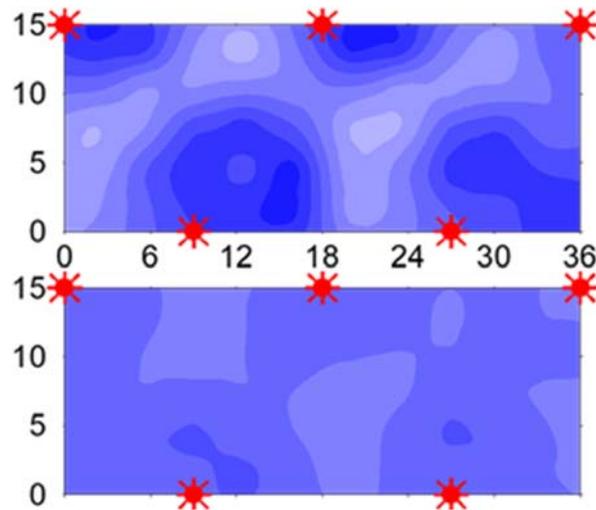


Figura 2. Distribución de agua en dos coberturas de aspersión con un espaciado entre aspersores y líneas de aspersión de 18 m x 15 m, con viento (arriba) y sin viento (abajo). Fuente: Dechmi et al. (2003).

El **balance de agua en el suelo** para determinar el momento y dosis de riego. Como punto de partida se requiere conocer la capacidad de retención de agua de nuestro suelo y la humedad inicial al comienzo del ciclo de cultivo. Estos datos nos proporcionarán el agua útil al inicio que se irá actualizando con las salidas (ETc) y entradas (riego efectivo resultante de restar al riego aplicado las pérdidas) de agua al sistema. Aunque los cultivos son capaces, en general, de extraer agua hasta el punto de marchitamiento, es necesario establecer un nivel máximo de agotamiento del agua del suelo por parte de los cultivos para establecer el agua útil al inicio del cultivo y los momentos de riego. El nivel de agotamiento depende de las especies y el tipo de suelo, pero se puede considerar un nivel de agotamiento del 50% de la CRAD para la mayor parte de los cultivos extensivos.

3. Programa de divulgación y formación:

Tal como se ha comentado anteriormente, esta alternativa tiene un componente de formación muy importante, ya que no puede llevarse a cabo sin unos cursos específicos orientados a explotar de forma adecuada la información disponible y la que se ha generado en la realización de los proyectos de riego.

Esta formación está orientada a conocer qué tipo de información es necesaria para realizar una correcta programación del riego y cómo se debe aplicarla para que se adapte a las condiciones específicas de una parcela determinada.

4. Recursos

La Red SIAR del MAPAMA: <https://eportal.mapa.gob.es//websiar/Inicio.aspx>

La red SIAR en Castilla la Mancha: <http://crea.uclm.es/siar/datmeteo/>

La red SIAR en Aragón: <https://aplicaciones.aragon.es/oresa/>

La red SIAR en Valencia: <http://riegos.ivia.es/red-siar>

La Red SIAR en La Rioja: <https://www.larioja.org/agricultura/es/informacion-agroclimatica/red-estaciones-agroclimaticas-siar>

La red SIAR en Navarra: <https://www.intiasa.es/es/comunidad-de-regantes/areas-de-interes/servicio-asesoramiento-al-regante/climatologia.html>

SIAR en Canarias: <https://www.meteotec.es/red-siar/>

SIAR

en

Andalucía:

https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/inicio_estaciones

SIAR en Castilla y León: <https://www.itacyl.es/agro-y-geo-tecnologia/agrometeorologia-y-suelos/datos-meteorologicos>

SIAR en Murcia: <http://siam.imida.es/apex/f?p=101:1:2191949225161000>

SIAR en Extremadura: <http://redarexplus.gobex.es/RedarexPlus/>

Estas Directrices científico-técnicas son resultado de un acuerdo de encomienda del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a la Agencia Estatal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el marco del Plan para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en regadío (C3I1 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Su objetivo es facilitar, a los redactores y ejecutores de los proyectos incluidos en el Plan, instrucciones para la implantación de medidas ambientales que contribuyan a cumplir el principio de “no causar un daño significativo” (DNSH en sus siglas en inglés) a los objetivos medioambientales establecido en el Reglamento de Taxonomía (Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2020 relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles).

Su aplicación en los proyectos se hará siempre que las características técnicas y constructivas de los mismos lo hagan viable y adaptándolas a cada caso. Por tanto, no constituyen ni una metodología obligatoria ni un pronunciamiento oficial del Departamento sobre las materias que comprende.

Coordinación:

Emilio Nicolás Nicolás y Cristina Romero Trigueros- Departamento Riego CEBAS-CSIC

Autores:

Departamento Riego CEBAS-CSIC: Emilio Nicolás Nicolás, Cristina Romero Trigueros

Departamento Suelo y Agua, Grupo RAMA. EEAD-CSIC: Nery Zapata Ruíz, José Manuel Miras Ávalos

Aviso legal: Los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados citando la fuente, y la fecha, en su caso, de la última actualización.

Cita recomendada: MAPA-CSIC 2022. Directrices científico-técnicas para la aplicación del principio de “no causar un daño significativo al medio ambiente” en el Plan para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en regadíos (C3I1 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia): Monitorización por sensores del contenido de humedad del suelo.