

**DIRECTRICES CIENTÍFICO-TÉCNICAS PARA
ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS DE
MONITORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA EL
CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL
AGUA Y DE LOS RETORNOS DE RIEGO.**

ÍNDICE

1. Resumen ejecutivo	1
2. Introducción	3
3. Características de una red de control de calidad de agua y retornos de riego. 8	
4. Catálogo de mediciones	10
4.1 Determinar las entradas	12
4.1.1 Agua de riego: origen superficial, subterráneo y no convencional .. 13	
4.1.1.1 Agua de riego de origen superficial	13
4.1.1.2 Agua de riego de origen subterráneo	14
4.1.1.3 Agua de riego de fuentes no convencionales	15
4.1.2 Agua de lluvia	19
4.1.3 Aguas procedentes de zonas externas a la zona de control	19
4.2 Determinar las salidas	20
4.2.1. Control de los retornos de riego que vierten a cauces superficiales	
.....	21
4.2.1.1 Localización de las estaciones de control de retornos en cuencas	
superficiales	21
4.2.1.2 Medidas de caudal en los cauces de drenaje	23
4.2.1.3 Medidas de calidad del agua en las estaciones de control	
superficiales	24
4.2.1.4 Diseño estadístico: frecuencia de muestreo	26
4.2.1.5 Interpretación de los resultados	27
4.2.2. Control de los retornos de riego que vierten a acuíferos subterráneos	
.....	33
4.2.2.1 Localización de los puntos de control de sistemas de drenaje	
subterráneo	37
4.2.2.2 Medidas de altura de agua	43
4.2.2.3 <i>Parámetros que determinan la calidad del agua en los pozos</i> . 44	
4.2.2.4 Diseño estadístico, frecuencia de muestreo	45
4.2.2.5 <i>Interpretación de los resultados</i>	47
5. Sensores disponibles en el mercado para realizar las medidas	48



5.1 Sensores para medida de flujo de agua (caudal o volumen)	48
5.1.1. Sensores de medida de flujos de agua en cauces abiertos	48
5.1.2. Sensores de medida de los flujos de agua en canalizaciones cerradas no presurizadas.....	58
5.1.3. Sensores de medida de los flujos de agua en conducciones cerradas presurizadas.....	58
5.1.4. Sensores de medida de los flujos en medio difuso o flujos subterráneos.....	59
5.2 Sensores para determinar la calidad del agua	61
5.2.1. Sensores para determinar la calidad del agua en flujos superficiales (abiertos, cerrados y presurizados)	61
5.2.5. Determinación de calidad del agua en acuíferos que reciben retornos de riego.....	68
6. Destinatarios de cada una de las partes de la encomienda.....	70
7. Arquitectura de medidas por actuaciones de los proyectos.	72
8. Recursos	74

1. Resumen ejecutivo

Esta directriz describe los procedimientos para establecer una red de control de calidad de las aguas de riego y sus retornos. Estas redes contribuyen al cumplimiento de las Directivas vigentes, Comunitarias y Nacionales, sobre protección de aguas, y, específicamente, a dos de los objetivos del principio de no hacer demasiado daño al medio ambiente (DNSH, “Do Not Significant Harm”): 1) el **uso sostenible y la protección de los recursos hídricos** (continentales y marinos) y 2) el de la **prevención y control de la contaminación**, reduciendo la emisión de contaminantes a las aguas y los suelos.

Las fuentes de agua no convencionales como las aguas regeneradas (AR) o desalinizadas constituyen una alternativa muy importante para el sector agrícola de regadío, sobre todo en las cuencas en las que el déficit hídrico estructural es importante. La reutilización de estas aguas disminuye la presión sobre los recursos hídricos convencionales (superficiales y subterráneos) y reduce el impacto medioambiental de su vertido. Sin embargo, las AR deben utilizarse para riego bajo condiciones controladas que minimicen los riesgos de contaminación (patógenos o sustancias tóxicas) de productos agrícolas, suelos y aguas subterráneas. El agua residual urbana contiene, generalmente, altas concentraciones de sólidos disueltos (cloro, sodio, boro, metales pesados) y en suspensión, que pueden dificultar las condiciones de uso, aumentando los riesgos de avería en el funcionamiento de los sistemas de distribución, gestión y aplicación del agua, especialmente cuando éstos se encuentran altamente automatizados. Por otro lado, el contenido en macronutrientes de estas aguas (N, P y K) puede ser importante y su consideración a la hora de diseñar el programa de fertilización debe de ser obligatorio. Por todo ello, es muy importante controlar la calidad del agua de riego, sobre todo cuando procede de fuentes no convencionales.

La actividad agrícola aporta grandes beneficios a la sociedad, pero también puede contribuir a la degradación de la calidad del agua superficial y subterránea y de los suelos (salinización y sodificación). Tanto el beneficio como el impacto es mayor en la agricultura de regadío, por la utilización más intensiva de los insumos de producción (agua, fertilizantes y plaguicidas). Los flujos de retorno de riego (FRR) representan el mayor contribuyente a la contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas en las zonas agrícolas de regadío. Los FRR tienen, de forma generalizada, una calidad inferior a la de las aguas de riego y su incorporación a cauces superficiales o subterráneos deteriora el estado químico y/o biológico de las aguas receptoras. El incremento en las concentraciones de sales disueltas, nitrógeno y

fósforo (principalmente) y otros agroquímicos como los plaguicidas se incrementa cuando las aplicaciones de fertilizantes (orgánicos y minerales) y de productos fitosanitarios son excesivas y cuando el riego no es eficiente.

El balance de agua, sales y macronutrientes mediante la medida de las entradas y salidas al sistema regable es un método efectivo para caracterizar el impacto de la actividad sobre el medio. Estas medidas se realizan a través de una red de control de calidad del agua de riego y de los FRR. La puesta en marcha de una red requiere: la localización estratégica de los puntos de control (área de drenaje acotada), el diseño de las infraestructuras de medida (cantidad y calidad, agua de entrada y de salida del sistema, sensores tipo), un programa de muestreo y la interpretación de los resultados. Para un diseño adecuado de la red de control de calidad es necesario disponer de mapas de suelos temáticos referentes a sus propiedades físicas e hidráulicas.

La localización y establecimiento de los puntos de control y la definición de su área de influencia son críticos para el éxito de una red de control. En el caso de sistemas que drenan a cauces superficiales es necesario delimitar el drenaje de cada subcuenca mediante análisis de mapas digitales del terreno, cartografía de la zona y comprobaciones sobre el terreno. Cuando los sistemas drenan a cauces subterráneos es necesario diferenciar los puntos de control piezométrico de los de control de calidad. La localización, características constructivas y número de puntos de control está determinado por la tipología del acuífero, la amplitud y vulnerabilidad de la zona de estudio y los parámetros a medir. De forma general, son necesarios como mínimo dos puntos de control piezométrico y otros dos de calidad (uno en la zona de entrada o carga y otro en la zona de salida o descarga), que se complementarán en función de los elementos enumerados anteriormente.

Las infraestructuras de la red son diferentes si la cuenca es superficial (secciones de control en cauces) o subterránea (pozos). El tipo de sensores es parecido, con las particularidades necesarias para muestrear en superficie o en profundidad.

La frecuencia de muestreo y el número de muestras a tomar depende de la variabilidad de los parámetros medidos (su varianza y su variabilidad a lo largo del tiempo) y de la precisión que se quiera alcanzar. En cualquier caso, la frecuencia debe incrementarse en los periodos de mayor interés, normalmente la estación de riego. En el caso de aguas subterráneas, la frecuencia de muestreo es inferior porque su varianza y variabilidad temporal es menor que en el caso de

las estaciones superficiales. El programa de muestreo se irá adaptando a las necesidades, resultado del análisis del primer año de puesta en marcha de la red.

El objetivo de la red de control es mantener la calidad de los inputs más importantes de la actividad agrícola de regadío, el agua y el suelo. Así, se persigue que la calidad del agua de riego tenga unos estándares mínimos; el balance de sales en el suelo se aproxime a cero, que los volúmenes de los retornos de riego no sobrepasen de forma excesiva las necesidades de lavado y que las masas de sales y nutrientes exportados se mantengan en límites adecuados, y no comprometan la calidad de las masas de agua receptoras. Se analizará la evolución temporal de los diferentes índices para determinar las necesidades de actuación. La mejor estrategia para conseguir reducir el impacto ambiental de la actividad del riego es la formación en prácticas eficientes de riego y de fertilización. Un buen plan de formación continua de las diferentes prácticas (riego, fertilización y tratamientos fitosanitarios) en los diferentes sistemas de riego y cultivos es tan importante como el establecimiento de una red de control de calidad.

2. Introducción

Las cuencas hidrográficas con un marcado déficit hídrico estructural (p.e. Cuenca del Segura) sufren mayores restricciones de uso de agua en la actividad agrícola. La capacidad para responder a las presiones crecientes sobre los recursos hídricos ha mejorado mediante la utilización de fuentes de agua no convencionales, como son las aguas desalinizadas y/o la reutilización de las aguas depuradas, de aquí en adelante aguas regeneradas (AR). Esta reutilización disminuye la extracción de las masas de agua superficiales y subterráneas y reduce el impacto de los vertidos de aguas depuradas en las masas de agua. Estas fuentes constituyen una alternativa estable para el sector agrario ya que son bastante independientes de la sequía estacional y de la variabilidad meteorológica. Además, las mejoras tecnológicas en el ámbito de la depuración y la creciente implantación de EDARs está continuamente incrementando la oferta de las AR en España. Por otro lado, estas aguas contienen, entre otros componentes, cantidades importantes de nutrientes (N, P, K) que deben considerarse al elaborar los programas de fertilización de los cultivos y así promover la economía circular. Para ello, el usuario final debe de conocer el contenido en nutrientes del agua regenerada que utiliza como agua de riego.

No obstante, el riego con AR debe realizarse bajo condiciones controladas que minimicen los riesgos de contaminación (patógenos o sustancias tóxicas) de productos agrícolas, suelos y aguas subterráneas. El agua residual urbana contiene, generalmente, altas concentraciones de sólidos disueltos (cloro, sodio, boro, metales pesados) y en suspensión, que

pueden dificultar las condiciones de uso, aumentando los riesgos de avería en el funcionamiento de los sistemas de distribución, gestión y aplicación del agua, especialmente cuando éstos se encuentran altamente automatizados.

La actividad agrícola aporta grandes beneficios a la sociedad al suministrar alimentos, pero además puede contribuir a la degradación tanto de la calidad del agua superficial y subterránea, como de los suelos (salinización y sodificación). Esto ocurre particularmente en el regadío, por su utilización más intensiva de los insumos de producción (agua, fertilizantes y plaguicidas). Muchos trabajos han puesto de manifiesto que los flujos de retorno de riego (FRR) representan el mayor contribuyente a la contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas en las zonas agrícolas de regadío (Aragüés y Tanji, 2003¹). El mayor desafío al que se enfrentan los sistemas agrarios de regadío es la consecución de un balance apropiado entre la optimización de la producción agraria y la minimización de dichos impactos ambientales. Para ello, es necesario definir estrategias para el control de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en los ecosistemas de regadío.

Tabla 1. Cambios en los parámetros de calidad de los tres componentes principales de los flujos de retorno de riego esperables en relación con la calidad del agua de riego (adaptado de Aragüés y Tanji, 2003).

PARÁMETROS DE CALIDAD	COMPONENTES DE LOS FLUJOS DE RETORNO DEL RIEGO		
	Pérdidas operacionales	Escorrentía Superficial	Drenaje subsuperficial
Degradación general de la calidad	0	+	++
Salinidad	0	0, +	++
Nitrógeno	0	0, +, ++	+, ++
Fósforo	0, +	++	0, -, +
Demanda Biológica de Oxígeno	0	+, 0	0, -, --
Sedimentos	0, +, -	++	--
Residuos de Pesticidas	0	++	0, -, +
Elementos traza	0	0, +	0, -, +
Organismos Patógenos	0	0, +	-, --

0: Degradación de calidad despreciable; +: Degradación moderada de calidad; ++: Degradación alta de la calidad; -: Mejora moderada de la calidad; --: Mejora alta de la calidad;

¹ Aragüés, R. and Tanji, K.K. (2003): Water Quality of Irrigation Return Flows. In: Encyclopedia of water science. Stewart B.A., Howell T.A. (eds.). 502-506. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.

Los flujos de retorno de riego (FRR) están constituidos por la parte del agua de riego y de la precipitación natural que no es consumida por las plantas, evaporada o retenida en el suelo (escorrentía superficial y drenaje subsuperficial); así como por las pérdidas que se producen en el sistema de distribución del agua dentro de la zona de estudio (pérdidas operacionales). Así, los componentes principales de los FRR son tres: (1) las pérdidas operacionales de agua que se producen en los sistemas de distribución (canales y acequias), (2) la escorrentía superficial de las parcelas y (3) el drenaje subsuperficial. La Tabla 1 presenta la repercusión de los tres componentes de los FRR en el medio que los recibe. En esta Tabla de carácter conceptual, 0 significa que la degradación de calidad respecto a la del agua de riego es despreciable, + significa degradación de calidad y – significa mejora de calidad.

En general, las pérdidas operacionales descargan el agua directamente desde los canales o tuberías a la red de drenaje, por lo que su calidad es similar a la del agua de riego (degradación de calidad despreciable). La escorrentía superficial fluye sobre la superficie del suelo y descarga al final de la parcela directamente a la red de drenaje, por lo que su contacto con el suelo y agroquímicos es limitado y su contribución a la degradación de la calidad de la masa de agua receptora es generalmente moderada. Sin embargo, estas aguas pueden incrementar ligeramente la salinidad y pueden cargarse de sedimentos y nutrientes asociados (fósforo en particular), así como de agroquímicos aplicados a los cultivos (fitosanitarios y fertilizantes nitrogenados). Finalmente, las aguas de drenaje subsuperficial que se desplazan a través del suelo son, generalmente, las que más se degradan en calidad, ya que transportan los agroquímicos disueltos en la solución del suelo, así como sales u otros elementos solubles presentes en el suelo, materiales geológicos y aguas subterráneas interceptadas.

Aunque algunos parámetros pueden mejorar puntualmente, el resultado global es que los FRR tienen, de forma generalizada, una calidad inferior a la de las aguas de riego, sobre todo debido a los incrementos en las concentraciones de sales disueltas, nitrógeno y fósforo. Esta pérdida de nutrientes y otros agroquímicos como los plaguicidas, a pesar de que ocurre de manera natural en cualquier ecosistema, aumenta cuando las aplicaciones de fertilizantes (orgánicos y minerales) y de productos fitosanitarios son excesivas. La importancia de estas pérdidas depende principalmente de las condiciones del suelo, del manejo de los agroquímicos y de la magnitud de los FRR.

El nitrógeno es el principal macronutriente aplicado a los cultivos a través de los fertilizantes. Los principales problemas medioambientales asociados a la contaminación por nitrógeno en los ecosistemas acuáticos son: (1) acidificación de ríos y lagos con baja alcalinidad;

(2) eutrofización de las aguas dulces y marinas; y (3) toxicidad directa de los compuestos nitrogenados para los seres vivos (peces, humanos, etc.). La Directiva 91/676/CEE, el Real Decreto 261/96 y el Real Decreto 817/2015 sobre la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos de fuentes agrarias, indican que las aguas superficiales y subterráneas con una concentración de nitratos superior a 50 mg NO₃/L, así como los embalses y lagos eutróficos o con tendencia a eutrofizarse, se considerarán zonas vulnerables. En el Real Decreto 47/2022² se establecen nuevos límites para considerar las masas de agua vulnerables, 25 mgNO₃/L para las aguas superficiales y 37,5 mgNO₃/L para las aguas subterráneas.

El fósforo es un macronutriente esencial para las plantas habitualmente aplicado a los cultivos con los fertilizantes. Este elemento es el principal factor que controla la eutrofización de las aguas continentales. En las zonas con lluvias intensas la principal fuente de fósforo endógeno que afecta a la calidad del agua proviene del arrastre de los sedimentos superficiales, ya que el fósforo se adhiere a las partículas del suelo. En zonas de regadío en las que las lluvias no son importantes, el fósforo disuelto en los FRR es el causante de los problemas de eutrofización en las aguas receptoras, ya sean cauces superficiales o subterráneos. El Real Decreto 47/2022 relativo a la protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, clasifica el estado de las aguas en función de su contenido en fósforo total y establece un valor umbral de 0,035 mg P/L, por encima del cual el agua se clasifica como eutrofizada.

Otro factor que, junto con el fósforo, determina el estado de eutrofización de las aguas es el contenido en clorofila a. El RD47/2022 establece valores medios de 8 µg/L y máximos de 25 µg/L para este parámetro, por encima de los cuales el agua presenta problemas de eutrofización.

La conductividad eléctrica (CE) expresa la concentración total de sales solubles contenidas en las aguas. La clasificación de las aguas en función de la CE nos indica que un valor por encima de 2 dS/m introduce algunas limitaciones para su uso como agua de riego.

Los procesos de degradación de los suelos cultivados, salinización y sodificación, resultan del desbalance entre las entradas y salidas de sales en los mismos. Estos procesos están determinados por la concentración y composición iónica del agua de riego, las condiciones de

² MITERD 2022. RD47/2022 sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. BOE-A-2022-860.

drenaje interno y las características geológicas del suelo, la magnitud de la precipitación natural de la zona y el manejo del riego. El proceso de degradación del suelo debe analizarse conjuntamente con el del agua para obtener conclusiones coherentes que permitan minimizar los impactos de la actividad agrícola de regadío.

Los FRR se pueden medir o estimar a diferentes escalas: desde la parcela, pasando por la comunidad de regantes, hasta la cuenca.

Medir directamente el volumen de FRR dentro de un campo individual es muy complejo. Incluso en condiciones favorables, aparecen problemas. Por ejemplo, si un campo tiene un nivel freático alto y se han instalado líneas de drenaje, el sistema drenará los FRR de la parcela, pero también los flujos de aguas arriba, así como el flujo de entrada/salida lateral de los campos vecinos. Como consecuencia, la descarga de agua que sale por los drenajes puede ser mayor o menor que el FRR que corresponde a la parcela. La estima de estos flujos de agua puede realizarse mediante simulación, pero los datos necesarios para ello requieren un estudio muy detallado de cada parcela, sobrepasando el alcance práctico de esta directriz.

La medición del FRR en cuencas regables o grandes proyectos de regadío es a menudo más fácil que a nivel de explotación. Sin embargo, también pueden surgir problemas a esta escala que dificultan la diferenciación de FRR que vienen exclusivamente de una zona regada de los que provienen de otras fuentes. También la consideración de que los FRR pueden combinar su descarga a cauces superficiales y/o subterráneos dificulta su medición. La estimación de estos flujos a escala de cuenca regable a través de modelos de simulación también se ha abordado de forma satisfactoria. Sin embargo, su implementación requiere series largas de datos medidos en campo, que permitan calibrar la parte de los FRR que drena a cauces superficiales y la que drena a acuíferos subterráneos.

En cuanto a la calidad de los FRR resultado del lavado de nutrientes es un tema ampliamente estudiado a nivel mundial, con multitud de resultados a nivel agronómico y medioambiental. La realización de balances de masas mediante la medida o estima de las principales entradas y salidas de aguas y contaminantes en cuencas hidrológicas es un enfoque eficiente de diagnóstico y control de la calidad del agua que se ha utilizado en numerosos estudios y países.

En España, la elaboración de balances de agua, sales y nutrientes en cuencas agrícolas de regadío con superficies desde pequeñas (entre 100 y 1.200 ha), relativamente elevadas

(5.000 ha) a muy grandes (más de 50.000 ha) ha permitido cuantificar tanto la eficiencia del riego como la masa de contaminantes exportados, que es el parámetro que permite establecer el impacto sobre los sistemas receptores cuya calidad se desea preservar.

En la literatura hay numerosos trabajos orientados a la modelización del lavado de nutrientes en el suelo, que han dado lugar a un buen número de modelos de simulación que se pueden utilizar a escala de parcela, polígono de riego o cuenca hidrográfica. Este enfoque basado en la modelización necesita datos medidos en campo que permitan realizar la calibración y validación del modelo. Una vez completado el proceso, los modelos permiten simular y analizar diferentes escenarios (nuevas prácticas de manejo, cambio global, etc.) con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, sin perjudicar a los rendimientos de los cultivos, así como diseñar un programa de monitoreo optimizado.

La puesta en marcha de una red de control de la calidad y cantidad de los FRR permitirá establecer las condiciones actuales de la calidad de las aguas, analizar las tendencias a largo plazo, identificar los factores que más efecto tienen, así como disponer de los datos necesarios para calibrar y validar los modelos matemáticos que permitan simular los ecosistemas de regadío. Todo ello permitirá a su vez optimizar los programas de control y definir buenas prácticas agrarias que minimicen el impacto ambiental de la actividad agrícola en las aguas superficiales y subterráneas

3. Características de una red de control de calidad de agua y retornos de riego

Este apartado incorpora las características que debe reunir una red de control de calidad de agua de riego y de los FRR diseñada para verificar, especialmente, la afección que esos retornos producen sobre las masas de agua receptoras y contribuir a los objetivos de calidad derivados de la Directiva Marco del Agua (DMA) y del principio de no hacer demasiado daño al medio ambiente (DNSH, “Do Not Significant Harm”). Se aborda también el control de la calidad (y cantidad) de las entradas de riego (especialmente importante en el caso de aguas procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales, EDAR, empleadas para el riego).

La casuística posible de áreas regadas y problemáticas es muy variada y el documento intenta exponer de modo general cómo controlar los retornos de carácter superficial, los sub-superficiales y los subterráneos.

Así, la Figura 1 trata de esquematizar los diferentes pasos a realizar para definir y ejecutar las necesidades de una estación de control de calidad de los retornos de riego.



Figura 1. Pasos a seguir en la definición y ejecución de un plan de muestreo de las aguas de retorno de riego.

En primer lugar, el diseño de una estación de control, en un único punto, o de una red de ellos debe adaptarse a los objetivos perseguidos (Figura 1). Una vez definidos los objetivos, se debe establecer la zona de interés (en general una comunidad de regantes, CR, o una zona regable) y por último diseñar la estación de control, definiendo los parámetros a medir y el diseño estadístico del muestreo: frecuencia y tipo de muestreo. La etapa de diseño del muestreo es crítica, y muy posiblemente se verá modificada a raíz del análisis de los resultados a lo largo del tiempo. El control de los retornos debe ser una estrategia flexible, modificable según vaya aumentando el conocimiento del sistema.

Así, los objetivos generales más comunes de las redes de control son: (1) verificar la calidad del agua de riego y (2) controlar la cantidad y calidad de los retornos de riego para minimizar el impacto sobre las masas de agua receptoras.

El primer objetivo se puede complementar con el control del volumen de entradas de riego (y otras) al sistema para ofrecer una visión del uso del agua en el sistema. En cuanto al

segundo, es necesario determinar tanto el volumen de agua como su calidad para establecer la masa de contaminantes (nutrientes, sales u otros) exportadas que son las que afectarán a la calidad de la masa de agua receptora.

Determinar las masas exportadas puede servir a varios propósitos adicionales: (2.a) Incorporarlas a un modelo de gestión de cuenca que permita la ordenación del territorio para mantener los límites de calidad de la DMA y el principio de DNSH; (2.b) Verificar la evolución en el tiempo de los retornos (a largo plazo: periodo de observación de más de 10 años); y (2.c) Verificar el efecto de prácticas de manejo implementadas en la zona (especialmente modernizaciones de regadío e implementación de Buenas Prácticas Agrarias, BPAs) sobre la calidad y cantidad de los retornos.

De la comparación de las entradas y salidas de agua se sigue un objetivo adicional: (3) obtener una medida indirecta del aprovechamiento del agua (y de su evolución en el tiempo) que permite conocer la eficiencia global del sistema del riego y el efecto de los cambios implementados (en el caso de modernización, por ejemplo), y, en concreto, evaluar la reducción en los volúmenes de agua detraídos para riego.

La comparación entre las masas de sales aportadas con el riego y las exportadas con el drenaje permite establecer (4) el balance de sales. Que las entradas superen a las salidas de modo consistente en el tiempo (balance de sales positivo) es señal de una acumulación de sales en el sistema y es una situación que puede llegar a producirse en sistemas de riego de alta eficiencia, como los nuevos sistemas de riego localizado o deficitario.

Para cumplir mínimamente los objetivos propuestos es necesario controlar también otras entradas de agua al sistema, como la lluvia, las filtraciones desde el sistema de riego o a través de aguas superficiales y subterráneas aguas arriba de la zona de interés.

4. Catálogo de mediciones

Las entradas y salidas que se deben controlar (en cantidad y en calidad) en cada caso dependen de la naturaleza del sistema, por ello es imprescindible realizar un estudio de reconocimiento previo en cada caso que permita:

1. Definir cuál es la zona objeto de estudio: si se trata de controlar los retornos y las entradas de (a) una comunidad de regantes o un conjunto de ellas; (b) una cuenca hidrológica (que incluye una o varias unidades de gestión del regadío y áreas de secano,

- normalmente); o (c) toda la superficie que contribuye a un acuífero, como casos más usuales
2. Definir cuáles son las fuentes del agua de riego. Este punto está claramente definido si se trata de sistemas de riego que reciben el agua de grandes canales. En sistemas de riego tradicionales que toman el agua de los ríos, es necesario buscar cuáles son los puntos de captación y recopilar información sobre su calidad o establecer un plan de muestreo para determinarla. En los regadíos que se alimentan de aguas subterráneas hay que caracterizar los puntos de extracción determinando su calidad y cantidad. También en los regadíos de aguas no convencionales (desalinizadas o regeneradas procedentes de depuradoras, EDAR) es requisito indispensable caracterizar su cantidad y, con especial atención, su calidad.
 3. Determinar por dónde se verifica la evacuación del agua de drenaje. Hay 4 escenarios generales: (1) Drenaje fundamentalmente superficial sin acuíferos profundos importantes en el que las aguas de drenaje alimentan un nivel freático somero que se drena a través de uno o varios cauces abiertos. En este caso es necesario identificar todos los desagües y las superficies que drenan cada uno de ellos, tanto de regadío de la zona de control, como otras posibles superficies de regadío y de secano. (2) Drenaje a través de un acuífero somero cuya principal recarga es el drenaje del regadío. (3) Sistema que drena a un acuífero profundo, que normalmente recibe otras entradas de agua y fluye con independencia del drenaje de la zona regada. (4) El caso de los regadíos de ribera es más complejo: drenan sub-superficialmente directamente al río, que discurre paralelamente a la zona regada y también hay aportes importantes de colas de acequias (regadíos tradicionales) difíciles de controlar.
 4. Determinar las otras fuentes de agua que contribuyen al flujo por los puntos de control de las salidas que se establezcan. Pueden ser entradas superficiales al cauce controlado o entradas sub-superficiales al freático que alimenta el mismo, en el caso de controles superficiales; o entradas subterráneas al acuífero que recibe los retornos de riego.

Todas estas tareas requieren un conocimiento importante del territorio, especialmente de los suelos y sus características hidrológicas. En concreto, es necesario elaborar **mapas temáticos de suelos** de la zona regable con las especificaciones siguientes: capacidad de retención de agua disponible, CRAD (hasta la profundidad de suelo), profundidad del suelo, salinidad y clase textural. La escala de forma general será de 1:25.000. En el caso de zonas que vierten a aguas subterráneas, también hay que caracterizar el acuífero. En el apartado de aguas subterráneas (apartado 4.2.2.) se detallan las necesidades concretas.

4.1 Determinar las entradas

Es necesario caracterizar la cantidad y calidad del agua que entra en una zona regable para poder cuantificar de forma adecuada la contribución de la agricultura de regadío a la cantidad y calidad de los retornos o salidas del sistema. Dentro de las entradas tenemos el agua de riego, la precipitación (lluvia y nieve) y los volúmenes de agua que proceden de zonas externas al sistema que se evalúa (secanos, comunidades de regantes vecinas y otros). La cantidad de agua de riego es una variable que se mide de forma habitual en las Comunidades de Regantes.

La calidad del agua de riego se mide de forma habitual cuando el agua procede de depuradoras o desaladoras. Cuando el origen del agua es subterráneo también es importante determinar su calidad. Siendo, en cualquier caso, interesante establecer la calidad del agua de entrada, al menos en cuanto a sus parámetros esenciales: salinidad (conductividad eléctrica, CE) y nutrientes. La Tabla 2, extraída de Ayers y Westcot³ establece los parámetros de calidad del agua que limitan su uso para la actividad agrícola, así como los problemas potenciales que originan.

Tabla 2. Guía para la interpretación de la calidad del agua para riego.

Problema Potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguno	Ligero a moderado	Alto
SALINIDAD Afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos. 1. Conductividad Eléctrica del agua (CE _a). 2. Sólidos Disueltos Totales	dS/m	< 0,7	0,7-3	> 3
	mg/l	< 450	450-2000	> 2000
INFILTRACIÓN Se reduce la velocidad del agua en el suelo. Se evalúa con CE _a y RAS $RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$				
	RAS (meq/l)	Conductividad Eléctrica del agua (CE _a)		
	0-3	> 0,7	0,7-0,2	< 0,2
	3-6	> 1,2	1,2-0,3	< 0,3
	6-12	> 1,9	1,9-0,5	< 0,5
	12-20	> 2,9	2,9-1,3	< 1,3
	20-40	> 5,0	5,0-2,9	< 2,9
TOXICIDAD DE IONES ESPECÍFICOS				

³ Ayers, R. y D. Westcot. 1994. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper.29. Rev 1. Roma, Italy

Afecta a cultivos sensibles				
<u>Sodio, Na⁺</u>				
Riego por superficie	RAS (meq/l)	< 3	3-9	> 9
Riego por aspersión		< 3	> 3	
<u>Cloro, Cl⁻</u>				
Riego por superficie	meq/l	< 4	4-10	> 10
Riego por aspersión	meq/l	< 3	> 3	
<u>Boro, B</u>				
	meq/l	< 0,7	0,7-3	>3
VARIOS				
Afecta a cultivos sensibles				
<u>Nitratos NO₃-N</u>				
	mg/l	< 5	5-30	> 30
<u>Bicarbonatos HCO₃⁻</u>				
Sólo daños en hoja con riego por aspersión	mg/l	< 1,5	1,5-8,5	> 8,5
<u>pH</u>			Amplitud normal	
			6,5-8,4	

En el caso de aguas regeneradas procedentes de depuradora, EDAR, es necesario un control más específico, que se detalla en el apartado correspondiente (ver apartado 4.1.1.3, Tabla 3)

4.1.1 Agua de riego: origen superficial, subterráneo y no convencional

4.1.1.1 Agua de riego de origen superficial

Las aguas de origen superficial que se utilizan para el riego pueden tener diferente calidad, dependiendo de la localización de la captación en relación con la fuente de agua. Así, los regadíos que se alimentan de Grandes Sistemas de riego tienen, de forma general, agua de elevada calidad. Esto es así porque estos Grandes Sistemas tiene su origen en la cabecera de los ríos. Por otro lado, los regadíos que se alimentan directamente del río tendrán un agua cuya calidad irá disminuyendo a medida que descendemos en el curso del río. Este es el caso de los regadíos tradicionales de ribera que toman el agua mediante azudes a lo largo de los ríos y en los que es necesario medir el volumen detraído y mantener un control de la calidad del agua de riego.

1. Grandes sistemas de riego:

- 1.1. Caudal. Medición a través de las entradas facturadas o medidas en las tomas de riego de los canales principales o en las estaciones de bombeo. Si el sistema de distribución del agua a las parcelas se realiza por acequias, se aconsejan medidas complementarias para determinar las filtraciones y los caudales de cola.

- 1.2. Calidad: medida periódica de los parámetros que pueden afectar al desarrollo de los cultivos y al riego (Tabla 2):
 - 1.1.1. Salinidad (a través de la conductividad eléctrica, CE) y cloruro (Cl^-)
 - 1.1.2. Sodicidad (Na^+) y medida de la relación de absorción de sodio, RAS (no con tanta frecuencia)
 - 1.1.3. Nutrientes (sobre todo NO_3^-)
 - 1.1.4. Bicarbonato y carbonato (dureza): por la posibilidad de precipitación en las redes de riego presurizadas. Sobre todo, en los goteros.
2. Sistemas de riego tradicionales a lo largo de los ríos
 - 2.1. Caudal. Medidas en las cabeceras de los canales en los azudes o puntos de entradas de agua al sistema.
 - 2.2. Calidad. Se medirán los siguientes parámetros:
 - 2.2.1. Salinidad (a través de la conductividad eléctrica, CE) y cloruro (Cl^-)
 - 2.2.2. Sodicidad (Na^+) y medida de la relación de absorción de sodio, RAS (no con tanta frecuencia)
 - 2.2.3. Nutrientes (sobre todo NO_3^-). Indispensable para ajustar las dosis de fertilizante y para evitar sobre-fertilización de nitrógeno. En estas aguas es más probable que haya mayor cantidad de nutrientes que en las de los grandes sistemas de riego.
 - 2.2.4. Bicarbonato y carbonato (dureza): por la posibilidad de precipitación en las redes de riego presurizadas. Sobre todo, en los goteros.
 - 2.2.5. Los sólidos en suspensión (SST), a través de la turbidez. Es más importante en riegos presurizados, sobre todo goteo, por problemas de deposición y obstrucción.

4.1.1.2 Agua de riego de origen subterráneo

Las aguas de riego de origen subterráneo requieren un control importante tanto en su cantidad como en su calidad. Para ello se utilizarán los pozos de extracción para medir:

1. Caudal: caudalímetros en los sistemas de bombeo.

2. Calidad: Se medirán los siguientes parámetros:

- 2.1. Salinidad (a través de la conductividad eléctrica, CE) y cloruro (Cl^-).
- 2.2. Sodicidad (Na^+) y medida de la relación de absorción de sodio, RAS (no con tanta frecuencia).
- 2.3. Nutrientes, sobre todo NO_3^- en los acuíferos someros de recarga rápida. La medida de nutrientes es indispensable para ajustar las dosis de fertilizante. Medidas ocasionales de NH_4^+ .
- 2.4. Bicarbonato y carbonato (dureza): por la posibilidad de precipitación en las redes de riego presurizadas. Sobre todo, en los goteros.
- 2.5. Si el riego es por goteo, controlar también Fe^{2+} y Mn^{2+} .

4.1.1.3 Agua de riego de fuentes no convencionales

La valoración de la calidad del AR para su uso como agua de riego se debe realizar quincenalmente mediante análisis físico-químicos y microbiológicos del agua procedente de la EDAR (AOAC, 1996). Las muestras se deben tomar en un punto próximo a la salida de la depuradora (entronque de la EDAR), asegurando que los caudales de vertido sean significativos (al menos de unos $100 \text{ m}^3/\text{h}$), y en la salida de las balsas o embalses de captación de las aguas regeneradas. La frecuencia de muestreo recomendada es horaria y se realizará de manera automática durante el periodo de riego principal. Los parámetros físico-químicos y biológicos más importantes y las razones por las que es de interés su determinación son:

Materia en suspensión (SST), sólidos disueltos y turbidez. Interés: Puede dar lugar a depósitos de fango y a condiciones anaerobias. Unas cantidades excesivas podrían originar obturaciones en el sistema de riego.

Parámetros biológicos (*Escherichia Coli* – *e-coli*, *Legionella*, nematodos intestinales y clorofila a).

Conductividad eléctrica, sulfatos, sodio, cloruro, boro, calcio, magnesio, hierro y manganeso. Interés: Los elementos sodio (Na) y boro (B) y los iones cloruros (Cl^-) son tóxicos para las plantas, además de que el Na puede causar problemas de permeabilidad en los suelos. Por otro lado, la precipitación de carbonato cálcico y magnésico es uno de los problemas más frecuentes en la obturación de instalaciones de riego por causas químicas. También afecta a la

obturación de estas instalaciones la precipitación de los óxidos y sulfuros de hierro y manganeso. Un grado excesivo de salinidad puede perjudicar ciertos cultivos.

pH y oxígeno disuelto. Interés: El valor de pH afecta a la solubilidad de los metales, así como a la alcalinidad del suelo y al peligro de obturación de instalaciones de riego. Por otro lado, el oxígeno disuelto (OD) es fundamental para el conocimiento del grado de descomposición biológica y la aparición de condiciones anaerobias.

Metales pesados (cadmio, cinc, níquel y mercurio). Interés: Son tóxicos para los animales y limitan la idoneidad del agua de riego a utilizar. En ocasiones están presentes en aguas regeneradas.

Nitratos, fosfatos y bicarbonatos. Interés: Los nitratos y fosfatos son, por un lado, una fuente natural de nutrientes para las plantas, pero, por el contrario, suponen un riesgo de eutrofización de las aguas. Por otro lado, los bicarbonatos presentan el riesgo de obstrucción del sistema de riego.

El fósforo (P) es un macronutriente importante para el desarrollo radical y la floración de los cultivos, sin embargo, favorece problemas de precipitación química, cuando se aplican determinados fertilizantes a base de calcio o hierro en el agua de riego, y de eutrofización de las aguas. Los niveles de clorofila *a* también participan de la eutrofización, por lo que sería interesante realizar el seguimiento a nivel estacional de este parámetro y de la turbidez del agua mediante sondas instaladas dentro de los embalses de AR.

Los requerimientos del agua regenerada para uso agrícola están legislados en el **RD 1620/2007**, de 7 de diciembre, *por el que se regula el régimen jurídico de reutilización de aguas depuradas*, en el cual se establecen los diferentes parámetros de aceptabilidad de uso. No obstante, se prevé que a mediados del año 2023 entre en vigor el nuevo **Reglamento (UE) 2020/741** del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 *relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua*. Este reglamento establece parámetros armonizados para garantizar la seguridad de la reutilización del agua en el riego agrícola, con el objetivo de fomentar esta práctica y ayudar a afrontar las sequías y el estrés hídrico y también pretende contribuir a los [Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas](#). En este reglamento el operador de la estación regeneradora de aguas debe velar por que las aguas regeneradas destinadas al riego agrícola cumplan los requisitos mínimos de calidad del agua establecidos en el anexo I de este Reglamento, que abarcan elementos microbiológicos (como los niveles de la

bacteria *E. coli*) y requisitos de control rutinario y de validación, además de cualquier otra condición establecida por la autoridad competente en el permiso correspondiente en lo que se refiere a la calidad del agua.

En líneas generales, el **Reglamento (UE) 2020/741** es más restrictivo que el actual RD 1620/2007 en cuanto a la presencia de la bacteria *E. coli* para cualquier método de riego con AR y para cualquier categoría de cultivo, excepto para cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas que mantiene valores máximos similares al RD 1620/2007. Además, en cuanto a la turbidez y a los SST, en cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las AR y tubérculos que se consumen crudos bajo cualquier método de riego, el nuevo Reglamento EU es más restrictivo que el RD actual.

Los valores máximos permitidos para cada una de las normativas citadas, así como la frecuencia de muestreo y una comparativa de las mismas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores límite permitidos en las aguas regeneradas destinadas a uso agrícola según la normativa vigente actualmente (RD 1620/2007) y la normativa que entrará en vigor a mitad del año 2023 (Reglamento UE 2020/741).

Reglamento UE 2020/741								RD 1620/2007						COMPARATIVA entre Reglamento UE y RD 1620/2007
Categoría cultivo	Calidad mínima AR	Método de riego	Criterios de calidad (valores límite)					Calidad Agua/ Categoría cultivos		Valores máximos admisibles				
			E. coli (UFC/100 ml)	SST (mg/l)	Turbidez (UNT)	DBO5 (mg/l)	Otros criterios			E. coli (UFC/100 ml)	SST (mg/l)	Turbidez (UNT)	Otros criterios	
Cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las AR y tubérculos que se consumen crudos	Clase A	Todos los métodos de riego	10 (1 vez / semana)	10 (1 vez / semana)	5 (Continuo)	10 (1 vez / semana)	Legionella spp.: < 1 000 UFC/l cuando exista un riesgo de aerosolización (2 veces / mes) Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤ 1 huevo/l para el riego de pastos o forraje (2 veces / mes o como determine el operador de la estación regeneradora de aguas en función del número de huevos en las aguas residuales que entran en la EDAR)	2.1 a)	Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del AR con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	100 (1 vez / semana)	20 (1 vez / semana)	10 (1 vez / semana)	Legionella spp: 1000 UFC/l si riesgo aerosolización 1 huevo nemátodo/10 l (2 veces / mes)	E. Coli, SST y Turbidez más restrictivos en Reglamento UE
Cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las AR	Clase B	Todos los métodos de riego	100 (1 vez / semana)	35	-	25*		2.3 a)	Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del AR con los frutos consumidos en la alimentación humana	10000 (1 vez / semana)	35 (1 vez / semana)	-	1 huevo nemátodo/10 l (2 veces / mes)	E. Coli más restrictivo en Reglamento EU En RD no se mencionan “cultivos sin contacto”, sólo los leñosos
	Clase C	Riego por goteo**	1000 (2 veces / mes)	35*	-	25*		2.2 a)	Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación que no evita el contacto directo del AR con las partes comestibles (consumo no en fresco, sino con tratamiento posterior	1000 (1 vez / semana)	35 (1 vez / semana)	-	1 huevo nemátodo/10 l (2 veces / mes)	-E. Coli más restrictivo en Reglamento EU (solo permite por goteo con la calidad de E.Coli permitida según el RD). Habrá que bajar a 100 para cualquier tipo de riego. -El RD especifica que el sistema permite el contacto directo con partes comestibles y el Reglamento EU no.
Cultivos de alimentos transformados	Clase B	Todos los métodos de riego	100 (1 vez / semana)	35*	-	25*								
	Clase C	Riego por goteo**	1000 (2 veces / mes)	35*	-	25*		2.2 b)	Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne	1000 (1 vez / semana)	35 (1 vez / semana)	-	1 huevo nemátodo/10 l (2 veces / mes)	-E. Coli más restrictivo en Reglamento EU (solo permite por goteo con la calidad de E.Coli permitida según el RD). Habrá que bajar a 100 para cualquier tipo de riego
Cultivos no alimenticios, incluidos cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche	Clase B	Todos los métodos de riego	100 (1 vez / semana)	35*	-	25*								
	Clase C	Riego por goteo**	1000 (2 veces / mes)	35*	-	25*		2.3 c)	Riego de cultivos industriales no alimentarios, vivero, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas	10000 (1 vez / semana)	35 (1 vez / semana)	-	1 huevo nemátodo/10 l (2 veces / mes)	Igual RD que Reglamento EU
Cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas	Clase D	Todos los métodos de riego	10000 (2 veces / mes)	35*	-	25*								

*De conformidad con la Directiva 91/271/CEE (anexo I, cuadro 1). ** u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible.

4.1.2 Agua de lluvia

En el ámbito agrícola, para determinar las necesidades de riego de los cultivos resulta imprescindible cuantificar la precipitación. Para ello disponemos de redes de estaciones meteorológicas (AEMET) y agrometeorológicas (MAPA, red SIAR⁴) que proporcionan los datos de precipitación en distintas localidades. Solo en caso de que no estén disponibles en la zona de interés se puede contar con la instalación de pluviómetros locales.

En general, no es necesario medir la calidad del agua de lluvia, a no ser que estemos en ubicaciones próximas a emplazamientos industriales muy contaminantes (centrales térmicas, por ejemplo) en los que puede ser interesante controlar el pH (lluvia ácida).

4.1.3 Aguas procedentes de zonas externas a la zona de control

Dependerán del tipo de entradas identificadas en el reconocimiento previo.

1. Entradas superficiales que provienen de barrancos que fluyen desde zonas aguas arriba de la zona de control.

- 1.1. Caudal. Instalación de secciones de control y medidores de altura en continuo (caso de cauces permanentes o con flujos importantes). Mediciones ocasionales o periódicas de caudal mediante aforos directos en secciones no preparadas (flujos intermitentes y poco importantes).

- 1.2. Calidad. Se medirán los parámetros:

- 1.2.1. Salinidad (a través de la conductividad eléctrica, CE) y cloruro (Cl^-).

- 1.2.2. Sodicidad (Na^+) y medida de la relación de absorción de sodio, RAS (no con tanta frecuencia).

- 1.2.3. Nutrientes (sobre todo NO_3^-).

2. Entradas sub-superficiales:

⁴ SIAR. Servicio de Información agrometeorológica al regante del MAPA.
<https://eportal.mapa.gob.es//websiar/Inicio.aspx>

2.1. Caudal: estimación a partir del gradiente hidráulico (instalación de al menos 2 pozos de observación en la dirección del gradiente), la profundidad saturada y la sección del acuífero y su conductividad hidráulica saturada (K_s).

2.2. No son necesarias medidas de calidad porque no van a afectar la zona regada a no ser que se trate de aguas muy someras que pueden dar lugar a un ascenso capilar importante, en ese caso:

2.2.1. Salinidad (CE): importante.

2.2.2. Nutrientes (NO_3^-): por la posibilidad de encamado y por gestionar mejor la fertilización).

3. Entradas subterráneas en acuíferos extensos (regionales). En este caso, el acuífero en sí no pertenece al sistema que controlamos y nos vamos a limitar a medir o estimar las aportaciones del regadío al mismo. Se pueden medir las entradas (y salidas) mediante una red de piezómetros y con la metodología del apartado anterior, pero no es determinante.

4.2 Determinar las salidas

Una red de control de calidad de los retornos de riego necesita inexcusablemente medir la cantidad y calidad de las aguas que salen del sistema. Estas salidas lo harán a través de cauces superficiales y/o subterráneos. A continuación, se especifican los límites que las reglamentaciones Comunitarias, Nacionales y Autonómicas establecen para la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

1. Sobre nitrógeno. La concentración de nitratos superior a $25 \text{ mgNO}_3/\text{L}$ en aguas superficiales y $37,5 \text{ mgNO}_3/\text{L}$ en aguas subterráneas según el RD47/2002 en las aguas clasifica a las masas de agua como vulnerables. Por ello, en el control de los FRR habrá que asegurar que **las aguas receptoras** no alcanzan el valor máximo establecido.
2. Sobre P. El fósforo es el principal factor que controla la eutrofización de las aguas. El valor máximo ($0,035 \text{ mgP/L}$) se establece sólo para las aguas superficiales y es un valor por encima del cual se considera una masa de agua en mal estado por problemas de eutrofización, por lo que en el control de los FRR habrá que asegurar que **las aguas receptoras** no alcanzan el valor máximo establecido. Es de especial relevancia la medida de este macronutriente en momentos de lluvias intensas en las redes de control, debido

al importante arrastre de fósforo adsorbido a los materiales en suspensión durante los fenómenos de erosión hídrica.

3. Sobre CE. Se establece un valor umbral de 2 dS/m por encima del cual hay limitaciones o consideraciones para su uso.

4.2.1. Control de los retornos de riego que vierten a cauces superficiales

Un primer paso para establecer una red de control sobre los retornos de riego es verificar a través de dónde se producen; es decir cuáles son las vías de evacuación del exceso de agua. Este proceso se debe realizar a partir de la cartografía geográfica y geológica existente (ver apartado de Recursos) y debe permitir establecer las vías de drenaje superficial de la zona de interés; las cuencas hidrológicas de esas líneas de drenaje (que normalmente incluirán un área mayor que la que interesa controlar, tanto en secano como en regadío) y en general los flujos de agua (naturales e inducidos por el riego) que van a afectar a la red de control a proponer. Estas estaciones servirán como puntos de medida del caudal y la calidad de las aguas que salen de la cuenca procedentes de la actividad agraria de regadío. El diseño, instalación y monitorización de esta infraestructura requiere realizar los siguientes pasos:

1. Localizar el punto o puntos de instalación de la estación de control de retornos de riego.
2. Diseñar estructuras para la medida del caudal (cantidad).
3. Medida de la calidad de las aguas de retorno. Características fisicoquímicas relevantes del agua, así como requerimientos de custodia de las muestras en función de los elementos a analizar.
4. Establecer la frecuencia de muestreo.
5. Interpretación de los resultados.

4.2.1.1 Localización de las estaciones de control de retornos en cuencas superficiales

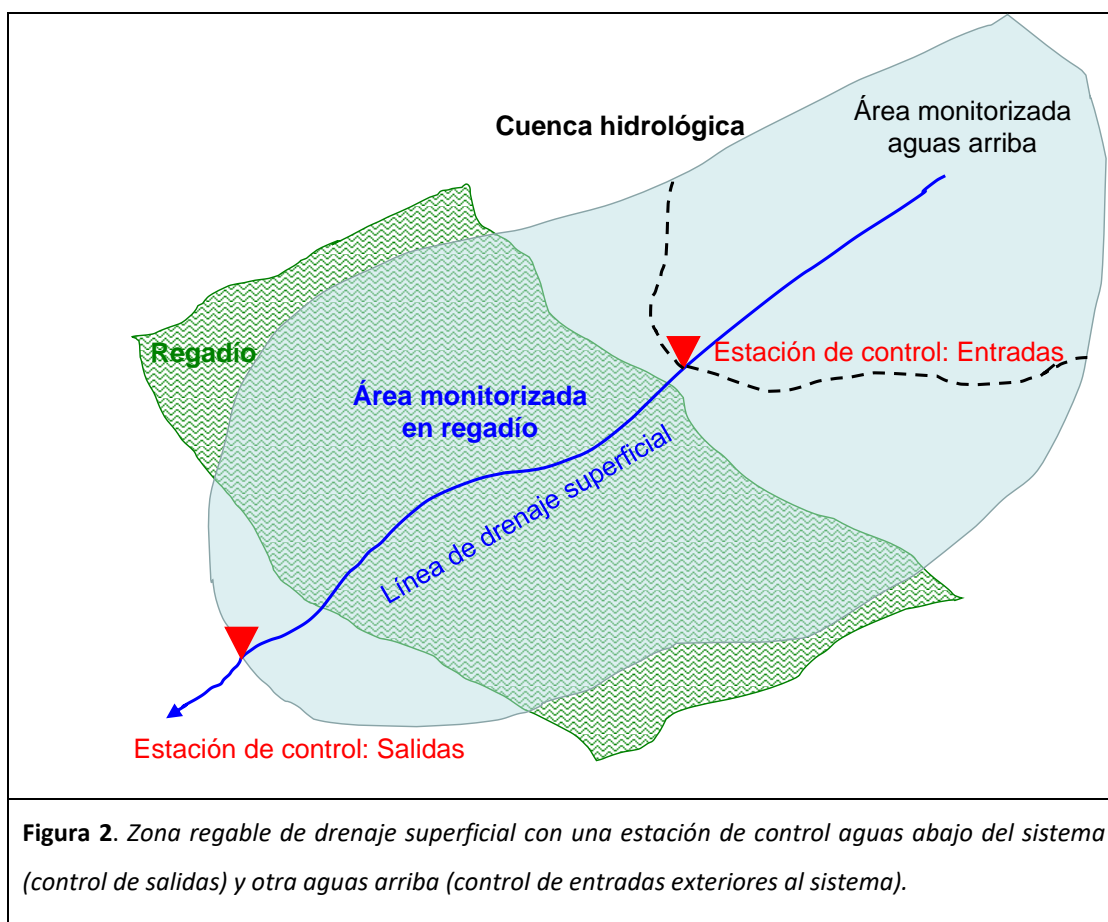
Las zonas regables que evacúan las aguas de drenaje a través de cauces abiertos permiten medir el caudal mediante instalaciones de aforo y son de fácil acceso para la toma de muestras. Es el caso más general en los regadíos tradicionales y en los modernizados que se alimentan de aguas superficiales.

La mayor dificultad puede proceder de la definición de las fronteras del sistema, es decir, si la zona de control es una CR, ésta puede ser drenada a través de múltiples desagües de drenaje; o los desagües pueden recoger agua de esta CR y de otras. Además, cualquier colector

recogerá normalmente aguas, no solo de la zona regada, sino de áreas de secano, cultivadas o no (Figura 2). Para conocer las aportaciones de la zona regada (es decir, lo que contribuye realmente ese regadío a la contaminación de las masas de agua receptoras) es necesario descontar la aportación de las zonas aguas arriba. Si no interesa desagregar el efecto del regadío y del secano este control sería innecesario. En cualquier caso, si se trata de establecer las salidas de una zona regable en concreto, es importante reconocer adecuadamente cuáles son las parcelas (o la superficie) realmente drenada por el colector en que se instale el control (Figura 2).

La complejidad de las situaciones reales puede aconsejar realizar muestreos no restringidos a zonas regadas pequeñas (una única CR, por ejemplo) sino a zonas más amplias con desagües que recogen aguas de muchas CCRR, por ejemplo. En estos casos, el esfuerzo en el muestreo puede estar más justificado, aunque la asignación de la contaminación causada entre las distintas CCRR puede resultar mucho más compleja o directamente imposible.

Además de las consideraciones relacionadas con la hidrología, también hay que considerar qué equipos de monitorización se van a instalar, ya que algunos de ellos tienen requerimientos específicos. Es el caso de los medidores de caudal basados en el flujo crítico, que requieren que un tramo del cauce de al menos 100 m aguas arriba y aguas abajo sea recto y con cierta pendiente, suficiente para evitar el embalsamiento del agua y la pérdida de las condiciones de flujo crítico.



4.2.1.2 Medidas de caudal en los cauces de drenaje

El volumen de los FRR se determina en cada estación de control a través de la medida de la velocidad y la sección del flujo. La velocidad se mide de forma directa o indirecta, tal y como se indica en el apartado 5. La caracterización en continuo de la velocidad y la sección nos permite integrar en diferentes intervalos temporales los volúmenes de los FRR. Hay que tener en cuenta que los volúmenes instantáneos son puramente informativos y un correcto análisis debe integrar un periodo temporal suficiente para poder sacar conclusiones. El periodo mínimo necesario para analizar los FRR dependerá de las características de la zona, sus suelos, su pendiente, el manejo del riego y el régimen pluviométrico. Durante un evento de lluvia intenso, se puede analizar el periodo mínimo que tarda en drenar una zona, como la diferencia temporal entre el evento de lluvia y el pico de caudal en el punto de control. Cuanto mayor sea el periodo de análisis, más fácil será sacar conclusiones que relacionen los volúmenes de drenaje con los volúmenes de los FRR.

4.2.1.3 Medidas de calidad del agua en las estaciones de control superficiales

Para las aguas de retornos de riego, la calidad se centra en el contenido de nutrientes y la salinidad. Los nutrientes, N y P, se deben analizar en las formas más usuales en que se encuentran en el agua.

1. Para el N, en aguas superficiales debe determinarse en forma de N-NO_3 , siendo las contribuciones en forma de N-NH_4 mucho menores normalmente. Sin embargo, en sistemas que puedan tener aportes orgánicos (explotaciones ganaderas) o de aguas residuales es importante medir también el N-NH_4 . Incluso en situaciones de escorrentías fuertes, con procesos de erosión claros, puede ser interesante medir el N-NH_4 y el N orgánico (N-org).
2. El P en las aguas superficiales debe medirse como P disuelto (en forma de fosfato, PO_4) y como P total (PT) porque la fracción de P exportada adsorbida a los materiales en suspensión suele ser muy importante durante los eventos de lluvia intensos con escorrentías superficiales abundantes.
3. La turbidez, como indicador de los Sólidos en Suspensión (SST) es otra medida interesante per se (como indicadora de procesos de erosión y por la posible influencia de la turbidez en procesos de sedimentación y de hipoxia) y, además, porque puede llegar a establecerse, mediante regresión, relaciones entre PT y SST que permitan simplificar la medición del PT.
4. La salinidad, la forma idónea de controlarla es a través de la Conductividad Eléctrica (CE), fácil de medir incluso de modo automático. Para su uso es preciso realizar una serie de analíticas iónicas completas (al menos 12 muestras tomadas a lo largo de todo el año hidrológico, al menos durante un año) en las que se determinarán los Sólidos Disueltos totales (SDT) como suma de todas las especies iónicas principales en mg/L (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- ; SO_4^{2-} , HCO_3^- y CO_3^{2-}). Con esas muestras, se establece la regresión SDT-CE que permitirá calcular la salinidad (SDT) a partir de la CE en las muestras subsiguientes. La constancia de esta regresión debe controlarse en el tiempo (con análisis completos ocasionales) especialmente si se producen cambios en el manejo del riego o en la hidrología general del sistema.
5. Plaguicidas. En el caso de los plaguicidas, las normas de calidad ambiental a nivel europeo son la Directiva 2008/105/CE, de 16 de diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas; y la Directiva 2006/118/CE, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. Ambos textos se han traspuesto al ordenamiento nacional a través del Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. El RD 817/2015 traspone a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva Europea 2008/105/CE y consta de varios anexos. El anexo IV recoge las normas de calidad ambiental para las sustancias prioritarias y otros contaminantes, sustancias priorizadas a nivel europeo. Tanto las sustancias prioritarias como las sustancias

preferentes son sustancias peligrosas. Una sustancia peligrosa es un contaminante que posee las siguientes tres propiedades: toxicidad, persistencia y bioacumulación.

En la Tabla 4 se recogen las normas de calidad ambiental que el RD establece para los plaguicidas más relevantes, así como las recomendaciones del MITERD en su guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas⁵.

Tabla 4. Concentraciones medias anuales (NCA Media anual) y máximas (NCA Máxima) admisibles de plaguicidas en las aguas superficiales continentales según Real Decreto 817/2015 y el MITERD, 2021⁵
 Marcador no definido.

Plaguicidas	Clase	NCA Media anual (µg/L)	NCA Máxima (µg/L)
Aclonifeno	Prioritaria	0,12	0,12
Alacloro	Prioritaria	0,3	0,7
Atrazina	Prioritaria	0,6	2
Bifenox	Prioritaria	0,012	0,04
Cibutrina	Prioritaria	0,0025	0,016
Cipermetrina	Prioritaria	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
Clorfenvinfos	Prioritaria	0,1	0,3
Clorpirifos (metil y etil)	Preferente	0,03	0,1
DDT	Otro contaminante	0,025	
Diclorvos	Prioritaria	$6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Dicofol	Peligrosa prioritaria	$1,3 \cdot 10^{-3}$	
Diurón	Prioritaria	0,2	1,8
Endosulfán	Peligrosa prioritaria	0,005	0,01
Glifosato	Específico	0,1	
Hch	Peligrosa prioritaria		
Heptacloro y heptacloro epóxido	Peligrosa prioritaria	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Isoproturon	Prioritaria	0,3	1
Metolacloro	Preferente	1	
Plaguicidas de tipo ciclodieno: 4 drines	Otro contaminante	$\Sigma = 0,01$	
Plomo	Prioritaria	7,2	
Quinoxifeno	Peligrosa prioritaria	0,15	2,7
Simazina	Prioritaria	1	4
Terbutilazina	Preferente	1	
Terbutrina	Prioritaria	0,065	0,34

⁵ MITERD, 2021. Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas.
<https://cpage.mpr.gob.es>

4.2.1.4 Diseño estadístico: frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo y el número de muestras a tomar depende de la variabilidad de los parámetros medidos (su varianza y su variabilidad a lo largo del tiempo) y de la precisión que se quiera alcanzar. Una estrategia razonable es comenzar los muestreos con una frecuencia alta para establecer (durante una o dos campañas de riego o años hidrológicos) la estacionalidad y la varianza de los parámetros medidos y después adaptar la frecuencia de muestreo a esa variabilidad. Unas pautas generales:

1. La frecuencia debe ser mayor en los periodos de mayor interés, normalmente la estación de riego.
2. Las muestras pueden tomarse a mano, cuando la frecuencia necesaria no es muy elevada (semanalmente o menor) o mediante equipos toma-muestras (muestreadores automáticos) cuando se requiera una mayor periodicidad (diaria o mayor). Los muestreadores automáticos deben instalarse protegidos. El cálculo de la instalación debe tener en cuenta, por razones de seguridad, las condiciones de crecida propias de la cuenca natural.
3. Es posible realizar muestras simples (una muestra en un momento determinado) o compuestas (muestras tomadas en momentos distintos se mezclan en una única muestra compuesta). Si es importante analizar la relación entre concentración y caudal, las muestras simples son preferibles. Las muestras compuestas pueden simplificar el trabajo si solo se trata de estimar las masas exportadas. En los equipos toma-muestras automáticos, las muestras compuestas se pueden ajustar a periodos concretos (unir en una única muestra alícuotas tomadas a intervalos fijos —diariamente, por ejemplo) o según caudales (tomando volúmenes de muestra mayores cuanto mayor es el caudal). Esta última opción (volumen proporcional al caudal) permite una integración más rápida de la masa exportada, pero requiere equipos muestreadores más complejos que incluyan sondas de nivel para medida de caudal.
4. En las primeras etapas del muestreo (el primer año hidrológico, por ejemplo) si el muestreo va a ser sostenido en el tiempo se puede muestrear con mayor intensidad (una frecuencia de una muestra al día suele ser suficiente a efectos prácticos) y definir así la estacionalidad de las concentraciones y caudales (y de las masas exportadas, por tanto) y periodos con concentraciones similares (dentro de un orden).

5. Una vez definidos periodos con concentraciones (o masas) más o menos estables se determina la varianza de la misma dentro de ese periodo y, fijado un grado de precisión a alcanzar, con ambos factores se determina el número de muestras necesario para ese objetivo. Este procedimiento se puede aplicar al conjunto de la estación de riego, o de no riego, si no hay periodos claros de concentraciones más o menos estables. Las fechas de muestreo a intervalos iguales se establecen para cumplir con la frecuencia requerida en cada periodo.
6. La variabilidad de caudal y de salinidad dentro del día puede ser importante, especialmente durante la campaña de riego (también, aunque en menor medida, la de la concentración de NO_3). Este punto se puede determinar mediante muestreos horarios a lo largo de algunos días, con los que se puede establecer la hora del día en la que la concentración se parece más a la media diaria o en la que la masa exportada es más parecida a la masa exportada diaria, en su caso.
7. Durante y al final de los eventos de lluvia intensos se recomienda la toma de muestras para determinación de la calidad de las aguas de escorrentía, debido a los procesos de arrastre de sedimentos en general y de fósforo en particular.

4.2.1.5 Interpretación de los resultados

El control de las salidas y entradas de una zona de riego ha de servir para conocer el grado de cumplimiento de 3 objetivos ambientales generales y para establecer las medidas de mejora necesarias en su caso:

1. Mantenimiento del balance de sales en el suelo.
2. Reducción de los volúmenes de agua de los retornos de riego.
3. Reducción de las masas de sales y nutrientes exportadas a través del drenaje.

Se analizan por separado:

1. Mantenimiento del balance de sales en el suelo

En primer lugar, atenerse estrictamente a las recomendaciones FAO para la calidad del agua de riego (Tabla 5) debe evitar los problemas de pérdida de rendimiento y de degradación de la calidad del suelo. En todo caso, se dan unas líneas generales a continuación para establecer las necesidades de lavado, basadas en la fracción de lavado (FL), definida como la fracción del

volumen de riego que ha de sumarse al volumen total de riego en parcela para garantizar el lavado de las sales aportadas con el agua de riego. Es decir, el riego necesario en parcela para el desarrollo del cultivo es la evapotranspiración del cultivo ET_c (o las NH_n si se tiene en cuenta la lluvia efectiva, P_{ef}), al que hay que añadirle una cantidad (necesidades de lavado; NL, Ecuación 2) para el lavado de las sales aportadas.

$$R_p = NH_n + NL \quad [1]$$

$$NL = FL \cdot R_p \quad [2]$$

El volumen de riego que realmente llega y se aplica a las parcelas (R_p) es menor que el volumen de agua traído para riego (medido en las derivaciones para riego a la entrada de los sistemas, en general, coincidente con el riego facturado R_f).

La diferencia entre ambos se corresponde con las pérdidas en la distribución, que dependen de las características y el manejo del sistema de distribución (pueden ser casi nulas en sistemas de riego presurizado y hasta del mismo orden de magnitud que R_p en sistemas de riego tradicionales con acequias no revestidas, por ejemplo).

El R_f debe adecuarse a las necesidades hídricas netas de los cultivos (NH_n), éstas se establecen en general como la evapotranspiración de los cultivos, calculada a partir de datos meteorológicos y de la precipitación efectiva (P_{ef}) también aproximada a partir de datos meteorológicos (Ecuación 3).

$$NH_n = ET_c - P_{ef} \quad [3]$$

Cuando se dispone de datos de calidad de las aguas de riego (salinidad, CE_R), se pueden seguir estas indicaciones, muy genéricas y basadas en que (i) durante la estación de riego, toda el agua que recibe el cultivo procede del riego ($P_{ef} = 0$), (ii) los cultivos sensibles admiten una CE en el extracto de saturación de 1,5 dS/m ($CE_e = 1,5$ dS/m) y para los cultivos tolerantes $CE_e = 3,0$ dS/m. Son asunciones muy generales, con las CE_e asumidas al alza para un rendimiento del 100%, que se compensa por no considerar el efecto del agua de lluvia.

Tabla 5. Fracción de lavado (FL, %) en que se debe incrementar el riego en parcela (R_p) para mantener la salinidad del suelo en niveles que no afecten al rendimiento de los cultivos sensibles ($CE_e < 1,5$ dS/m) y tolerantes ($CE_e < 3,0$ dS/m) para distintos niveles del agua de riego (CE_R) y para riegos convencionales (intervalo entre riegos ≥ 7 días: riegos por inundación o por aspersión en sistemas antiguos, riego no a la demanda) o de alta frecuencia (intervalo entre riegos ≤ 3 días: riegos por aspersión o goteo).

Cultivos:	Sensibles		Tolerantes	
Tipo de riego	Convencional	Alta Frecuencia	Convencional	Alta Frecuencia
CE_R (dS/m)	FL (%) ⁽¹⁾			
$CE_R < 0,5$	5	1	1	0
$0,5 < CE_R < 1,0$	15	5	5	1
$1,0 < CE_R < 1,5$	31	18	9	2
$1,5 < CE_R < 2,0$	50	43	15	5
$CE_R > 2,0$	74	85	23	10

⁽¹⁾ Con unas $NH_n = ET_c$ durante la estación de riego, si el agua de riego tiene una $CE_R = 0,7$ dS/m, en un sistema de riego localizado de fresa (cultivo muy sensible a la salinidad) el volumen estacional de riego deberá ser $R_p = ET_c / (1 - 0,05)$

Así, para unas necesidades del cultivo ET_c y una cierta fracción de lavado FL calculada según la Tabla 5, el riego en parcela se debe incrementar de acuerdo a la Ecuación 4.

$$\left. \begin{array}{l} R_p = NL + ET_c \\ NL = FL \cdot R_p \end{array} \right\} \rightarrow R_p = \frac{ET_c}{(1-FL)} \quad [4]$$

En todos los casos puede ocurrir que la eficiencia de riego en parcela (tomada como $Ef_p = ET_c / R_p$) implique unas salidas por drenaje en la parcela ($R_p - ET_c$) superiores a las NL, en ese caso, el drenaje producido por el exceso de riego (D) será suficiente para el lavado de sales ($D > NL$) y no será necesario considerar una fracción adicional de lavado, NL. Si se conoce el valor de la eficiencia de riego en parcela o se puede aproximar, se puede incluir en el cálculo de la FL real (FL*) según la Ecuación 5.

$$D = R_p \cdot (1 - Ef_p) \begin{cases} si FL < 1 - Ef_p \rightarrow FL^* = 0 \\ si FL > 1 - Ef_p \rightarrow FL^* = FL + Ef_p - 1 \end{cases} \quad [5]$$

En ese caso, el porcentaje en que habrá de incrementarse el R_p viene dado por este nuevo valor de FL*.

Los sistemas de riego deficitario controlado deben seguir un manejo diferente. Puesto que en ellos $R_p < NH_n$ durante la estación de riego, es necesario verificar que las precipitaciones fuera de la estación (P_{inv}) sean suficientes para lavar las sales acumuladas durante la estación.

Una primera aproximación consiste en asumir que toda el agua de lluvia fuera de la estación de riego va a producir lavado en el suelo (compensando no haber considerado las precipitaciones dentro de la estación). Aceptando que no se produce ningún drenaje durante la temporada de riego se cumple la Ecuación 6.

$$P_{inv} > \frac{2 \cdot R_p \cdot CE_R}{CE_e} \quad [6]$$

Donde se puede tomar $CE_e = 1,5 \text{ dS/m}$ para cultivos sensibles y $CE_e = 3,0 \text{ dS/m}$ para cultivos tolerantes.

La segunda aproximación consiste en verificar que la salinidad del suelo en la zona húmeda no aumenta de año en año mediante mediciones in situ al final del ciclo de cultivo.

2. Reducción del volumen de agua de los retornos de riego

Para establecer si la cantidad de agua que medimos en las estaciones de aforo de los FRR son indicativas de un uso poco eficiente del agua de riego, primero tenemos que establecer la relación entre los volúmenes de riego aplicados, las necesidades de los cultivos y las necesidades de lavado para mantener el suelo libre de sales.

De forma global, podríamos establecer que cuando la diferencia entre el riego aplicado en las parcelas menos las necesidades hídricas de los cultivos superan a las necesidades de lavado, tendremos riegos excesivos que se verán reflejados en los FRR. O lo que es lo mismo, cuando el volumen de FRR es superior a las necesidades de lavado estamos incurriendo en un exceso de riego (Ecuación 7). La magnitud de este exceso depende de la diferencia entre ambas variables.

$$R_p - NH_n > NL \text{ o } FRR > NL \rightarrow \text{Exceso de riego} \quad [7]$$

De forma práctica podemos establecer que cuando la diferencia entre FRR y NL sea superior al 10% de las NH_n hay que empezar a establecer estrategias para mejorar la eficiencia de riego.

3. Reducción de las masas de sales y nutrientes exportadas a través del drenaje

Si el volumen de drenaje general del sistema debido al riego (es decir, descontando las demás aportaciones al desagüe no procedentes del regadío) es muy alto en relación al volumen de agua aportado para el riego, está indicando un manejo inadecuado, o mejorable, del riego en el sistema.

De la misma manera, las salidas de nutrientes (N y P) a través del desagüe o hacia los acuíferos deben ponerse en relación bien a las necesidades en N y P de los cultivos o bien a las entradas de N y P por fertilización en la zona controlada. La legislación vigente en zonas vulnerables requiere el registro de la fertilización aplicada a las parcelas por parte de los agricultores mediante los llamados cuadernos de fertilización. De esta forma se puede disponer de las masas de nutrientes que entran al sistema.

Ciñéndonos al N, las entradas por fertilización (NF) deben incluir las entradas como fertilizantes minerales y como fertilizantes orgánicos, que deberán evaluarse para el conjunto de la zona. La masa de N en el drenaje (NQ) se calcula como el producto de la concentración de N-NO₃ por el caudal estimado en cada periodo de muestreo integrado para todo el periodo de estudio (año o estación de riego). Solo en el caso de que se detecten niveles altos de N-NH₄ o N-org se deberán incluir en el cálculo. Si se han establecido las entradas de N en otras aguas que contribuyen al drenaje estudiado, se sustraen a NQ para obtener NQ*: masa de N en el desagüe (o freático) procedente del regadío. Las extracciones de los cultivos (NC) se pueden obtener como el producto de la cosecha de cada cultivo (T/ha) por el contenido de N del producto cosechado (kg N/T) obtenido a partir de tablas de referencia por la superficie de cada cultivo (ha), sumado luego para todos los cultivos.

Con esos valores calculados se pueden obtener los indicadores de uso del N fracción de N lixiviado (FN_{LIX}, Ecuación 8) y fracción de N extraído por las cosechas (FN_{EXT}, Ecuación 9):

$$FN_{LIX} = \frac{NQ^*}{NF} \quad [8]$$

$$FN_{EXT} = \frac{NC}{NF} \quad [9]$$

(entre otros posibles).

Los sistemas deben tender al uso más eficiente posible del recurso NF de manera que FN_{LIX} debe reducirse y FN_{EXT} aumentarse tanto como sea posible. Ambos valores dependen del manejo del riego y de la fertilización y son muy variables entre sistemas, pero la Tabla 6 da unas indicaciones (susceptibles de reconsideración) sobre lo que pueden indicar.

Para los niveles de P, se pueden calcular los mismos indicadores (PQ^* , PF y PC) siguiendo el mismo procedimiento. Para el P es imprescindible considerar el P total (PT), suma del P disuelto (PD, $P-PO_4$) y el P particulado (PP).

La baja movilidad del P en el suelo hace que pueda haber niveles elevados en el sistema que se traduzcan en pérdidas fuera de la estación de riego (en episodios de precipitaciones muy intensas con escorrentías fuertes). Por ello, en el caso del P, es importante realizar un control de P en el suelo (en el horizonte superficial) que debe regular la aplicación de fertilizantes fosforados. Los indicadores FP_{LIX} y FL_{EXT} pueden usarse como complementos. Se pueden consultar diversas tablas de contenido de P en el suelo.

En cuanto a las sales, para el conjunto del sistema, en el transcurso de un año hidrológico debe mantenerse el balance de sales, según la Ecuación 10.

$$BS = MS_{entrada} - MS_{salida} \quad [10]$$

Para asegurar un lavado de sales suficiente debe verificarse que $BS < 0$, con la precaución de que un balance negativo no indica necesariamente que no se pueda estar produciendo la salinización de algunos suelos de la cuenca.

Un $BS > 0$ siempre indica un lavado insuficiente de sales del conjunto del sistema y apunta a la urgencia de mejorar las condiciones de drenaje (generalmente mediante la instalación de sistemas de drenaje en parcela y el descenso del nivel freático).

Tabla 6. Indicaciones y recomendaciones para el sistema según los valores del índice FN_{LIX} .

Valor del Índice	Indicaciones y actuaciones
$FN_{LIX} < 10\%$	Sistema razonablemente eficiente. No se requieren acciones especiales.
$10\% < FN_{LIX} < 20\%$	Situación aceptable. Se plantean acciones de extensión: cursos de manejo del riego y la fertilización.
$20\% < FN_{LIX} < 30\%$	Situación preocupante. 1. Se recomiendan cursos de capacitación sobre el manejo de la fertilización y el riego. 2. Mejora del aprovechamiento de los fertilizantes orgánicos, en su caso.
$FN_{LIX} > 30\%$	Situación del sistema altamente ineficiente. 1. Urge realizar acciones de capacitación. Se recomiendan cursos de capacitación sobre el manejo de la fertilización y el riego. 2. Tomar medidas para la mejora del aprovechamiento de los fertilizantes orgánicos.

4.2.2. Control de los retornos de riego que vierten a acuíferos subterráneos

La red de control piezométrico del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) ⁶ y las redes de calidad de las aguas subterráneas gestionadas por las Confederaciones Hidrográficas, han ido creciendo y automatizándose desde su aparición, con especial impulso en el siglo XXI. Sin embargo, la densidad, las variables medidas y la frecuencia de muestreo de dicha red no son suficientes para el objetivo de determinar la contribución de los FRR de cada zona regable a la calidad de las aguas subterráneas. Por ello, en la mayoría de los casos, será necesario diseñar una red de control específica.

El diseño de estas redes, su distribución y las características constructivas de los puntos de control, así como su frecuencia de medida, va a depender de la tipología de acuífero y de los parámetros a controlar, diferenciando entre puntos de control piezométrico y los de control de calidad de las aguas subterráneas.

⁶ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/red-oficial-seguimiento/Red-seguimiento-piezometrico.aspx>

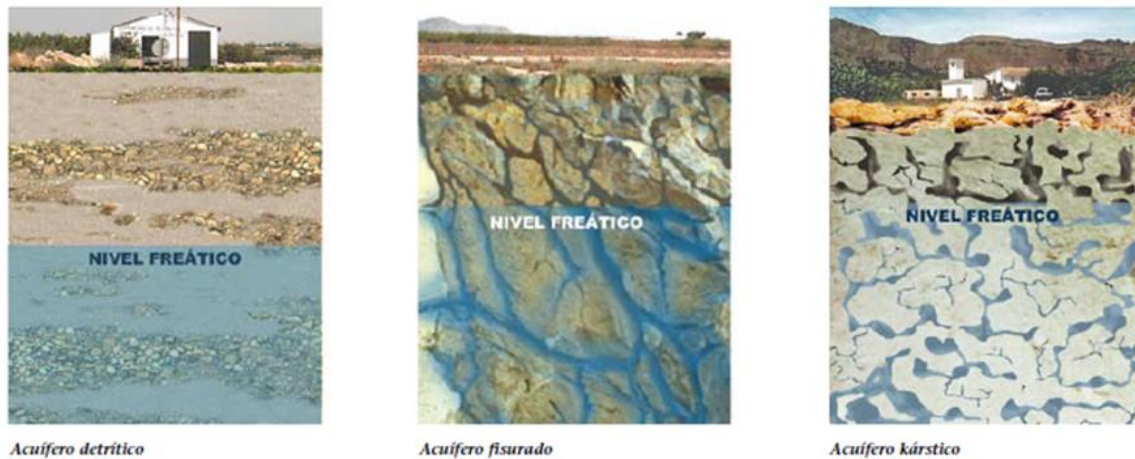


Figura 3. Las aguas subterráneas, un recurso natural del subsuelo (IGME-Fundación Marcelino Botín, 2009)

En función del tipo de porosidad, los acuíferos pueden ser clasificados en detríticos, aquellos formados por materiales no cohesivos donde el agua se encuentra rellenando los intersticios de los granos, kársticos donde la porosidad se forma por procesos de disolución en rocas carbonatadas y yesos, y fisurados en rocas cohesivas que han sufrido procesos de fracturación y donde el agua se encuentra rellenando fracturas o micro-fracturas (Figura 3).

Los acuíferos también pueden clasificarse en libres, donde el agua se encuentra a la presión atmosférica y en confinados o semi-confinados, donde el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica debido a la existencia de niveles supra-yacentes y subyacentes de baja permeabilidad.

A grandes rasgos y en función del origen y su composición litológica los acuíferos se clasifican en:

1. **Acuíferos aluviales.** Formaciones acuíferas formadas por los acarrees de los ríos. Se componen de materiales detríticos de tamaños de grano y espesor muy variable, lo que confiere una elevada heterogeneidad en cuanto a parámetros hidrodinámicos. Salvo en los aluviales de los grandes ríos y en zonas muy determinadas, son acuíferos de poco espesor (< 20 m), y su funcionamiento está vinculado a la dinámica de los ríos. Se trata de acuíferos de permeabilidad entre alta a muy alta con un nivel freático cercano a la superficie, lo que hace que sean muy vulnerables a la contaminación. Su recarga se realiza por infiltración de las precipitaciones y los retornos de riego sobre toda su superficie y en menor medida por aportes del río en los episodios de avenidas. Son acuíferos que dada su vulnerabilidad y heterogeneidad requieren de una mayor densidad de puntos de control. Para aluviales que presentan poco espesor, los pozos de control de calidad deberán ser totalmente

penetrantes. Este dato permite determinar el espesor del acuífero y el nivel de contaminación de su totalidad.

2. **Otras formaciones cuaternarias** corresponden a los depósitos de glaciares, terrazas colgadas, piedemontes, conos de deyección, arenas eólicas y otras formaciones de edad Cuaternaria. Son acuíferos detríticos, de características similares al grupo anterior pero que no siempre se encuentran en conexión con la red fluvial. Son, por lo general, de pequeña extensión donde los retornos de riego pueden suponer una de las principales entradas de agua. En las zonas de riego estos acuíferos presentan una ciclicidad anual muy marcada, con un nivel freático alto en los meses de campaña de riego. Al igual que los aluviales, son formaciones acuíferas muy vulnerables a la contaminación, y por tanto requieren de un número elevado de puntos de control, a poder ser pozos totalmente penetrantes. Los manantiales de descarga de glaciares y terrazas colgadas también pueden constituir zonas preferentes de medida de la calidad de los retornos de riego.
3. **Detríticos no cuaternarios.** Dentro de este grupo se encuentran con una mayor representación las formaciones del relleno terciario de las grandes depresiones de la Península Ibérica entre las que se encuentra la Depresión del Ebro, la del Duero, la del Tajo, etc., así como el relleno detrítico de otras cuencas sedimentarias de menor magnitud como la Depresión de Calatayud, la de Cerdanya, el valle de Ambles, etc. Se trata de acuíferos detríticos de gran espesor y extensión y una amplia variedad de tamaño de grano. La principal recarga corresponde a la infiltración de las precipitaciones y, en menor medida, los retornos de riego sobre los afloramientos de mayor permeabilidad. En profundidad pueden presentar niveles con diferente permeabilidad lo que da lugar a acuíferos denominados **multicapa**. La profundidad del nivel freático en estos acuíferos varía de unas zonas a otras pudiendo superar los 100 m. El espesor de la zona no saturada (profundidad del nivel freático) y su composición (tamaño de grano), hacen que su vulnerabilidad a la contaminación difiera de unas zonas a otras. Son acuíferos que van a requerir, en general, de puntos de control profundos.
4. **Carbonatados.** Son acuíferos formados por procesos de carstificación en rocas carbonatadas y también, con menor representación, en formaciones yesíferas. La formación de grandes conductos favorece la rápida circulación del agua por lo que suelen ser acuíferos poco inerciales, con subidas y bajadas rápidas del nivel freático. La alta permeabilidad que presentan estas formaciones acuíferas hace que sean muy vulnerables a la contaminación. Al ser menos inerciales requieren de una mayor frecuencia de medida, muestreos en época de aguas bajas incluyendo manantiales de descarga.
5. **Fracturados:** este tipo de acuíferos en general son medios de baja permeabilidad y no muy productivos. Se generan típicamente en rocas muy cohesivas como cuarcitas o granitos.

6. **Regolitos.** Se forman en arenas procedentes de la alteración de los granitos. Se trata de acuíferos de elevada permeabilidad, delimitados por rocas graníticas de baja permeabilidad. En general son acuíferos de pequeña entidad y con recurso limitado.
7. **Volcánicos.** Son acuíferos que se forman en rocas con porosidad natural y en fracturas. Los factores principales que condicionan el flujo del agua subterránea en estos acuíferos corresponden a la composición, edad, y grado de alteración. Con excepción de pequeñas áreas, solo están presentes de forma importante en las Islas Canarias.
8. **Superpuestos.** Dentro de este grupo se incluyen formaciones acuíferas superpuestas de diferente naturaleza. Los más comunes corresponden con acuíferos carbonatados mesozoicos profundos, acuíferos de carácter regional, que se localizan bajo formaciones detríticas cuaternarias o terciarias de diferente espesor. El acuífero suprayacente se recarga por infiltración de las precipitaciones y los retornos de riego sobre toda su superficie de afloramiento mientras que el subyacente lo hace en las zonas donde aflora o a través de los aportes procedentes del acuífero superior. El hecho de que el acuífero profundo se sitúe bajo otras formaciones geológicas, limita la entrada de contaminantes, de modo que las zonas más vulnerables se sitúan sobre sus áreas de afloramiento. Sin embargo, las características del acuífero superior, al tratarse de formaciones de elevada permeabilidad, permiten la entrada y acumulación de contaminantes que, poco a poco por percolación, pueden llegar a alcanzar el acuífero subyacente. En este sentido, puede ocurrir que, a pesar de aplicar códigos de buenas prácticas sobre los acuíferos superiores, el acuífero subyacente siga recibiendo aportes de contaminantes por lo que las redes de control muestren niveles elevados de contaminación de forma prolongada. Se trata de acuíferos que requieren de varios puntos de control, específicos para cada uno de los acuíferos: Elevada densidad de puntos en el acuífero superficial y menor número de puntos y frecuencia en los acuíferos profundos. Estos últimos requieren de pozos con unas características constructivas propias de sellado de los niveles superiores.
9. **Acuíferos en formaciones paleozoicas u otras formaciones de baja permeabilidad.** Son acuíferos poco productivos formados por esquistos, pizarras, o formaciones detríticas de baja permeabilidad. La infiltración y movimiento del agua se reducen a las zonas de alteración, fracturas y diaclasado. Son acuíferos poco vulnerables a la contaminación y dada la dificultad del movimiento del agua, la contaminación suele ser de carácter local. En estos acuíferos los puntos de control son solo representativos de las áreas más inmediatas. El nivel freático se suele encontrar a poca profundidad en las zonas de alteración superficial. No requieren de un elevado número de puntos de control, con pozos de poca profundidad situados sobre las zonas de vaguada que recogen los flujos sub-superficiales.

10. **Acuíferos semi-confinados o confinados.** Se trata de acuíferos limitados por niveles litológicos de muy baja permeabilidad que impiden la entrada de contaminantes y que por tanto presentan una baja vulnerabilidad a la contaminación a excepción de las zonas de afloramiento y recarga. Los puntos de control de calidad en estos acuíferos deberán disponerse en las áreas de recarga. Si bien son acuíferos poco vulnerables a la contaminación una vez que se contaminan, el tiempo de residencia del agua es muy alto y muy limitada su capacidad de regeneración. La construcción de pozos en acuíferos confinados es problemática dado que, si el nivel piezométrico está por encima de la cota de la superficie, los pozos son surgentes y requieren de una construcción y mantenimiento específico. En estos casos no se recomienda la perforación de pozos de control en estas zonas, salvo para controlar los descensos por una elevada extracción de agua.

El diseño de las redes de monitoreo de los retornos de riego se va a centrar en los acuíferos superficiales. Los acuíferos profundos son de muy costosa monitorización y el análisis causa-efecto de la contaminación es muy complejo por diversas razones. En primer lugar, porque están integrados en sistemas de flujos regionales que abarcan amplias áreas de recarga. Además, por su gran inercia, pueden llegar a acumular efectos de presiones pasadas ya inexistentes. Por todo ello, el control de los acuíferos profundos queda en manos de las Confederaciones Hidrográficas.

4.2.2.1 Localización de los puntos de control de sistemas de drenaje subterráneo

La localización, características constructivas y número de puntos va a estar determinado por la tipología del acuífero, la amplitud de la zona de estudio y los parámetros de medida.

Con anterioridad al diseño y ubicación de los puntos de control se debe determinar la tipología del acuífero y sus principales características: geometría, composición litológica y funcionamiento, origen y área de recarga, principales zonas de descarga y dirección de flujo.

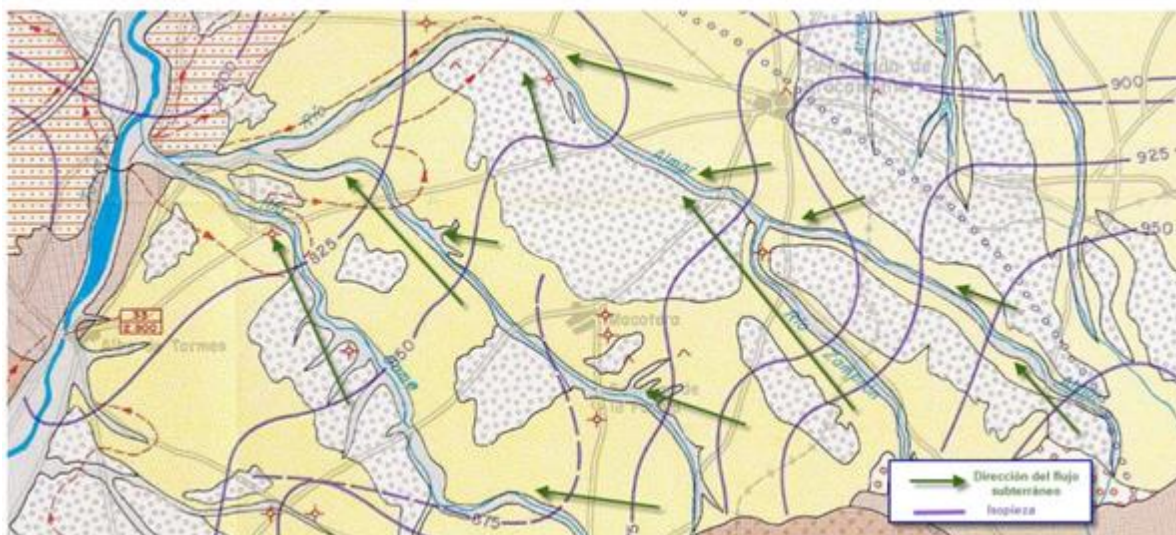


Figura 4. Mapa de isopiezas y direcciones de flujo en la masa de agua subterránea 021.11 - Tormes (MARM-IGME).

La realización de mapas de isopiezas a partir de los puntos de control piezométricos gestionados por el MITERD o a partir de medidas en pozos ya existentes permite definir las zonas de flujo preferencial y su variación estacional. Las Demarcaciones Hidrográficas correspondientes junto con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) disponen de información muy completa sobre caracterización de las masas de agua subterráneas que se puede consultar en parte (MARM-IGME). La Figura 4 presenta un ejemplo de la información disponible en el acuífero del Tormes.

Una vez determinado el tipo de acuífero, se establecen puntos de control diferenciando entre los puntos de control piezométrico y los de control de calidad. Para ello se aplican los siguientes criterios:

- Si en la zona de estudio se dispone de varios acuíferos o sectores hidrogeológicos individualizados (con diferente comportamiento), se debe controlar cada uno de ellos de forma independiente.
- Los puntos de control piezométrico y de calidad no deben solaparse dado que requieren de estándares de representatividad diferentes y no compatibles.
- Se deben establecer como mínimo dos puntos de control piezométrico que permitan determinar el gradiente hidráulico y su evolución. Un punto situado aguas arriba de la zona de riego y otro en la zona de confluencia de los retornos de riego, hacia las zonas de descarga o tránsito de salida de los flujos preferenciales del acuífero (Figura 5).

- En riegos que se abastecen de aguas subterráneas será necesario incorporar un punto de control de la presión extractiva del acuífero mediante la incorporación de un piezómetro a una distancia máxima de 5 km de los pozos de explotación.
- Para evitar que las medidas del nivel piezométrico puedan estar influenciadas por los bombeos en pozos cercanos, la ubicación de los piezómetros deberá mantener una distancia mínima de 1 km en acuíferos detríticos y 2 km en acuíferos carbonatados de cualquier pozo en uso, cuando el volumen de extracción sea elevado ($>7.000 \text{ m}^3/\text{año}$).
- Se deben incorporar, como mínimo, dos puntos de control de calidad, uno aguas arriba de la zona de riego y otro en la zona de confluencia de los retornos de riego, hacia las zonas de descarga o salida de la zona de estudio. Estos puntos de control deben determinar la calidad de las aguas subterráneas a la entrada de la zona de riego y la calidad en la zona de salida (Figura 4).
- En sistemas de riego muy amplios que abarcan acuíferos muy extensos, en función de su tipología se debe incorporar un mayor número de puntos de control de calidad. Su distribución deberá ser lo más homogénea posible.
- En masas de agua superficiales que se encuentran conectadas con acuíferos y reciben retornos de riego, se debe disponer de al menos un punto de control en las zonas de descarga del acuífero al río, en especial en ríos con bajo recurso de agua o que estén afectados por contaminación difusa.
- En ambientes reductores, característicos de zonas hiporreicas (zonas de transición entre los acuíferos aluviales y el río) o en algunos niveles de acuíferos multicapa, se deberá procurar no instalar pozos de control de calidad dado que son zonas de adsorción natural de nitrato y los resultados no serán representativos de las condiciones en el resto del área.
- Para el control de la calidad de los retornos de riego en zonas declaradas Vulnerables, se deberá disponer de una mayor densidad de puntos y de frecuencia de medidas.
- Se debe disponer de puntos de control de calidad específicos en zonas donde los retornos de riego pueden afectar a zonas protegidas vinculadas con las aguas subterráneas: captaciones para abastecimiento urbano, LICs y ZEPAs, perímetros de protección de aguas minerales o termales, reservas naturales subterráneas o ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (EDAS). Se debe disponer de al menos un punto de control de calidad en las zonas de entrada de los retornos de riego al área de alimentación de estas zonas protegidas (puntos cercanos). Según la "Guía para la Evaluación del Estado de las Aguas Superficiales y Subterráneas" de MITERD

(2021)⁷ a una distancia por debajo de la que correspondería a un tiempo de tránsito de 6 años.

En el diseño de esta red de control debe quedar definido el número de pozos a construir, sus características constructivas aproximadas (diámetro y profundidad) y su ubicación, que podrá variar en función de la accesibilidad de las máquinas, permisos, infraestructuras soterradas, y otros aspectos no contemplados inicialmente.

A diferencia de los puntos de control piezométrico, para el control de calidad de las aguas subterráneas se pueden emplear pozos en explotación, siempre que se conozcan las características constructivas del mismo, y su localización se adapte al punto requerido. Al ser pozos que están en explotación, el vaciado de la tubería se realiza periódicamente lo que facilita el protocolo de muestreo.

Como puntos de control de calidad también se pueden emplear manantiales, en función de las características de los mismos: formación acuífera de descarga, área y representatividad de las descargas.

⁷ https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/guia-para-evaluacion-del-estado-aguas-superficiales-y-subterraneas_tcm30-514230.pdf

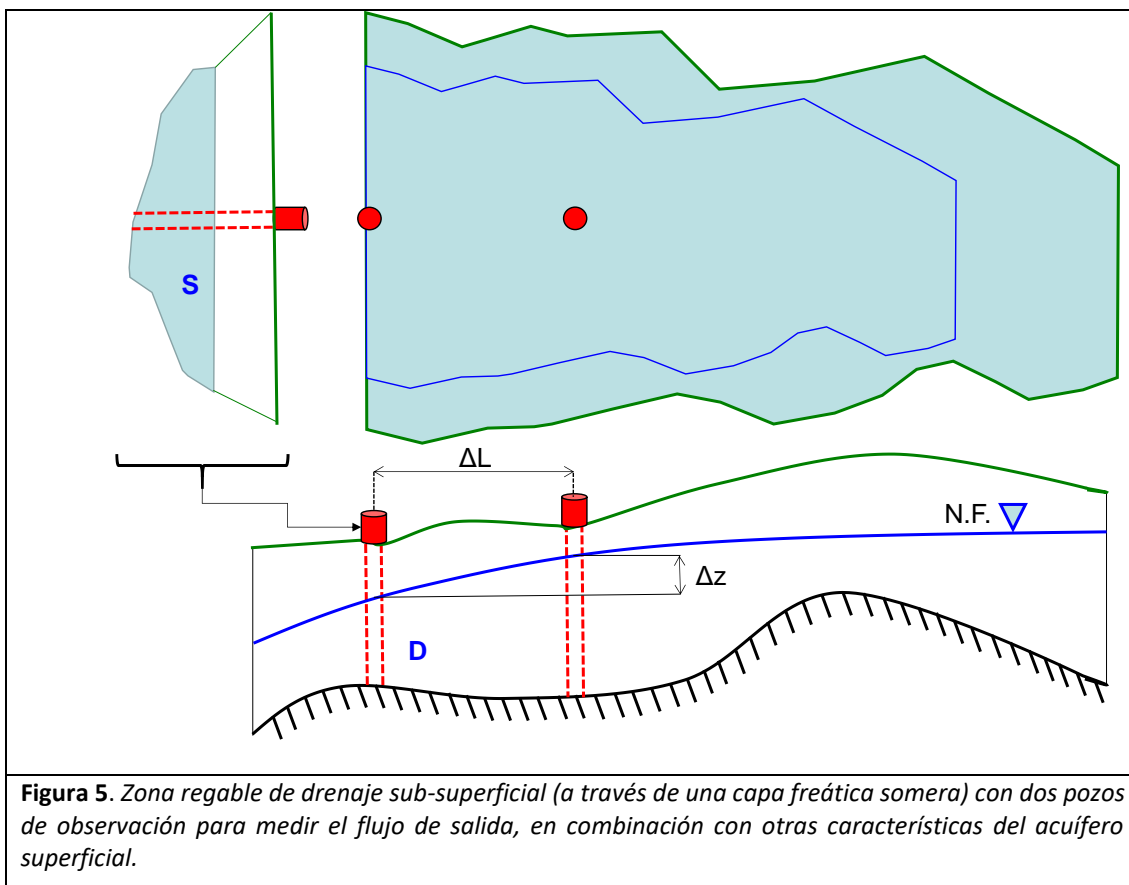


Figura 6. Perforación de sondeos para el estudio y control de los retornos de riego de la CR de Almodévar, Huesca (izquierda). Testigo continuo de un sondeo (derecha).

Una vez definida la ubicación de los pozos y obtenidos los permisos, se deben realizar las obras de perforación (Figura 6 derecha). Es importante el empleo de sistemas de perforación con testigo continuo (rotación con recuperación de testigo) que permita levantar la columna litológica del acuífero y con ello determinar cuáles son los niveles más productivos y su composición (Figura 6 izquierda). A partir de estos datos se determina el entubado de la perforación: la tubería ranurada se debe localizar sobre los niveles con un mayor aporte de agua.

El coste de la perforación se mide por metros, diámetro de perforación y tipo de tubería. En función del tipo de acuífero, el espesor de la zona no saturada y la profundidad que se quiere alcanzar, los precios varían. Se propone un precio orientativo de 100-150 € por metro de perforación con tubería instalada, más los costes de transporte de maquinaria.

Los acuíferos muy transmisivos requieren de pozos de diámetros amplios que permitan la entrada de bombas de elevado caudal; sin embargo, para acuíferos poco productivos, se realizan pozos de diámetros pequeños que admitan bombas de 1 L/s o inferior, y/o la instalación de sondas de medición en continuo.

Una vez construido y entubado el sondeo es necesario hacer un ensayo de bombeo. A partir de estos ensayos se determinan los principales parámetros hidrodinámicos del acuífero, la conductividad hidráulica (k) y el coeficiente de almacenamiento (S).

El caudal y la duración del ensayo de bombeo depende del tipo de acuífero. A grandes rasgos, un ensayo de bombeo de uno a dos días de medición (descenso y recuperación) del nivel freático junto con el informe de interpretación de resultados cuesta entre 1.500 – 3.000 € dependiendo del caudal de bombeo.

Hay que tener en cuenta que los valores de permeabilidad y de coeficiente de almacenamiento no son homogéneos en todo el acuífero, su grado de variación depende de la tipología de acuífero. Es aconsejable hacer un ensayo de bombeo en cada piezómetro o punto de control que se va a proyectar o al menos en aquellos que representen diferentes circunstancias hidrogeológicas.

Tabla 7. Densidad mínima de puntos de medida de una red de control de calidad de aguas subterráneas para analizar su afección por los retornos de riego. La densidad depende del tipo de acuífero y de la vulnerabilidad de la zona a la contaminación por nitratos.

Tipología	Puntos de control de calidad			
	Densidad (ha por punto)		Naturaleza	Profundidad (pozos)
	ZV (*)	ZNV (**)		
Aluviales	500	1000	Pozos/ manantial	Totalmente penetrante
Otros cuaternarias	500	1000	Pozos/ manantial	Totalmente penetrante
Detríticos cuaternarios	no	1000	Pozos	Varios metros bajo nivel freático
Carbonatados	500	1000	Pozos/ manantial	Varios metros bajo nivel freático
Fracturados	1000	1000	Pozo/ manantiales	Varios metros bajo nivel freático
Regolitos	1000	1000	Pozos	Totalmente penetrante
Fm de baja permeabilidad	1000	2500	Pozo	Pozos poca profundidad

* Zona Vulnerable a la contaminación por Nitratos

** Zona No Vulnerable a la contaminación por Nitratos

La Tabla 7 resume de forma general la densidad mínima de puntos para una red de control de calidad de aguas subterráneas afectadas por retornos de riego. La densidad es función de la tipología del acuífero, de si la zona es vulnerable o no a la contaminación por nitratos. Así mismo se establece la naturaleza de los puntos de control y su profundidad en función del tipo de acuífero. En cualquier caso, e independientemente de la superficie de la zona a controlar, el mínimo número de puntos de control será 2, uno en la recarga y otro en la descarga de la zona regable.

4.2.2.2 Medidas de altura de agua

A partir de las lecturas piezométricas se puede analizar la evolución del acuífero en el tiempo, su variación estacional o anual, su relación con los retornos de riego, y sus posibles tendencias. La simple inspección visual de los piezogramas ya permite identificar ciertos problemas como la presencia de un desbalance entradas-salidas ocasionadas por sobreexplotación.

Las mediciones piezométricas también son necesarias si se desea hacer modelización del acuífero. Este tipo de herramientas son aconsejables en situaciones más complejas y, especialmente, si se desea comprobar el coste-eficacia de potenciales medidas agronómicas.

En situaciones más sencillas se pueden plantear modelos analíticos sencillos, aplicando formulaciones tradicionales (Darcy) para evaluar el flujo a través del acuífero. Para ello basta con reconocer la sección de paso (profundidad y anchura de la zona saturada que se determina a partir de la altura del nivel freático) junto con el valor de la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico se puede obtener a partir de dos piezómetros alineados en la dirección del flujo subterráneo (Figura 5).

4.2.2.3 Parámetros que determinan la calidad del agua en los pozos

Para el estudio de las repercusiones de los retornos de riego sobre la calidad de las aguas subterráneas es necesario medir el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y la salinidad (CE). También se incluye la medida de otros elementos contaminantes derivados de la agricultura como los plaguicidas. La determinación de los componentes mayoritarios (calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonato y bicarbonato, cloruro y sulfato) del agua permite determinar su origen, su composición química y evolución en el tiempo e identificar procesos de contaminación agrícola.

1. Para el caso del nitrógeno, en las aguas subterráneas, la especie dominante corresponde al nitrato (N-NO_3). Otras formas, también presentes, pero en menor cantidad y con analíticas que resultan más costosas corresponden al nitrito (NO_2) y, en aguas con carácter reductor, al amonio (N-NH_4). En la mayor parte de los acuíferos, la forma dominante es el nitrato, que es el que deberá medirse con mayor asiduidad. La norma actual (RD817/2015) de calidad establecida para el nitrato en las aguas subterráneas es de 50 mg/L, aunque el RD47/2022 que saldrá el año 2022 establece un nuevo límite de 37,5 mgNO_3/L para las aguas subterráneas y de 25 mgNO_3/L para aguas superficiales.
2. Para la medición del fósforo (P) en las aguas subterráneas es suficiente con analizar el fosfato (PO_4).
3. Sólidos en Suspensión Totales (SST) es otra medida interesante per se, indicadora de procesos de erosión de las bombas y equipos de extracción de agua.
4. La salinidad. Se mide a través de la CE.
5. Plaguicidas. Los mismos elementos definidos para las aguas superficiales. La norma de calidad establecida para los plaguicidas en las aguas subterráneas es de 0,1 $\mu\text{g/L}$ (plaguicidas individuales) y 0,5 $\mu\text{g/L}$ (suma).

6. Componentes mayoritarios del agua, que comprenden calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), sodio (Na^+), potasio (K^+), carbonato y bicarbonato (CO_4^- , HCO_3^-), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^-). Las relaciones iónicas permiten analizar la evolución de la composición química de las aguas y nos permite determinar su origen.

4.2.2.4 Diseño estadístico, frecuencia de muestreo

La frecuencia de medida de cada uno de los parámetros va a depender del tipo de acuífero, su vulnerabilidad y grado de contaminación y del calendario de riego en cada ciclo de cultivo. La Tabla 8 resume la frecuencia de muestreo mínima que debe de establecerse en una red de control de calidad de las aguas subterráneas. El nitrato deberá medirse como mínimo de forma mensual durante el ciclo de los cultivos. Nitrito, amonio y fosfato cada tres meses. Los plaguicidas se miden solo en acuíferos que sean muy vulnerables a la contaminación con una o dos medidas al año, a mediados y al final de la temporada de riego. Se deberá medir como mínimo en los pozos que sean más representativos de los retornos de riego (zona de salida de los flujos preferenciales).

Tabla 8. Frecuencia de muestreo mínima de los diferentes elementos en una red de control de calidad de aguas subterráneas en función del tipo de acuífero.

Tipología	Vulnerabilidad	Nivel piezométrico	NO ₃ /CE	NO ₂	NH ₄	PO ₄	Plaguic.	Comp may.
Aluviales	Alta	Diario	Mensual	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Anual/semestral	Anual/semestral
Otros cuaternarias	Alta	Diario	Mensual	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Anual/semestral	Anual/semestral
Detríticos	Media	Diario	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Anual/semestral	Anual/semestral
Carbonatados	Alta	Diario	Mensual	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Anual/semestral	Anual/semestral
Fracturados	Media-Alta	Diario	Trimestral	Anual	Anual	Anual	No	Anual/semestral
Regolitos	Alta	Diario	Mensual	Trimestral	Trimestral	Trimestral	Anual/semestral	Anual/semestral
Fm de baja permeabilidad	Bajo	Mensual	Trimestral	Anual	Anual	Anual	No	Anual/semestral

4.2.2.5 Interpretación de los resultados

El seguimiento de los indicadores de afección sobre las aguas subterráneas (piezometría y parámetros de calidad) va a permitir evaluar de forma cuantificada el impacto de la actividad agrícola y su evolución temporal. En este sentido, cabe señalar que el seguimiento de las aguas subterráneas es más representativo de las afecciones derivadas de los riegos a largo plazo, que aquellas destinadas al control de las afecciones a las masas de agua superficiales, dado que su dinámica es mucho más irregular y dependen de cuestiones tan importantes como el caudal del cauce receptor.

Estos resultados de la monitorización tienen un elevado valor ya que constituyen la base para tomar dediciones sobre medidas agronómicas enfocadas a reducir su impacto ambiental. Para ello se puede realizar de forma justificada el análisis coste-beneficio de distintos escenarios de operación mediante herramientas de modelización. De la misma manera, la monitorización puede constituir una herramienta muy útil para evaluar la eficiencia en el manejo del agua, de los nutrientes o de los plaguicidas.

La interpretación de los resultados de cantidad y calidad de las aguas subterráneas que reciben retornos de riego se realiza mediante:

1. Análisis de la evolución temporal del nivel piezométrico en los diferentes puntos de control. Los desbalances en la evolución de los niveles piezométricos en la entrada y la salida de la zona acotada puede indicar una sobre explotación del acuífero.
2. Análisis de las concentraciones de $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, NH_4 y plaguicidas, así como de su evolución temporal. Cuando se sobrepasen los valores máximos establecidos por la normativa vigente hay que plantear medidas correctoras para reducir estas concentraciones. Además, la evolución temporal de la concentración de los diferentes parámetros analizados indicará si la actividad del riego tiene impacto ambiental o no en el acuífero. El crecimiento de las concentraciones en el tiempo indicará que estamos teniendo problemas medioambientales y que hay que establecer medidas correctoras para optimizar el riego y la fertilización de los cultivos.

5. Sensores disponibles en el mercado para realizar las medidas

5.1 Sensores para medida de flujo de agua (caudal o volumen)

Los flujos de agua relacionados con las Comunidades de regantes pueden atender entre otras a las siguientes clasificaciones:

1. En función de la localización podemos encontrar flujos de entrada y de salida.
2. En función del tipo de conducción o transporte del agua podemos encontrar:
 - 2.1. Cauces abiertos como acequias (revestidas o en tierra) o desagües abiertos.
 - 2.2. Flujo en conducciones cerradas no presurizadas (acequias y desagües enterrados).
 - 2.3. Flujo en conducciones cerradas presurizadas (tuberías presurizadas provenientes de flujo o almacenamientos superficiales o de pozos).
 - 2.4. Flujo difuso, presente sobre todo en salidas de agua por percolación profunda y que acaban tanto en cauces abiertos como en acuíferos.

5.1.1. Sensores de medida de flujos de agua en cauces abiertos

Para la selección del emplazamiento del medidor de caudales cualquiera que sea el tipo utilizado, se han de tener en cuenta los siguientes aspectos según la normativa UNE-ISO 748 (2009):

- El canal en el emplazamiento de medida debería ser recto y de sección transversal uniforme y con pendiente para minimizar la distribución irregular de velocidad. Cuando la longitud del canal es limitada, se recomienda que la longitud aguas arriba del medidor sea de al menos el doble que la longitud aguas abajo.
- Las direcciones del flujo en todos los puntos de anchura sobre la vertical deberían ser paralelas entre sí y con ángulos rectos a la sección de medida.
- El lecho y márgenes de los canales deberían ser estables y bien definidos en todos los tramos del flujo para facilitar la medida exacta de la sección transversal y asegurar la uniformidad de condiciones durante y entre medidas de caudal.
- Las curvas de la distribución de velocidades deberían ser regulares en los planos vertical y horizontal de medida.

- Las condiciones en la sección y en su vecindad deberían ser tales como para imposibilitar que puedan producirse cambios en la distribución de velocidad durante el periodo de medida.
- Deberían evitarse emplazamientos que presenten torbellinos, flujo opuesto o aguas estancadas.
- La sección de medida debería ser claramente visible en toda su anchura y libre de árboles, crecimiento vegetal acuático u otros obstáculos.
- La medida de caudal desde puentes puede ser, a veces, una forma más segura y conveniente de muestrear anchura, profundidad y velocidad. Cuando el aforo se realiza desde un puente con pilares separados, cada sección del canal debería medirse por separado. Debería tenerse especial cuidado en determinar la distribución de velocidad cuando las aberturas del puente están sobrecargadas u obstruidas.
- La profundidad del agua en la sección debería ser suficiente en todos los tramos para proporcionar una inmersión eficaz del medidor de caudal o del flotador, cualquiera que sea utilizado.
- Si el emplazamiento es para establecerse como una estación permanente, debería ser fácilmente accesible en todo momento con todo el equipo necesario de medida.
- La sección debería emplazarse lejos de compuertas y desembocaduras, si su funcionamiento durante una medida es probable que origine condiciones de flujo inestables.
- Deberían evitarse emplazamientos donde hay flujo convergente o divergente.
- En aquellos casos donde es necesario realizar medidas en la proximidad de un puente, es preferible que el emplazamiento de medida esté aguas arriba del puente. Sin embargo, en ciertos casos y donde la acumulación de hielo, troncos o arrastres tiene tendencia a ocurrir, es aceptable que el emplazamiento de medida sea aguas abajo del puente.
- La medida del caudal bajo una capa de hielo se expone a la norma ISO 9196. Para corrientes sometidas a la formación de capas de hielo, pueden utilizarse los requisitos de medida especificados en esta norma europea durante la estación en que el agua esté libre de hielo.
- En ciertas condiciones de caudal o nivel del agua, puede resultar necesario realizar mediciones en otras secciones que el emplazamiento original elegido. Esto es completamente aceptable si no hay pérdidas o ganancias no aforadas en el cauce en el

tramo intermedio y con tal de que todas las medidas de caudal puedan estar relacionadas con cualquier valor de nivel de agua registrado en la sección principal de referencia.

El caudal se estima a través de la medida de la velocidad del agua y de la sección del flujo. Para medir la velocidad del agua hay dos alternativas:

1. Medidores de velocidad basados en el flujo crítico. Estos medidores se basan en el principio hidráulico de que cuando se produce el flujo crítico existe una relación única y directa entre altura de agua y velocidad. Por lo tanto, **midiendo la altura de agua** en un punto determinado conocemos la velocidad y, conociendo además la sección, obtenemos el caudal. Se trata de la infraestructura más habitual para medir el caudal en los cauces de drenaje a cielo abierto porque se adapta muy bien a las condiciones de campo, su funcionamiento es muy satisfactorio y las necesidades de mantenimiento son asequibles para las comunidades de regantes. Estos medidores requieren la construcción de una sección de control donde se estrecha el cauce para producir el flujo crítico y, además, requieren la instalación de un sensor que mida la altura de agua.

- 1.1. Sensores de medida de altura de agua para cauces superficiales. Existen varios tipos de sensores y multitud de marcas que se dedican a distribuirlos y comercializarlos. La Tabla 9 resume las ventajas e inconvenientes de los tipos de sensores analizados.

- 1.1.1. El modelo más sencillo es el **limnógrafo** que es un aparato de medición económico que marca la altura máxima alcanzada por el agua en caso de cambios del nivel. Utiliza un principio sencillo de marcación en color. El limnógrafo de valor límite (Figura 7A) se utiliza en aguas superficiales, en zonas de inundación de ríos y de la costa a efectos probatorios y para obtener datos exactos con el fin de evaluar crecidas posteriores. Sin embargo, requiere que un operario tome lecturas a intervalos regulares (diario, semanal, etc.) para conocer la dinámica del flujo. Por otra parte, existen modelos para la medición en continuo mediante sensores de presión o de flotador.

- 1.1.2. **Sensores de altura de presión:** poseen una membrana que se deforma con la presión del agua. Pueden ser sondas capacitivas o piezorresistivas (transductores de presión) (Figs. 7B y 7C). Estas sondas son económicas, duraderas, pero presentan riesgo de sedimentación, por lo que requieren de un mantenimiento periódico. El sensor se puede conectar a telemetría para poder hacer un monitoreo continuo y un adecuado análisis de las variaciones de los niveles a lo largo del tiempo.

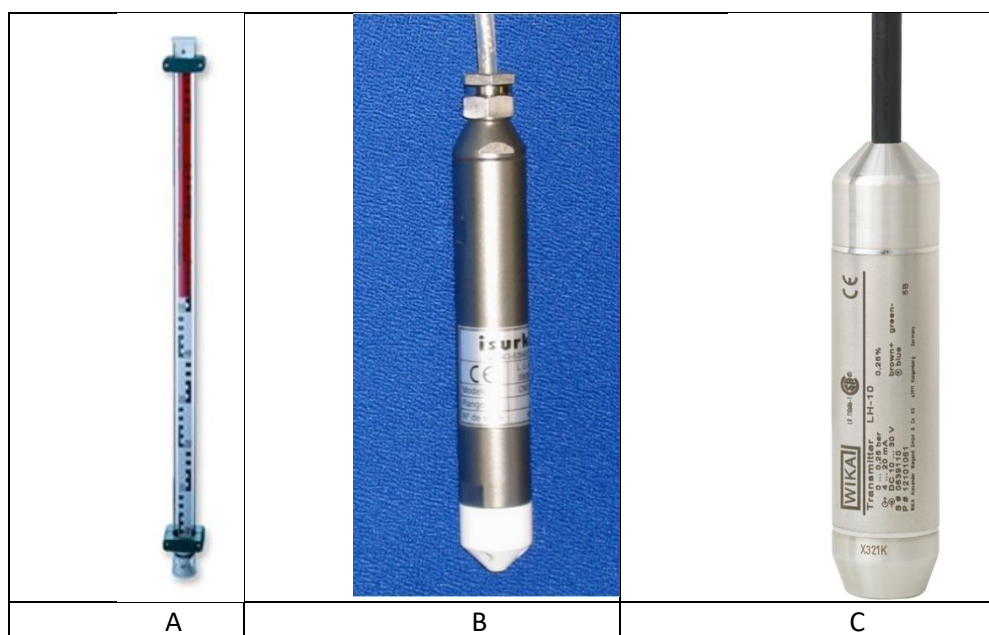


Figura 7. Dispositivos para la medida de altura de agua en cauces superficiales: (A) limnógrafo de valor límite, (B) sonda capacitiva, (C) sonda piezorresistiva. Fuentes: <https://www.ott.com/> <https://www.isurki.com/> <https://www.wika.es/>

Tanto los limnógrafos como los sensores de altura de presión se instalan en un pozo comunicado con la sección en la que se quiere medir la altura de agua (pozo de amortiguación). Hay que tener precaución con las secciones con flujos de agua a gran velocidad en los que puede ser necesario instalar tubos estáticos al final de la cañería de toma para evitar el descenso del nivel de agua en el pozo de amortiguación. El pozo de amortiguación se utiliza con dos fines: uno para facilitar el registro exacto del nivel de agua sin problemas de oleaje o remolinos y dos para albergar el sistema de flotador del elemento de medida. En caso de registrar la altura del agua con un instrumento, se aconseja la instalación de una escala limnimétrica en el canal con la altura en el interior del pozo de amortiguación para poder detectar problemas u obturaciones. La dimensión de este pozo de amortiguación dependerá del método de medida de la altura de agua utilizado por el instrumento, de forma que si registra la altura de agua mediante un flotador el pozo tenga un tamaño suficiente para dejar holgura a dicho flotador en todas las posiciones. Estos equipos pueden ser instalados directamente en el fondo de un embalse o canal, aunque se ven afectados por las variaciones de temperatura y se dañan a temperaturas de congelación. Por ello, la actuación más adecuada para este tipo de sensores es instalarlos en un pozo de amortiguación realizado al lado de la sección en la que se desea medir la altura o dentro de canal, pero protegidos para evitar que se ensucien con restos que circulen por el canal o desagüe.

1.1.3. Medición de nivel sin contacto. Se utilizan dos tecnologías principalmente: la tecnología ultrasónica y el radar. Ambas tecnologías tienen aplicaciones similares, pero hemos de tener en cuenta una serie de aspectos a la hora de elegir la que más convenga para cada aplicación. Ambas tecnologías son similares en cuanto al principio de funcionamiento, emiten ondas (ultrasónicas o microondas) que se reflejan en el cauce del que se quiere medir el nivel. Los sensores ultrasónicos emiten ondas (ultrasonidos) que se reflejan cuando encuentran un cambio de densidad. El tiempo que tarda la onda emitida en volver al sensor es medido por el transmisor y éste se utiliza para medir el nivel. Necesitan de un medio para propagarse. Este medio normalmente es el agua o la atmósfera. Si el medio varía por cambios de temperatura, presión, composición, densidad, la velocidad de propagación del sonido puede variar (esto es más relevante a medida que la distancia entre el equipo y la superficie del agua es mayor de 3 m). La tecnología radar emite microondas que son ondas electromagnéticas que no necesitan de ningún medio para propagarse. Pueden propagarse en el vacío. Por esta razón la tecnología radar no se ve afectada por variaciones de temperatura y presión (densidad) en el medio. La medición de altura de agua con estos sistemas se realiza sin contacto entre el sensor y la superficie del agua.

Tabla 9. Ventajas e inconvenientes de los medidores de altura de agua y de velocidad.

Sensores	Ventajas	Inconvenientes	Precio (€)
Molinos o molinetes*	Medida fiable y robusta Funcionamiento sencillo	Medidas puntuales Laborioso (método manual) Necesidad de personal	3.000
Limnógrafos	Funcionamiento sencillo Resultado inequívoco No le afectan ni las olas ni la suciedad	Laborioso y necesidad de personal (cuando se utiliza el método manual)	1.100 €
Sondas piezorresistivas	Económicas Duraderas	Riesgo de sedimentación	600
Sondas capacitivas	Económicas Duraderas	Riesgo de sedimentación	600
Ultrasonidos	Buen precio	Al estar al aire libre se ve influenciado por los cambios de temperatura. El error puede llegar a ser de centímetros	250 – 1.000
Radar	No se ve afectado por la temperatura Están dando buenos resultados para medir el nivel del agua Buen precio	Solamente miden la velocidad superficial del cauce.	700 – 1.000

*Medidores de velocidad directa

En este tipo de sensores (ultrasonidos y radar) hay que tener en cuenta que las señales emitidas por los mismos se van ensanchando conforme se alejan del aparato, por lo que hay que tener muy presentes las recomendaciones del fabricante en cuanto a distancias y posición de instalación, además de evitar obstáculos en el camino de la señal como vegetación, postes o pequeñas obras civiles que proporcionen errores de medida.

1.2. Secciones de control. Aunque normalmente estas secciones se diseñan y ejecutan de obras in situ, también hay otras opciones comerciales que venden la sección prefabricada para instalarla en campo (resalte de solera o RGB, Parshall, de garganta cortada o sin cuello). Todas estas secciones de control requieren la medida de la altura de agua. La Tabla 10 resume las ventajas e inconvenientes de estas secciones de control.

Tabla 10. Ventajas e inconvenientes de las infraestructuras de medida de caudal más comunes basadas en el flujo crítico

Tipo de Secciones de control	Ventajas	Inconvenientes
Medidores a régimen crítico: Aforador Parshall, Aforador sin cuello, Aforador de garganta larga.	<ul style="list-style-type: none"> -Permite medir con precisión tanto caudales pequeños como medianos y grandes. -Se mantiene libre de obstrucciones gracias a su geometría y la velocidad en la garganta. -El caudal no está influenciado por la velocidad de llegada del flujo. -Las pérdidas de carga son insignificantes frente a otras estructuras. -Su uso está recomendado tanto para el aforo de canales de riego, canales de drenaje y como de ríos pequeños. 	<ul style="list-style-type: none"> -Son más caros en su construcción que los vertederos. -No pueden ser usados en lugares cercanos a las derivaciones. -El flujo de entrada debe ser uniforme y la superficie del agua relativamente suave -Sus mediciones son satisfactorias solo si la construcción es cuidadosa y exacta. Si no se construye con las dimensiones exactas la tabla de magnitudes no es fiable. -Los pequeños aforadores requieren una pequeña pérdida de carga para la medición de flujo crítico; aunque las calibraciones de flujo sumergido son confiables no es recomendable diseñar aforadores para flujo no crítico.

2. Medidores directos de la velocidad. Requieren establecer las dimensiones de la sección de medida para calcular el caudal. Para medir la velocidad, hay que tener en cuenta que ésta es una medida variable en la sección del flujo. Así, su distribución es como se presenta en la Figura 8.

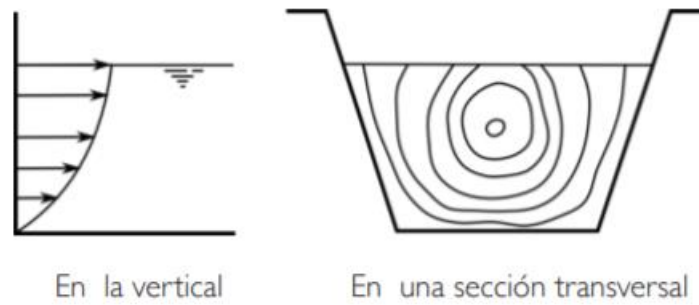


Figura 8. Variabilidad de la velocidad del flujo en la sección de control. Fuente: Pedroza 2017

2.1. Medidor tipo Molinete o Micro-Molinete. Es un instrumento usado para medir la velocidad del agua en un canal abierto. El principio de funcionamiento se basa en la proporcionalidad entre la velocidad del agua y la velocidad angular resultante del rotor. La velocidad del agua se mide en diferentes puntos de la corriente poniendo el molinete y contando el número de revoluciones del rotor durante un intervalo de tiempo determinado. Los molinetes y micro-molinetes se clasifican en dos tipos principales, los medidores con rotores de eje vertical y con rotores de eje horizontal. Las características más destacadas de estos dos tipos se resumen a continuación:

2.2.

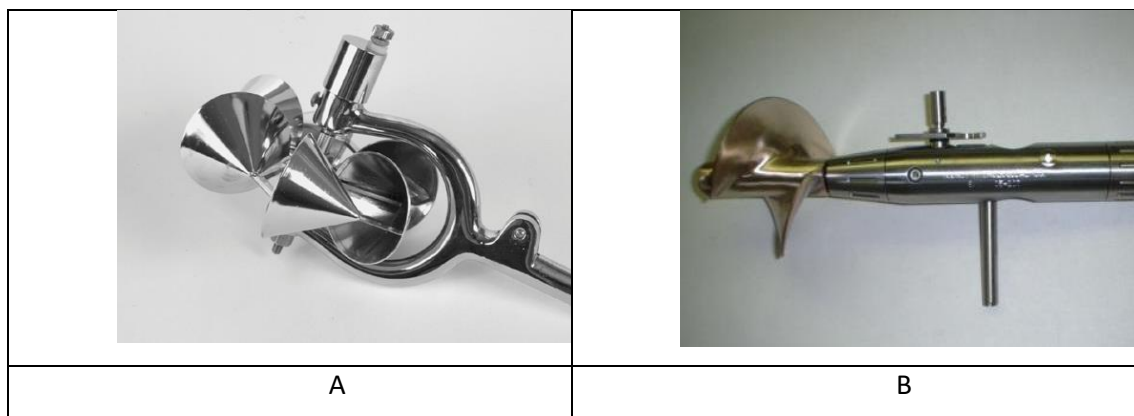


Figura 9. Molinetes de tipo vertical (A) y horizontal (B). Fuente: <https://grupopalcesas.com/>

Eje vertical (o tipo Gurley) (Figura 9A): Opera en velocidades más bajas que los de eje horizontal; los cojinetes están bien protegidos contra el agua fangosa; el rotor se puede reparar en el campo sin afectar la calibración; utiliza un rotor único que sirve para toda la gama de velocidades.

Eje horizontal (universal o tipo Ott) (Figura 9B): Debido a la simetría axial con la dirección del flujo, el rotor perturba el flujo menos que los de eje vertical; por la forma del rotor, es menos probable que se enrede con los desechos que arrastre la corriente. La principal desventaja de este tipo de equipos es que su utilización es laboriosa, pues se requiere de medir a varias alturas y en diferentes zonas del cauce para obtener un valor estimado de velocidad del caudal en el cauce (ejemplo práctico de medición: https://hidrologia.usal.es/practicas/molinete_metodo.pdf). Además, su elevado precio (alrededor de 3.000 €) hace que su utilidad para el control de retornos de riego se vea comprometida. Aun así, es importante disponer de alguno de estos equipos para realizar comprobaciones del buen funcionamiento de los equipos automáticos

2.3. **Caudalímetros** automáticos portátiles o permanentemente instalados en las secciones de control. Estos sensores pueden ser de **ultrasonidos o radar** (Figura 10). Los equipos que utilizan tecnología RADAR se instalan por encima de la superficie del agua y miden la velocidad del flujo utilizando la tecnología de radar y el nivel del agua empleando un sensor de nivel (ultrasónico, radar o piezoresistivo). El caudal se calcula aplicando la ecuación de continuidad: $Q = v \times A$. Durante cada ciclo de medición, se realizan miles de mediciones de velocidad que se procesan para dar una lectura extremadamente precisa de velocidad media empleando un procesador digital de señal dedicado que realiza un análisis espectral en tiempo real.



Figura 10. Caudalímetros con tecnología RADAR (izquierda) y de ultrasonidos (derecha). Fuentes: <https://calidad.mejoras-energeticas.com/producto/caudalimetro-para-agua-raven-eye/> <https://www.lanasarrate.es/>

Los equipos radar tan solo miden la velocidad en la superficie del cauce, pero no indican la velocidad a otras profundidades, mientras los equipos que miden

utilizando ultrasonidos (efecto doppler) integran la velocidad de todo el perfil vertical. Por otro lado, su mantenimiento es más costoso (se ensucian, se ven taponados por algas, etc.).

El precio de los sensores de ultrasonidos está entre los 600 y 700 €, mientras que los sensores con tecnología radar pueden alcanzar los 1.000 €. Estos equipos no deben ser colocados cuando existan obstáculos aguas arriba del medidor o variaciones en el fondo del canal. Cuando existan muchos sólidos en suspensión y velocidades bajas, no se aconsejan estos sensores ya que se acumulan sedimentos sobre ellos que afectan a las mediciones. Si la corriente presenta muchas turbulencias, las burbujas producidas por éstas también afectan a las mediciones realizadas.

A modo de resumen, la Tabla 11 presenta algunos ejemplos de sensores disponibles en el mercado para la medida de caudal y nivel de flujo de agua en cauces de drenaje superficial.

Tabla 11. Resumen de los principales sensores existentes en el mercado para la medida del caudal y nivel del flujo de agua.

Medidas	Técnicas	Modelo	Rango de medida	Interfaz	Website
Velocidad del flujo	Molinos o molinetes	Eje vertical	0,03 – 7,6 m/s	Contador de pulsos temporizado	https://grupoalcesas.com/
		Eje horizontal	0,025 – 2 m/s		
Caudal	Radar	Raven-Eye®	0,15 – 9 m/s	Puerto RS485 con protocolo Modbus ASCII	https://calidad.mejoras-energeticas.com/producto/caudalimetro-para-agua-raven-eye/
		RG30-A	0,08 – 16 m/s	RS485, SDI-12	https://www.sommer.at/
		HPT604	0 – 500 m	RS485, RS232, Hart	https://www.holykell.com/
Nivel lámina de agua	Presión	HPT613-C	0 – 200 m	RS485, HART	
		PTM	0 – 10 m	SDI-12	https://www.sommer.at/
		LH10	0 – 300 m	4 – 20 mA	https://www.wika.es/
		CNC4200-MT3	0 – 20 m	4 – 20 mA	https://www.isurki.com/
		Orpheus min	0 – 100 m	Memoria interna (IrDA)	https://www.otl.com/
		PLS	0 – 100 m	SDI-12, 4 – 20 mA	
	Radar	RL-15	0 – 15 m	4 – 20 mA	https://www.sommer.at/
		RLS	0,4 – 35 m	SDI-12, RS485, 4 – 20 mA	https://www.otl.com/
	Ultrasonidos	XRS-5 combinado con medidor LUT440	0 – 8 m	HART, SIMATIC PDM, Emerson AMST, FC375/475, FDTs y navegador web	https://www.lanasarrate.es/
	Limnógrafo	EP 1350	0 – 20 m	GSM 2G/ 3G Cuatribanda	https://www.tecmes.com/

5.1.2. Sensores de medida de los flujos de agua en canalizaciones cerradas no presurizadas

En las conducciones cerradas no presurizadas, al igual que en las tuberías en las que se pueden dar condiciones de media carga, los caudalímetros de elección son los de ultrasonidos. Estos equipos son los mismos que los que se instalan en acequias o conducciones abiertas, que se han mostrado en el epígrafe anterior. En este tipo de conducciones, estos equipos son capaces de detectar la altura y velocidad del agua y proporcionar medidas de caudal de forma adecuada tanto en el caso de que la tubería o acequia se encuentre parcialmente llena como en tuberías que funcionen en ocasiones a presión o totalmente llenas.

5.1.3. Sensores de medida de los flujos de agua en conducciones cerradas presurizadas

Para la medida de volúmenes de agua en conducciones presurizadas se utilizan los contadores, unidos o no a una válvula hidráulica. Los contadores pueden ser mecánicos, ultrasónicos o electromagnéticos. Estos contadores funcionan como totalizadores del caudal, salvo que dispongan de un equipo electrónico de registro de valores en el que se integren datos de tiempo y volumen medido, con los que se puede obtener el caudal circulante en cada momento (Figura 11).



Figura 11. Caudalímetro para conducciones cerradas presurizadas con tecnología para registrar tiempo y caudal. Fuente: <https://www.contazara.es/>

Los contadores mecánicos disponen de partes móviles que, al ser accionadas por el agua, hacen girar una turbina o hélice y ese giro se transforma en medida de caudal. Los contadores

ultrasónicos y electromagnéticos no disponen de estas partes móviles y el agua pasa sin obstáculos por el interior de la tubería. Debido a la presencia de estas partes móviles, los contadores mecánicos necesitan de un sistema de filtrado que evite el paso de sólidos que puedan atascarse o dañar las hélices o turbinas. Además, necesitan de un tramo de estabilización del flujo para que el caudal se mida correctamente. Dentro de los equipos ultrasónicos, sería interesante disponer de medidores portátiles para conocer en caudal que circula en un momento dado por una conducción en la que no hay instalados otros equipos de medida.

Los contadores han de ser adecuados para el caudal que se espera medir en cada punto. Cuando se selecciona un modelo de contador, es importante que sea adecuado para aguas sucias, es decir, aguas que no han sido filtradas y tratadas.

Los contadores han de instalarse siempre siguiendo las instrucciones del fabricante en cuanto a tramos rectos, filtros, dirección del flujo, posición evitando puntos altos, etc... Se instalarán mediante bridas u otros elementos que permitan su rápida sustitución y lo más cerca posible de la captación del agua, evitando que entre la captación y el contador existan elementos de extracción de agua tales como grifos.

En el caso de instalar contadores que permitan el conteo regresivo, se recomienda la instalación de una válvula anti-retorno aguas abajo del contador o cualquier otro sistema que impida el retorno de agua. El contador se instalará en un lugar en el que sea fácil el acceso a la lectura del mismo.

5.1.4. Sensores de medida de los flujos en medio difuso o flujos subterráneos

Los sensores de altura piezométrica se instalan en pozos, cuya construcción requiere de personal y equipamiento especializado, por lo que se sugiere contactar con una empresa que se dedique a llevar a cabo este tipo de obras.

A partir de estas lecturas piezométricas se puede analizar la evolución del acuífero en el tiempo, su variación estacional o anual, su relación con los retornos de riego, y sus posibles tendencias. La simple inspección visual de los piezogramas ya permite identificar ciertos problemas como la presencia de un desequilibrio entre las entradas y las salidas ocasionadas por sobreexplotación.

La medida del nivel piezométrico se puede realizar manualmente mediante sondas de nivel de carrete (Figura 12). Estas sondas son sencillas de manejar y constan de un electrodo en el extremo de una cinta métrica que al tocar el agua emite una señal acústica o luminosa. El precio de las sondas suele superar los 500 € y varía en función de la longitud de la cinta métrica (más común 20-500 m).

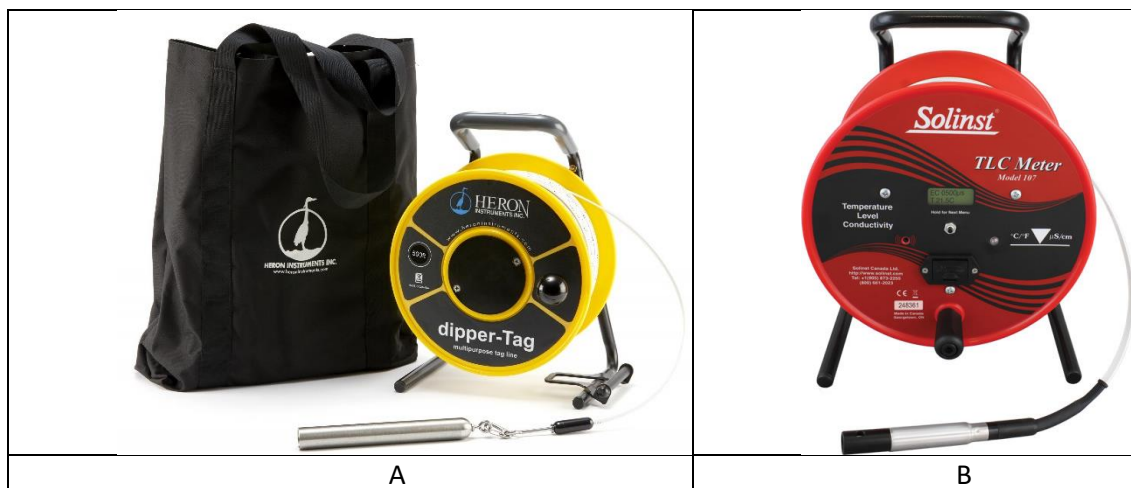


Figura 12. *Sondas de nivel de carrete para medición de nivel piezométrico. Fuentes: <https://heroninstruments.com/> <https://www.solinst.com/>*

No obstante, para frecuencias de medida muy continuas, este sistema supone un inconveniente dado que requiere de un operario que haga las lecturas manualmente. Existen sondas automáticas de nivel piezométrico (Figura 13). Su funcionamiento y modelos son similares a los que se emplean para la medición de la altura de la lámina de agua en corrientes superficiales (ver Figura 7). Son sondas que miden la presión de la columna de agua. En el mercado existen infinidad de modelos y marcas con precios que van desde los 300 € hasta más de 3000 €, si incluyen la medida de otros parámetros como temperatura, conductividad, pH y otros parámetros químicos. Algunas de estas sondas poseen sistemas de transferencia de datos GMS/GPRS en tiempo real y otras almacenan la información (datalogger), a la cual se accede mediante un conector con cableado que no requiere extraer la sonda del punto de medida, o mediante su extracción y conexión al PC. La frecuencia de medida se configura y los rangos dependen de los modelos. Los más sencillos pueden medir con una frecuencia mínima de 0,5 s. La precisión de la medida depende del modelo y de la altura de lámina que puede medir el sensor. La mayor parte de estas sondas están provistas de una batería interna (en algunos casos es recargable) cuya duración depende del número de medidas.



Figura 13. *Sondas automáticas para medición de nivel piezométrico. Fuentes: <https://sp.eijkelkamp.com/> <https://www.solinst.com/>*

5.2 Sensores para determinar la calidad del agua

5.2.1. Sensores para determinar la calidad del agua en flujos superficiales (abiertos, cerrados y presurizados)

Para medir la calidad del agua en las estaciones de control de calidad hay varias alternativas cuya elección dependerá del presupuesto del proyecto, de las necesidades de los elementos a analizar y de la disponibilidad de medios humanos para su supervisión.

Hay que tener en cuenta que se debe cumplir una serie de precauciones para la conservación de las muestras, en función de lo que se va a medir y de las condiciones del cauce, para preservar los analitos de interés hasta su análisis en laboratorio. Las sales, en general no requieren medidas especiales de conservación. El N-NO_3 solo sufre alteraciones durante el transporte en presencia de cierta carga orgánica, aunque es frecuente tomar medidas para su conservación (acidificación). Las precauciones son más importantes para el P (uso de botes de vidrio y conservación en frío) y mucho más estrictas en el caso de otros contaminantes, en concreto los plaguicidas.

El análisis de las muestras de agua se realizará en laboratorios acreditados. Existen diversas empresas y laboratorios oficiales que realizan determinaciones de varios tipos. Por ejemplo, un análisis completo de agua suele ofrecer pH, conductividad eléctrica, concentraciones de cationes (Ca, Mg, K y Na), de aniones (nitratos, cloruros, sulfatos, fluoruros, carbonatos y bicarbonatos) y otros elementos (P, B, Fe, Cu, Mn, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn y Hg). El coste de estas analíticas asciende a 50 € por muestra, aproximadamente. En el caso de que se deseen determinar compuestos plaguicidas, el coste se incrementa en gran medida, pudiendo superar

los 800 € por muestra. Los laboratorios tienen, normalmente, sus sistemas de control de calidad, pero es interesante mantener un sistema de control independiente. Para ello se pueden preparar dos tipos de muestras: “duplicados”, dos muestras que contienen la misma agua para verificar que dan resultados similares, y “muestras preparadas” con concentraciones definidas para comprobar que dan el resultado previsto.

Existen diversos medidores de pH y conductividad eléctrica portátiles que se pueden transportar al campo y permiten medir los valores de estos dos parámetros directamente en el agua *in situ*. Los modelos más sencillos son kits que cuestan alrededor de 100 €, mientras que equipos más robustos superan los 500 €. Además, existen sondas multiparamétricas que permiten medir varios parámetros (pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, etc.) simultáneamente, pero su coste supera holgadamente los 3.000 €, pudiendo alcanzar los 22.000 € (modelo con 9 sensores) dependiendo de la configuración de sensores solicitada.

A continuación, se detallan las posibilidades de cómo realizar el muestreo:

1. Muestreo manual. A la hora de recoger las muestras manualmente deben tomarse una serie de precauciones (concretadas en manuales específicos⁸); cualquier plan de muestreo debe contener unas indicaciones escritas de las pautas de muestreo. Dependiendo del parámetro a medir, se empleará un recipiente de un determinado volumen mínimo y fabricado en un determinado material. Así, por ejemplo, se emplearán botes de plástico de 100 mL para tomar muestras para medir conductividad eléctrica y nitrato, mientras que serán de 1,5 L para determinar sólidos solubles totales (Figura 14A). Estos recipientes cuestan entre 1 y 2 € por unidad. En el caso de que se desee determinar fósforo (ya sea total o disuelto), se empleará un recipiente de vidrio color ámbar de 200 mL, mientras que, si se desea determinar concentraciones de plaguicidas, se utilizarán recipientes de este mismo material, pero de una capacidad de 1 L (Figura 14B). Estos envases cuestan entre 2 y 5 € por unidad, pero, con un lavado adecuado, pueden reutilizarse.

⁸ Protocolo de técnicas analíticas y de muestreo de contaminantes emergentes y prioritarios.
<https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/protocolo-de-tecnicas-de-muestreo-y-tecnicas-analiticas-de-contaminantes-emergentes-y-prioritarios>



Figura 14. Envases de plástico (A) y de vidrio ámbar (B) para la recogida manual de muestras de agua.

Fuente: <https://www.labcomercial.com/es/>



Figura 15. Toma muestras automático con programador. Las muestras hay que recogerlas de forma manual y enviarlas al laboratorio.

2. Muestreador automático de muestras de agua (Figura 15). Se trata de equipos que recogen una muestra de forma automática con una periodicidad programada. Estas muestras deben transportarse al laboratorio para su análisis. Un tomamuestras portátil y sus accesorios (frascos, boquilla de succión, etc.) cuesta alrededor de 3.000 €.
3. Analizador automático. Se trata de equipos que además de tomar la muestra automáticamente la analizan in situ. Pueden analizar diferentes elementos:

3.1. Sondas de medida en continuo de la cantidad de **nitratos** (Figura 16). Algunas de ellas se basan en tecnologías ópticas de adsorción de la luz ultravioleta y permiten detectar niveles de nitrato de tan solo 0,05 mg/L. El cálculo de la concentración de nitratos se realiza a partir del espectro de absorción filtrado con compensación de las interferencias de turbidez y materia orgánica. El sensor consta de elementos ópticos clave que incluyen una lámpara de flash Xenón, un sistema de lentes, filtros y fotodiodos. La concentración de nitratos es proporcional a la intensidad de la luz remanente que ha pasado a través del medio. Este sensor utiliza la absorción a una longitud de onda de 212 nm para la detección de $\text{NO}_3\text{-N}$. Además, utiliza un procesamiento avanzado de la señal combinado con la absorción a 254 nm y 360 nm para la corrección de componentes orgánicos y turbidez. El coste de estos sensores para medida en continuo de nitratos es de 6.000 € por unidad.



Figura 16. Sensores para la detección en continuo de nitratos en agua. Fuentes: <https://www.ott.com/>
<https://www.seabird.com/>

3.2. Medidas de **iones selectivos**. Estos electrodos están más preparados para su uso en laboratorio por lo que requieren de una revisión y calibración periódica, con su consiguiente coste de mantenimiento. Sin embargo, existen en el mercado sondas multiparámetro que pueden incorporar sensores ópticos y electrodos para medir este tipo de iones directamente en el cauce de agua. Existen modelos de uso manual (Figura 17A) y otros que, a pesar de que se utilicen generalmente para medir puntualmente en un cauce, pueden quedar permanentemente instalados y medir en continuo diferentes iones en las aguas (Figura 17B y 17C). Generalmente, los parámetros que permiten monitorizar son los siguientes: temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, turbidez, profundidad, clorofila a, algas verdes/cianobacterias, rodamina,

amonio, nitrato y cloruro. Los tres últimos mediante sensores de iones selectivos, mientras que el resto se mide empleando otras tecnologías.

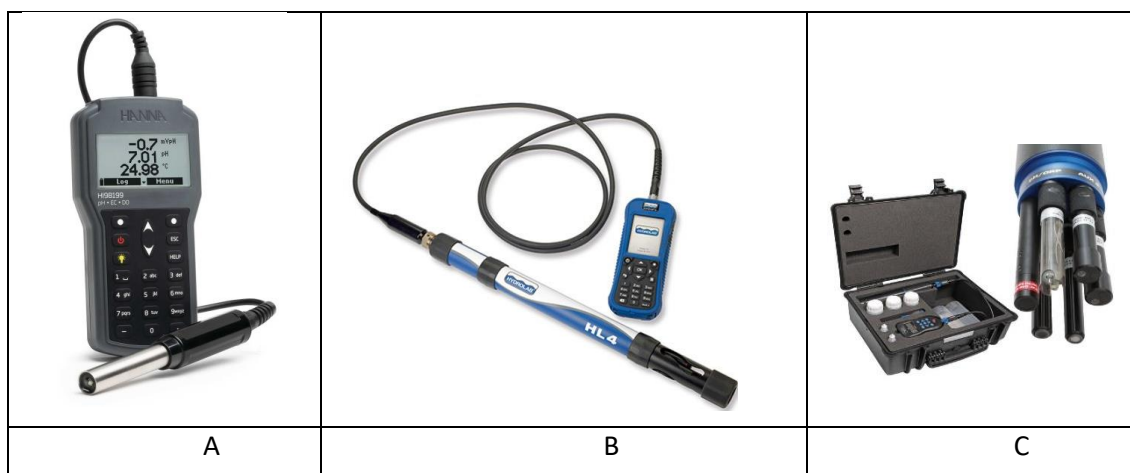


Figura 17. Sondas multiparámetro para medición puntual (A) y mediciones tanto puntuales como continuas (B y C). Fuentes: <https://www.hannainst.es/> <https://www.ott.com/> <https://www.aquaread.com/>

El usuario puede escoger los sensores que desea integrar en la sonda (dependiendo del tipo de sonda y la marca, la cantidad de sensores varía) y, por tanto, la sonda ofrecerá datos sobre los parámetros elegidos. Dependiendo de la casa comercial y del tipo de sensor (y de sonda), el precio de estas sondas multiparámetro oscila entre 800 y 22.000 €. Es necesario indicar que estas sondas requieren de una calibración múltiple para proporcionar datos fiables. En general, las casas comerciales que las distribuyen, ofrecen también los kits de calibración. También es necesario destacar que estos equipamientos son muy sensibles y, en el caso de funcionamiento erróneo de un sensor, todo el sistema puede verse afectado. Por lo tanto, en la medida de lo posible, se recomienda emplear equipos que midan solamente un parámetro antes de emplear sondas multiparámetro, no solo por cuestión de costes sino también por facilidad de manejo, interpretación de los datos recogidos y mantenimiento de los equipos instalados.

3.3. Medidas de **conductividad eléctrica**. La medida de CE se realiza mediante una sonda amperométrica (testers), o sonda potenciométrica (portátiles o de sobremesa) (Figura 18). La medida de CE se obtiene aplicando un voltaje entre 2 electrodos y midiendo la resistencia de la solución. De este modo, las soluciones con CE altas producen corrientes más altas. Existen numerosos modelos en el mercado y su precio varía entre los 220 € (“tester” portátil, Figura 18A) y 1.600 € (sondas para medir en continuo, Figura 18B).

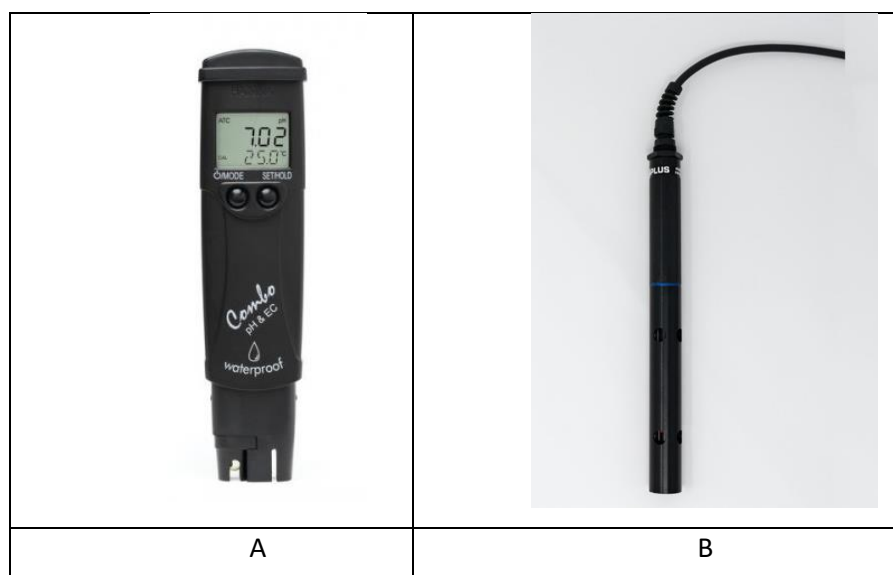


Figura 18. Equipos para medida de conductividad eléctrica del agua: “tester” para medición puntual (A) y sonda para mediciones continuas (B). Fuentes: <https://www.hannainst.es/> <https://www.aquaread.com/>



Figura 19. Sensor de Clorofila a AlgaeTorch (Metrohm, www.metrohm.com).

La Figura 19 presenta un sensor de clorofila a comúnmente utilizado para caracterizar la cantidad de este compuesto en comunidades de regantes que utilizan aguas procedentes de EDAR.

La Tabla 12 presenta un grupo de sensores de entre los que se encuentran disponibles actualmente en el mercado para determinar los diferentes parámetros que definen la calidad del agua. Para cada variable analizada, se presentan el principio de medida del sensor, los modelos más comunes, las características de manejo y la página web en la que se pueden encontrar más detalles acerca de cada sensor.

Tabla 12. Resumen de los principales sensores existentes en el mercado para la medida de parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Técnicas	Modelo	Interfaz	Website
Conductividad eléctrica	Amperometría	HI98130 y similares	Uso manual	https://www.hannainst.es
	Potenciometría	HI98192 y similares		
	Luminiscencia	Aquaplug	Uso manual y datalogger incorporado	https://www.aquaread.com/
	Potenciometría	AquaSensor	4 – 20 mA; Modbus RTU; RS232	www.thermofisher.com
	Potenciometría	OTT CTD	Datalogger incorporado	https://www.ott.com/
Sólidos disueltos totales	Conversión a partir de conductividad	DiST	Uso manual	https://www.hannainst.es
	Óptica	Aquasonde	Uso manual y datalogger incorporado	https://www.aquaread.com/
Nitratos	Adsorción luz UV	OTT ecoN	Ethernet, RS485, SDI-12	https://www.ott.com/
		SUNA V2	RS232; Analog 4 – 20 mA; (USB, SDI-12 opcional)	https://www.seabird.com/
		Varion Plus 700 IQ	Ethernet, RS485, SDI-12	https://www.wtw.com/
		NICO	Ethernet (TCP/IP), RS-485 (Modbus RTU)	https://www.trios.de/
		Hydrolab HL4 y HL7	SDI-12, RS-485, RS-232, TTY, USB	https://www.ott.com/
Multiparámetro	Diversas: potenciometría, luminiscencia, óptica, etc. Depende de los parámetros que se midan: Temperatura, Conductividad, pH/ORP, Oxígeno Disuelto (LDO), Turbidez, Profundidad, Clorofila a, Algas verde-azuladas/Cianobacterias, Rodamina, amonio, Nitrato, Cloruro	AP-2000 y otras de la serie	Uso manual	https://www.aquaread.com/
		TRIPOD y otras de la serie	Modbus RS485 /SDI12	https://en.aqualabo.fr/
		HI98199 y superiores	Uso manual	https://www.hannainst.es
		MX9829A y superiores		
		HydroCAT-EP	SDI-12, RS232	https://www.seabird.com/
Turbidímetro	Monitoreo continuo, mediante electrodos y sin reactivos, de amonio, nitrato, potasio y cloruro simultáneamente	IQ SensorNet VARiON® Plus Sensors	Ethernet, RS485, SDI-12	https://www.wtw.com/
		AquaClear™	USB RS-232	www.thermofisher.com

Tecnología DataStick de óptica
precalibrada

Potasio	Electrodo selectivo de iones (ISE)	Analizador K Instran	Ethernet, RS485, SDI-12	https://www.instru.es/
Fosfato	Electrodo selectivo de iones (ISE)	Analizador Ortofosfato Instran	Ethernet, RS485, SDI-12	https://www.instru.es/
Clorofila a	Intensidad de fluorescencia	AlgaeTorch	USB	https://metrohm.com

5.2.5. Determinación de calidad del agua en acuíferos que reciben retornos de riego

La medida de los parámetros de calidad en las aguas subterráneas se lleva a cabo, normalmente, en laboratorio a partir de muestras de agua tomadas en los pozos o manantiales establecidos como puntos de control. Como se ha comentado anteriormente, el análisis de las muestras de agua se realizará en laboratorios acreditados.

También se dispone de sondas de medida en continuo de algunos de los parámetros fisicoquímicos del agua, similares a las que se emplean también en las aguas superficiales (Figura 16 a 18). Se pueden encontrar en el mercado las denominadas sondas multiparamétricas que incluyen numerosos sensores de medición en continuo: nivel de agua, temperatura, conductividad, pH, potencial redox, oxígeno, turbidez, amoníaco, nitrato, cloruro, amonio, sodio y calcio, flúor o potasio. Sin embargo, se trata de sondas que requieren procesos de calibración periódicos llevados a cabo por técnicos especializados.

Normalmente los pozos de control, salvo que se empleen para extraer agua de forma periódica, no tienen instaladas bombas para elevar agua. La recogida de las muestras se tiene que realizar mediante toma muestras tipo *bailer* (Figura 20, izquierda) o con bombas portátiles enchufadas a baterías externas (Figura 20, derecha).

Existen protocolos específicos para la toma de muestras en aguas subterráneas (ISO 5667⁹) que dependen de los parámetros que se desee analizar. A grandes rasgos, y para el control de retorno de riego, se puede emplear tanto los *bailer* como bombas portátiles, siendo

⁹ ISO 5667. Series for sampling and to the Chemical Monitoring Activity - Guidance Document No. 15 Guidance on Groundwater Monitoring; Ground-Water Sampling Guidelines for Superfund and RCRA Project Managers, United States Environmental Protection Agency, 2002

más aconsejable el muestreo mediante bombeo. Hay que tener en cuenta que cada uno de estos métodos tiene sus ventajas e inconvenientes.

El bailer (Figura 20, izquierda) consiste en un cilindro, normalmente de PVC, unido a una cuerda que puede alcanzar grandes profundidades. El lastre que posee en un extremo le permite descender verticalmente atravesando la columna de agua hasta la profundidad deseada, donde se toma la muestra. También permite determinar si existe estratificación en profundidad de las aguas, con diferentes niveles de salinidad y nitratos, dado que permite de forma sencilla la toma de muestras a distintas profundidades. Sin embargo, en acuíferos con poco movimiento de agua, el agua de la tubería permanece estancada durante periodos prolongados dando lugar a procesos físico-químicos que causan que la muestra no sea representativa. En estos casos, el pozo necesita ser purgado y solo puede plantearse con bombas de cierto caudal.

Las bombas son más costosas de instalar y poseen una limitación de altura de bombeo, en función de su potencia. La toma de muestra mediante bombeo se debe realizar introduciendo una bomba de bajo caudal que no genere turbulencias posicionándola a la profundidad de los tramos más productivos del acuífero que poseen tubería ranurada, es decir, en aquellas zonas donde existe un mayor movimiento de agua a través del acuífero.

La toma de muestras debe ir siempre acompañada de una medida de nivel piezométrico o de medición del caudal en el caso de manantiales, para determinar el momento de muestreo (aguas altas o bajas). Una vez obtenida la muestra, también debe medirse in situ la temperatura del agua y del aire, el pH, el oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica.



Figura 20. *Tomamuestras tipo bailer (izquierda) y bomba peristáltica (derecha).* Fuente: <https://envirotecnics.com/>

6. Destinatarios de cada una de las partes de la encomienda

La Tabla 13 indica los posibles destinatarios de cada uno de los apartados del documento.

La parte introductoria general es de utilidad para todos los entes que participan en la definición, ejecución, puesta a punto y explotación de la red de control de calidad. En cuanto a los apartados técnicos sobre qué, dónde y cómo realizar las mediciones, sus destinatarios son principalmente los proyectistas, ejecutores de la obra e instaladores de la red. Mientras que la sección sobre el diseño de la frecuencia de muestreo e interpretación de los resultados va destinada a los proyectistas y organismos que van a explotar la red de control de calidad, sean empresas, organismos externos o la propia Comunidad de Regantes, si tiene capacidad técnica.

En la Tabla 13 se ha propuesto a las CR (técnicos) como destinatarias de todos los apartados de puesta en marcha de la red de control de calidad. Es importante que participen en todos los procesos de la puesta en marcha para que lo vean como algo suyo. La reducción de la contaminación difusa mediante el ahorro de agua y agroquímicos redundará en un ahorro de

los costes de producción. En cuanto al apartado de análisis y explotación de los datos, las CR podrán asumirlo si disponen de la capacitación y formación necesaria.

Tabla 13. *Apartados de este documento relacionados con el diseño, mantenimiento y explotación de una red de control de calidad de retornos de riego y la asignación tentativa de los destinatarios a los que se dirigen.*

Apartados del documento\ A quién van dirigidos		Proyectistas	Ejecutores de obra	Instaladores	Empresa u organismo especializada	CR*
Datos generales	1. Resumen ejecutivo	X	X	X	X	X
	2. Introducción	X	X	X	X	X
	3. Características de una red de control de calidad	X	X	X	X	X
Diseño de la red de control	Localización de los puntos de medida	X	X		X	X
	4.1 Entrada	X	X		X	X
	4.2.1.1 Salida drenajes superficiales	X	X		X	X
	4.2.2.1 Salida drenajes subterráneos	X	X		X	X
	Medidas de caudal	X	X		X	X
	4.1 Entrada	X	X		X	X
	4.2.1.2 Drenajes superficiales	X	X		X	X
	4.2.2.2 Drenajes subterráneos	X	X		X	X
	Medidas de calidad	X	X		X	X
	4.1 Entrada	X	X		X	X
	4.2.1.3 Drenajes superficiales	X	X		X	X
	4.2.2.3 Drenajes subterráneos	X	X		X	X
Diseño del plan de muestreo	Diseño estadístico del plan de muestreo	X			X	X
	4.1 Entradas	X			X	X
	4.2.1.4 Drenajes superficiales	X			X	X
	4.2.2.4 Drenajes subterráneos	X			X	X
Análisis y explotación de los datos	Interpretación de resultados				X	X
	4.1 Entradas				X	X
	4.2.1.5 Drenajes superficiales				X	X
	4.2.2.5 Drenajes subterráneos				X	X
Sensores de medida	Medidas de caudal	X	X	X	X	X
	5.1.2 y 5.1.3 Entradas	X	X	X	X	X
	5.1.1 Drenajes superficiales	X	X	X	X	X
	5.1.4 Drenajes subsuperficiales	X	X	X	X	X
	Medidas de calidad	X	X	X	X	X
	5.2.2 y 5.2.3 Entradas	X	X	X	X	X
	5.2.1 Drenajes superficiales	X	X	X	X	X
	5.2.4 Drenajes subsuperficiales	X	X	X	X	X

* En función de las capacidades de las Comunidades de Regantes, será necesaria su participación en los diferentes apartados.

7. Arquitectura de medidas por actuaciones de los proyectos.

La Tabla 14 resume las recomendaciones sobre las mediciones a realizar en los proyectos en función de su tipología, del origen del agua de riego y de si la zona en la que se realiza el proyecto es vulnerable o no.

La clasificación de los proyectos por tipología se ha realizado en función de su objetivo principal. Sin embargo, hay que considerar en cada proyecto todas las actuaciones a realizar, no sólo la principal, para concretar las necesidades de control de calidad del agua. Es el caso, por ejemplo, de proyectos clasificados como “energías renovables” en los que la energía se utiliza para depurar aguas de EDAR, desalar o bombear agua de estos orígenes a los sistemas de riego. Así, siempre que el origen del agua sea **no** convencional es **muy recomendable** realizar un control de la calidad del agua de entrada y de salida, ya que en la mayoría de estos proyectos las aguas de los FRR vierten a acuíferos con problemas de calidad. La caracterización de la calidad del agua de entrada siempre es interesante, porque permite realizar ajustes en la fertilización y además marca el punto de partida de lo que se puede encontrar en los retornos de riego. Por otro lado, hay que tener en cuenta que si el proyecto está dentro de los límites de una zona vulnerable (Figura 21), los requerimientos del mismo en materia de protección ambiental son más exigentes.

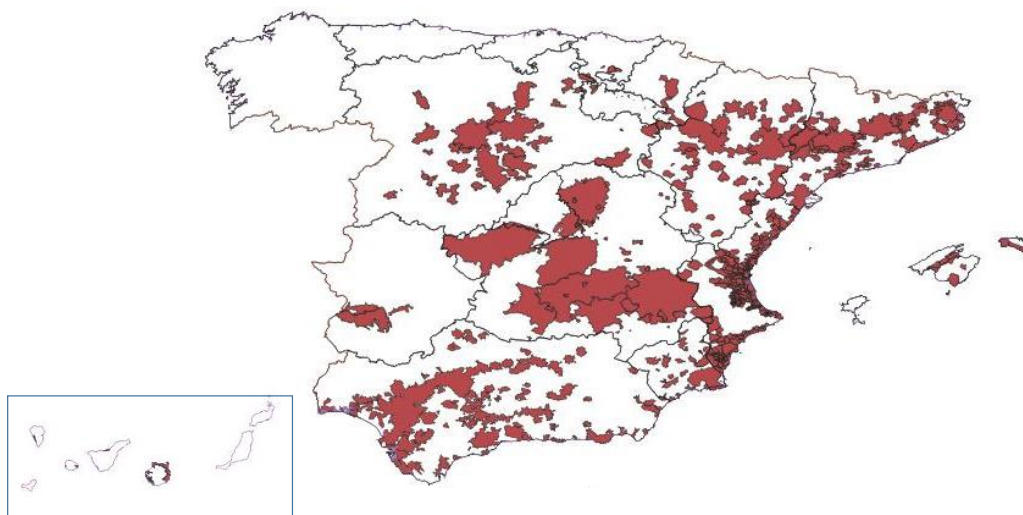


Figura 21. Delimitación de las zonas vulnerables según el RD47/2022 Sobre contaminación de las aguas por nitratos de origen agrario.

Tabla 14. Recomendaciones para la determinación de la cantidad y calidad del agua de entrada y salida de las zonas regables en función del origen del agua de riego, la tipología de proyecto y la vulnerabilidad ambiental de la zona.

Origen del agua	Tipología de Proyecto		Energías Renovables	Eficiencia Energética e Hídrica	Nuevas Tecnologías y Sistemas de Telecontrol	Modernización Riego por Superficie a Presurizado	Energías Renovables	Eficiencia Energética e Hídrica	Nuevas Tecnologías y Sistemas de Telecontrol	Modernización Riego por Superficie a Presurizado
	Medidas/ZONA		VULNERABLE				NO VULNERABLE			
Superficial convencional	Entrada (agua riego)	Cantidad	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable
		Calidad	Recomendable	Muy recomendable	Opcional	Recomendable	Opcional	Recomendable	Opcional	Recomendable
	Salida (retornos de riego)	Cantidad	Opcional	Muy recomendable	Opcional	Muy recomendable	No procede	Recomendable	No procede	Recomendable
		Calidad	Opcional	Muy recomendable	Opcional	Muy recomendable	No procede	Recomendable	No procede	Recomendable
Superficial Regenerada	Salida (retornos de riego)	Cantidad	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable
		Calidad	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable
	Salida (retornos de riego)	Cantidad	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Recomendable	Recomendable	Recomendable	Recomendable
		Calidad	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Recomendable	Recomendable	Recomendable	Recomendable
Subterránea	Salida (retornos de riego)	Cantidad	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable	Muy recomendable
		Calidad	Recomendable	Muy recomendable	Recomendable	Muy recomendable	Recomendable	Recomendable	Recomendable	Recomendable
	Salida (retornos de riego)	Cantidad	Opcional	Muy recomendable	Opcional	Muy recomendable	No procede	Recomendable	No procede	Recomendable
		Calidad	Opcional	Muy recomendable	Opcional	Muy recomendable	No procede	Recomendable	No procede	Recomendable

8. Recursos

Acceso a MDT, Geológico y Parcelas para su descarga o visualización (24 de noviembre de 2021)

Modelos digitales del terreno y mas (IGN – Instituto Geográfico Nacional)

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>

Servidor WMS.

<https://servicios.idee.es/wms-inspire/mdt>

Más información en:

<https://www.ign.es/web/ign/portal/ide-area-nodo-ide-ign>

Cartografía Geológica (IGME-Instituto Geológico y Minero de España)

<http://info.igme.es/cartografiadigital/portada/Default.aspx?language=es>

Servidor WMS:

https://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Geologica/IGME_MAGNA_50/MapServer/WMSServer?version=1.3.0

Más información en:

http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx#IGME_MAGNA_50

Parcelas Catastro

<https://www.sedecatastro.gob.es/Accesos/SECAccDescargaDatos.aspx>

Servidor WMS.

<http://ovc.catastro.meh.es/Cartografia/WMS/ServidorWMS.aspx?>

Más información en:

<http://www.catastro.minhap.gob.es/esp/wms.asp>

Parcelas Sigpac

Desde el visor para zonas pequeñas: <https://sigpac.mapa.gob.es/feqa/visor/>

Desde los portales web de cada comunidad autónoma por municipios:

Aragón: <https://idearagon.aragon.es/descargas.jsp>

Servidor WMS:

<https://wms.mapa.gob.es/sigpac/wms>

Más información en:

https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/directorio_datos_servicios/agricultura/wms-inspire-agricultura.aspx

RED Piezométrica Nacional

[Red de seguimiento piezométrico \(miteco.gob.es\)](http://miteco.gob.es)

Equipamiento y sensores

www.thermofisher.com

www.thermofisher.com

www.thermofisher.com

<https://www.xylem.com>

<https://www.instru.es/>

<https://www.instru.es/>

<https://www.ysi.com/varion>

www.metrohm.com

<https://grupofebesa.com>

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: Nery Zapata Ruíz Grupo Riego, Agronomía y Medio Ambiente. EEAD-CSIC;
Emilio Nicolás Nicolás - Departamento Riego CEBAS-CSIC

Autores:

Grupo Riego, Agronomía y Medio Ambiente. EEAD-CSIC: Nery Zapata Ruíz, Daniel Isidoro Ramírez, M^a Ángeles Lorenzo González, José Manuel Mirás Ávalos, Enrique Playán Jubillar, Raquel Salvador Esteban, Farida Dechmi, José Cavero Campo, Ramón Isla Climet

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

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 para el control y seguimiento de la calidad del agua y de los retornos de riego.